

# 人工污秽下盐/灰密对普通悬式绝缘子串 交流闪络特性的影响

蒋兴良, 舒立春, 张永记, 张志劲, 胡建林

(重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆市 沙坪坝区 400044)

## Influence of ESDD and NSDD on AC Flashover Characteristic of Artificially Polluted XP-160 Insulators

JIANG Xing-liang, SHU Li-chun, ZHANG Yong-ji, ZHANG Zhi-jin, HU Jian-lin

(Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology of Ministry of Education,  
Chongqing University, Shapingba District, Chongqing 400044, China)

**ABSTRACT:** Pollution flashover of insulator strings is one of the most serious natural disasters. A large number of studies about the influence of the equivalent salt deposit density (ESDD) on AC flashover voltage of polluted insulators have been done home and abroad, but few study done about the influence of the non-soluble deposit density (NSDD) on it is done. A lot of laboratory experiments are carried out on polluted XP-160 insulator string of 7 units in the artificial fog cabinet. Based on the tests results, the effects of both ESDD and NSDD on the AC flashover voltage of the artificial polluted XP-160 insulators are also analyzed. It shows that both ESDD and NSDD have influence on the AC flashover voltage ( $U_f$ ) of the artificially polluted insulators, that the relationship between  $U_f$  and ESDD is the same as the one between  $U_f$  and NSDD in which the  $U_f$  reduces with the increase of ESDD by a power function, and that both ESDD and NSDD are mutually independent as for the influence on  $U_f$ . Therefore, while mapping a pollution level for a district, both ESDD and NSDD, should be considered. Then, it shows the relationship between the flashover voltage of an artificial contaminated XP-160 insulator string of 7 units and ESDD as well as NSDD.

**KEY WORDS:** insulator string, equivalent salt deposit density; non-soluble deposit density; AC flashover voltage; artificial fog cabinet; pollution

**摘要:** 污闪是电力系统的严重自然灾害之一, 国内外对盐密(ESDD)的影响进行了大量的研究, 但对灰密(NSDD)影响的

研究较少。文中以7片串普通悬式绝缘子XP-160为试品, 在人工雾室中进行了大量的人工污秽试验, 分析了ESDD和NSDD的变化对人工污秽绝缘子交流闪络电压的影响。试验结果表明: 在人工污秽试验中, ESDD和NSDD均对绝缘子交流闪络电压有影响, 与ESDD对人工污秽绝缘子串绝缘子交流闪络电压的影响一致, 人工污秽绝缘子串交流闪络电压与NSDD也呈幂函数关系。在对交流闪络电压的影响上, ESDD和NSDD是相互独立的。因此, 污区的划分不仅应考虑ESDD, 同时也应考虑NSDD。对于7片串XP-160, 文中还给出人工污秽试验条件下绝缘子串的交流污闪电压表达式。

**关键词:** 绝缘子串; 等值附盐密度; 灰密; 交流闪络电压; 人工雾室; 污秽

## 0 引言

污秽对电力系统造成了严重危害, 几十年来国内外对此展开了广泛研究<sup>[1-8]</sup>。

大量研究表明, 人工污秽绝缘子的污闪电压( $U_f$ )与等值附盐密度(ESDD, 记作 $r_{ESDD}$ )的关系可表示为<sup>[1,9-11]</sup>

$$U_f = A r_{ESDD}^{-a} \quad (1)$$

式中:  $U_f$ 为污闪电压, kV;  $A$ 为与绝缘子形状和污秽程度有关的系数;  $r_{ESDD}$ 为等值附盐密度,  $mg/cm^2$ ;  $a$ 为表征 $r_{ESDD}$ 对污闪电压影响的特征指数。

文献[1]试验结果表明: 人工污秽单片X-4.5绝缘子的 $A$ 为4.75,  $a$ 为0.25; 同一盐密下, 当灰密为 $1.0 mg/cm^2$ 时污闪或耐受电压开始饱和, 在灰密为 $2.0 mg/cm^2$ 达到最低点。文献[1]也给出了西安电瓷研究所对单片X-4.5绝缘子试验得到的 $A$ 为4.40,  $a$ 为0.30。Ramos等人研究结果表明直流下 $a$ 为

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90210026)。

Project Supported by National Science Foundation of China (90210026).

0.33, 交流下  $a$  为 0.20<sup>[6]</sup>。文献[9-10]在交流下对钟罩型、三伞型、双伞型绝缘子污闪试验得到  $a$  为 0.20。文献[11-12]试验结果表明: 污秽可看成为独立参量,  $U_f$  与污秽程度  $r_{ESDD}$  满足式(1)的关系, 不同型式绝缘子在交、直流电压作用下常数  $A$  均随着海拔升高而降低,  $a$  随着电压类型、绝缘子型式、海拔高度不同而变化。

IEC 507-1991 和 GB/T 4585-2004 推荐的固体层法并未考虑灰密(NSDD, 记作  $r_{NSDD}$ )对  $U_f$  的影响<sup>[13]</sup>, 但即将出版的 IEC60815 提出污区的划分应考虑  $r_{NSDD}$  的影响。许多研究也表明  $r_{NSDD}$  对闪络电压有一定的影响。文献[9,14-17]提出: 不同型式绝缘子  $U_f$  随  $r_{NSDD}$  变化规律基本一致, 即随着  $r_{NSDD}$  的增加,  $U_f$  逐渐降低, 其关系可表示为

$$U_f = Br_{NSDD}^{-b} \quad (2)$$

式中:  $r_{NSDD}$  为灰密,  $mg/cm^2$ ;  $B$  为与绝缘子形状和污秽程度有关的系数;  $b$  为表征绝缘子串  $U_f$  随  $r_{ESDD}$  变化的特征指数, 文献[14]提出的  $b$  值为 0.12。Matsuoka 等用高岭土和砥石粉模拟灰密的人工试验结果表明, 当在  $r_{ESDD}=0.1 mg/cm^2$  时, 污秽绝缘子交、直流  $U_f$  与  $r_{NSDD}$  的关系均可由式(2)表示, 且  $b$  为 0.15, 但  $B$  值与绝缘子型式有关<sup>[15]</sup>。Ramos 采用砥粉进行了人工交流污秽试验, 认为随着  $r_{NSDD}$  的增大,  $U_f$  将降低, 并得到  $b$  值为 0.15<sup>[9]</sup>。文献[10, 16]根据钟罩型、三伞型、双伞型绝缘子的试验结果得到  $b$  值为 0.12。

由上可知:  $r_{ESDD}$  和  $r_{NSDD}$  均对  $U_f$  产生影响, 但不同试验所得到的盐密影响特征指数  $a$  和灰密影响特征指数  $b$  有较大差异, 给工程应用带来了困难; 目前对灰密或盐密单独作用下的研究较多, 但对盐密和灰密共同作用下的研究则较少, 尚未见综合考虑  $r_{ESDD}$  和  $r_{NSDD}$  影响的污闪电压计算公式。因此, 本文选择普通悬式绝缘子(XP-160)进行了大量的人工污秽试验, 分析染污绝缘子串交流闪络电压与盐密、灰密之间的关系。

## 1 试验布置及试验方法

### 1.1 试品

本文选择普通悬式绝缘子(XP-160)为试品, 其结构高度  $H$  为 155mm, 盘径  $D$  为 255mm, 爬电距离  $L$  为 305mm, 表面积  $A$  为 1691mm<sup>2</sup>。

### 1.2 试验装置及方法

试验是在 4.0m×4.0m×3.0m 的人工雾室完成的, 由 150kV/900kVA 试验变压器提供试验电压,

其短路阻抗为 8.25%, 配套的 10kV 调压器的短路阻抗为 8.34%, 试验变压器输出电压 150kV (峰值)时的最大短路电流为 30A, 满足 IEC 标准对污秽试验电源的要求。

试品染污采用 GB/T 4585-2004<sup>[13]</sup>推荐的固体层法, 硅藻土混合物(硅藻土, 二氧化硅与纯净水)配制成污液, 对清洗干净的试品用浸泡法进行染污, 然后悬挂静置 24h, 待自然阴干后悬挂于人工雾室中。蒸汽由贴近地表面的蒸汽管道输送, 试验过程中雾室温度控制在 35℃以下, 试品湿润时间大约 10~15min, 绝缘子表面污层充分湿润时采用均匀升压法立即进行闪络试验, 每串闪络 4~5 次; 在同一个污秽度下, 选择 3 串绝缘子, 取其中与平均值误差不超过 10%的所有闪络电压的平均值为污闪电压。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 $r_{ESDD}$ 对染污绝缘子闪络特性的影响

本文试验研究了  $r_{NSDD}$  分别为 0.45mg/cm<sup>2</sup> 和 0.90mg/cm<sup>2</sup> 时 7 片串 XP-160 绝缘子的  $U_f$  与  $r_{ESDD}$  的关系, 试验结果如图 1 所示。

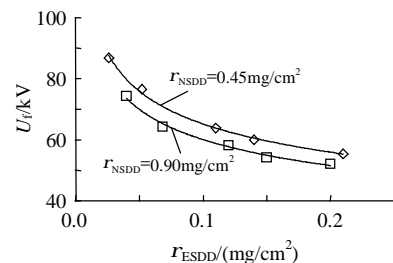


图 1 7 片串 XP-160 闪络电压与  $r_{ESDD}$  的关系

Fig. 1 AC flashover voltage of polluted 7 XP-160 vs.  $r_{ESDD}$

由图 1 可知: 7 片串人工污秽绝缘子串的  $U_f$  随着  $r_{ESDD}$  的增加而下降,  $r_{ESDD}$  较小时,  $U_f$  随  $r_{ESDD}$  的增加下降较快, 随着  $r_{ESDD}$  的继续增加,  $U_f$  下降的趋势变缓。如在  $r_{NSDD}=0.90mg/cm^2$  时, 当  $r_{ESDD}$  从 0.040  $mg/cm^2$  增加到 0.068  $mg/cm^2$ ,  $r_{ESDD}$  仅增加了 0.028  $mg/cm^2$ , 但  $U_f$  降了 11.6kV; 而当  $r_{ESDD}$  从 0.12  $mg/cm^2$  增加到 0.20  $mg/cm^2$ ,  $r_{ESDD}$  增加了 0.08  $mg/cm^2$ ,  $U_f$  只下降了 6.1kV。

将图 1 的试验结果按式(1)进行曲线拟合得到对应的  $A$ 、 $a$  值及试验结果与拟合曲线的相关系数的平方  $R^2$  如表 1 所示。由表 1 可知, 不同  $r_{NSDD}$  下, 盐密影响特征指数  $a$  均为 0.22, 即污秽影响特征指数  $a$  受  $r_{NSDD}$  的影响并不明显, 因此可认为  $r_{ESDD}$  的影响是独立的, 这与现有研究结果一致<sup>[9,11-12]</sup>。

表1 不同 $r_{NSDD}$ 下常数 $A$ 和盐密特征指数 $a$   
Tab.1 Constant  $A$  and special exponent  $a$  under different  $r_{NSDD}$

$r_{NSDD}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$	$A$	$a$	$R^2$
0.45	39.3	0.220	1.0
0.90	36.2	0.220	0.99

2.2  $r_{NSDD}$ 对染污绝缘子闪络特性的影响

为分析 $r_{NSDD}$ 对 $U_f$ 的影响,本文在 $r_{ESDD}$ 分别为 $0.068\text{mg}/\text{cm}^2$ 和 $0.14\text{mg}/\text{cm}^2$ 进行了试验研究,分析了7片串XP-160绝缘子串的 $U_f$ 与 $r_{NSDD}$ 的关系,试验结果如图2所示。

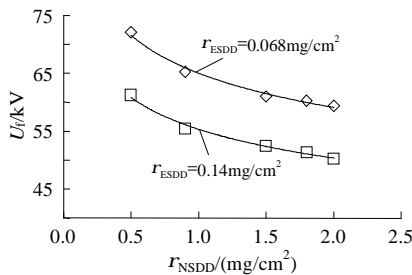


图2 7片串XP-160闪络电压与 $r_{NSDD}$ 的关系

Fig.2 AC flashover voltage of polluted 7×XP-160 vs.  $r_{NSDD}$

由图2可知:7片串人工污秽绝缘子串的 $U_f$ 随着 $r_{NSDD}$ 增加而下降;且 $r_{NSDD}$ 较小时,随 $r_{NSDD}$ 的增加 $U_f$ 下降较快,随着 $r_{NSDD}$ 的继续增加, $U_f$ 下降的趋势变缓,其趋势与 $U_f$ 和 $r_{ESDD}$ 之间的关系一致。如 $r_{ESDD}$ 从 $0.50\text{mg}/\text{cm}^2$ 增加到 $0.90\text{mg}/\text{cm}^2$ , $r_{ESDD}$ 仅增加了 $0.40\text{mg}/\text{cm}^2$ ,但 $U_f$ 降了 $7.0\text{kV}$ ;而 $r_{NSDD}$ 从 $0.9\text{mg}/\text{cm}^2$ 增加到 $1.50\text{mg}/\text{cm}^2$ , $r_{ESDD}$ 增加了 $0.60\text{mg}/\text{cm}^2$ , $U_f$ 只下降了 $4.1\text{kV}$ 。

浸润理论<sup>[18]</sup>认为:当水分和导电性物质结合并溶解导电性物质后,其局部电导上升;当水分和非导电性物质结合时,其局部电导则不变,即 $r_{NSDD}$ 对 $U_f$ 的影响与 $r_{ESDD}$ 对 $U_f$ 的影响在性质上有差异, $U_f$ 随着 $r_{NSDD}$ 增加而下降,其原因是不可溶物的增加导致绝缘子表面所吸收的水分增多,形成了更厚的水膜,从而导致泄漏电流增大<sup>[16-17]</sup>。

将图2试验结果按式(2)进行曲线拟合得其 $B$ 、 $b$ 值及 $R^2$ 如表2所示。由表2知,不同 $r_{ESDD}$ 下,灰密指数 $b$ 分别为0.138和0.136,其误差可能是试验误差造成的,如果取2位小数,则均为0.14,即灰密指数 $b$ 受 $r_{ESDD}$ 影响并不明显,因此也可认为

表2 不同 $r_{ESDD}$ 下常数 $B$ 和灰密特征指数 $b$   
Tab.2 Constant  $B$  and special exponent  $b$  under different  $r_{ESDD}$

$r_{NSDD}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$	$B$	$b$	$R^2$
0.068	65.0	0.138	0.99
0.140	55.3	0.136	0.99

$r_{NSDD}$ 的影响是独立的。

2.3  $r_{ESDD}$ 与 $r_{NSDD}$ 的综合影响

2.3.1 最小二乘法拟合的污闪电压计算公式

分析表明, $r_{ESDD}$ 和 $r_{NSDD}$ 对 $U_f$ 的影响可看成是相互独立的。因此,分析可得绝缘子串的 $U_f$ 与 $r_{ESDD}$ 和 $r_{NSDD}$ 的关系可表示为

$$U_f = K r_{ESDD}^{-c} r_{NSDD}^{-d} \quad (3)$$

式中: $K$ 为与绝缘子串长、型式有关的系数; $c$ 为表征绝缘子串 $U_f$ 随 $r_{ESDD}$ 变化的特征指数; $d$ 为表征绝缘子串 $U_f$ 随 $r_{NSDD}$ 变化而改变的特征指数。

表3为不同 $r_{ESDD}$ 及 $r_{NSDD}$ 下7片串XP-160的人工污秽试验得到的 $U_f$ 。

表3 不同 $r_{ESDD}$ 及 $r_{NSDD}$ 下7片串XP-160污闪电压  
Tab.3 Flashover voltage of 7XP-160 at various  $r_{ESDD}$  and  $r_{NSDD}$

数据编号 $i$	$r_{NSDD}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$	$r_{ESDD}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$	$U_f/\text{kV}$
0	0.16	0.017	117.0
1	0.15	0.034	101.1
2	0.52	0.026	86.8
3	0.15	0.078	81.2
4	0.45	0.052	76.5
5	0.90	0.040	74.3
6	0.15	0.17	67.5
7	0.44	0.11	63.8
8	1.54	0.046	65.0
9	0.90	0.068	65.2
10	0.94	0.069	62.9
11	0.49	0.14	61.2
12	1.40	0.075	58.2
13	0.90	0.15	54.2
14	0.90	0.20	50.8
15	1.47	0.27	44.3

由分析可知, $U_f$ 与 $r_{ESDD}$ 和 $r_{NSDD}$ 之间满足式(3)的定性关系。对式(3)进行线性化处理可得

$$\ln U_f = \ln K - c \ln r_{ESDD} - d \ln r_{NSDD} \quad (4)$$

根据最小二乘法<sup>[19]</sup>的原则,只要保证偏差的平方和 $M$ 最小,就可以确定每个试验数据与式(4)之间的偏差绝对值都很小,其中

$$M = \sum_{i=0}^n [\ln U_{fi} - (\ln K - c \ln r_{ESDDi} - d \ln r_{NSDDi})]^2 \quad (5)$$

式中: $M$ 为偏差平方和; $U_{fi}$ 、 $r_{ESDDi}$ 及 $r_{NSDDi}$ 分别为表3中人工污秽绝缘子串闪络电压、染污绝缘子表面盐密和染污绝缘子表面灰密; $i$ 为试验数据编号; $n=15$ 。

将 $M$ 看成自变量 $K$ 、 $c$ 和 $d$ 的一个三元函数,由函数 $M=M(K, c, d)$ 取得最小值的点就可以得到式(4)中 $K$ 、 $c$ 和 $d$ ,也就可以得到在 $r_{ESDD}$ 及 $r_{NSDD}$



综合影响下  $U_f$  的表达式。

偏差的平方和  $M$  最小值点可由多元函数极值求取，根据表 3 中不同  $r_{ESDD}$  及  $r_{NSDD}$  下 7 片串 XP-160 的  $U_f$ ，通过求解式(5)中  $M$  关于  $K$ 、 $c$  和  $d$  的偏导数方程组可得

$$U_f = 34.1 r_{ESDD}^{-0.231} r_{NSDD}^{-0.151} \quad (6)$$

### 2.3.2 TableCurve 软件分析的污闪电压计算公式

为进一步确定  $r_{ESDD}$  与  $r_{NSDD}$  对  $U_f$  的综合影响，采用 TableCurve 三维分析软件对表 3 的试验结果进行分析得到人工污秽绝缘子串  $U_f$  与  $r_{ESDD}$ 、 $r_{NSDD}$  关系式为

$$U_f = 33.6 r_{ESDD}^{-0.238} r_{NSDD}^{-0.153} \quad (7)$$

式(7)与表 3 试验结果拟合的相关系数平方  $R^2$  为 0.99。采用 TableCurve 软件拟合得到的  $U_f$  与  $r_{ESDD}$ 、 $r_{NSDD}$  之间的关系曲面如图 3 所示。

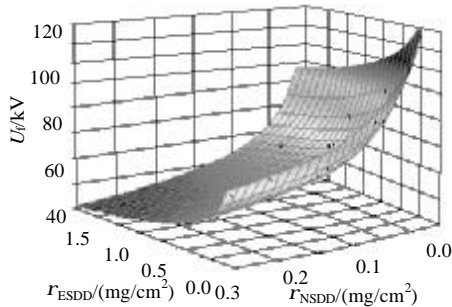


图 3 污闪电压与  $r_{ESDD}$ 、 $r_{NSDD}$  的关系  
Fig. 3 Relationship among flashover voltages of 7×XP-160,  $r_{ESDD}$  and  $r_{NSDD}$

由式(6)和(7)可知，利用 TableCurve 软件分析得到的 7 片串 XP-160 染污绝缘子串  $U_f$  计算公式与采用最小二乘法得到的计算公式基本一致。

### 2.3.3 污闪电压的校验

为了进一步验证式(6)和式(7)的正确性，利用式(6)和式(7)计算出不同  $r_{ESDD}$  及  $r_{NSDD}$  的  $U_f$ ，并与试验结果进行比较，如表 4 所示。

由表 4 可知，采用最小二乘法及 TableCurve 软

表 4 7 片串 XP-160 污闪电压计算值与试验值对比  
Tab. 4 Comparison between the testing voltage and calculating voltage of artificial contaminated 7×XP-160

参数	值		
$r_{NSDD}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$	0.90	0.15	1.47
$r_{ESDD}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$	0.20	0.17	0.27
试验值 $U_f/\text{kV}$	52.4	67.5	44.8
最小二乘法计算值 $U_f/\text{kV}$	50.2	68.2	43.5
相对误差/%	4.2	1.0	2.9
TableCurve 计算值 $U_f/\text{kV}$	50.2	68.3	43.4
相对误差/%	4.2	1.2	3.1

件拟合得到的  $U_f$  公式计算出来的染污绝缘子闪络电压与试验得到的污闪电压很接近。表 4 对几组试验结果与计算值进行对比，两者误差在 10%之内，因此认为采用最小二乘法及 TableCurve 软件拟合得到的  $U_f$  计算公式是可行的。结合式(6)、(7)可得污闪电压

$$U_f = 34.0 r_{ESDD}^{-0.24} r_{NSDD}^{-0.15} \quad (8)$$

因此，式(8)可计算任何污秽度下 7 片串 XP-160 绝缘子的  $U_f$ 。对于不同串长的 XP-160 的  $U_f$ ，可以通过求取不同串长下  $K$  值，进而得到不同串长  $U_f$  计算公式，这对于工程实际及人工污秽试验中预测绝缘子串  $U_f$  具有一定的意义。

## 3 结论

(1)在人工污秽试验中，不仅应考虑盐密  $r_{ESDD}$  的影响，而且应考虑灰密  $r_{NSDD}$  的影响，灰密对人工污秽绝缘子的闪络电压同样是有影响的。因此在进行污区划分时，应同时考虑等值附盐密度和灰密的影响。

(2)人工污秽绝缘子的  $U_f$  与盐密和灰密之间均满足幂函数关系，从  $r_{ESDD}$  和  $r_{NSDD}$  对  $U_f$  的影响上分析，二者是相互独立的，试验时可分别加以考虑。

(3)7 片串 XP-160 绝缘子串的  $U_f$  可表示为  $U_f = K r_{ESDD}^{-c} r_{NSDD}^{-d}$ ，其中  $K=34.0$ ， $c=0.24$ ， $d=0.15$ 。

(4)本文试验研究初步揭示了  $r_{NSDD}$  对 XP-160 绝缘子串  $U_f$  的影响，对不同型式绝缘子串尚需进一步进行试验研究。虽然人工污秽试验与自然污秽试验有一定的差异，但本文的试验结果可供工程应用参考。

## 参考文献

- [1] 顾乐观，孙才新. 电力系统污秽绝缘[M]. 重庆：重庆大学出版社，1988.
- [2] 蒋兴良，张志劲，胡建林，等. 高海拔下不同伞形结构 750kV 合成绝缘子短样交流污秽闪络特性及其比较[J]. 中国电机工程学报，2005，25(12)：159-164.  
Jiang Xingliang, Zhang Zhijin, Hu Jianlin, et al. AC pollution flashover performance and compare of short samples of 750kV composite insulators with different configuration in high altitude area[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 159-164(in Chinese).
- [3] 蒋兴良，谢述教，舒立春，等. 低气压下三种直流绝缘子覆冰闪络特性及其比较[J]. 中国电机工程学报，2004，24(9)：158-162.  
Jiang Xingliang, Xie Shujiao, Shu Lichun, et al. ICE flashover performance and comparison on three types of DC insulators at low atmospheric press[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 158-162(in Chinese).
- [4] 舒立春，蒋兴良，田玉春，等. 海拔 4000m 以上地区 4 种合成绝

- 缘子覆冰交流闪络特性及电压校正[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 97-101.
- Shu Lichun, Jiang Xingliang, Tian Yuchun, et al. AC flashover performance and voltage correction of four types of iced composite insulator at altitude 4000m above[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 97-101(in Chinese).
- [5] 江秀臣, 安玲, 韩振东. 等值盐密现场测量方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 20(4): 40-44.
- Jiang Xiuchen, An Ling, Han Zhendong. Studying on the method of ESDD on site measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 20(4): 40-44(in Chinese).
- [6] 李晓峰, 李正赢, 陈俊武, 等. 提高线路绝缘子防污闪及抗泄漏性能的新方法[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 69-72.
- Li Xiaofeng, Li Zhengying, Chen Junwu, et al. A new method for improving flashover and leakage characteristics of line insulators [J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 69-72(in Chinese).
- [7] 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流自然积污试验结果的比较[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 13-17.
- Su Zhiyi, Liu Yansheng. Comparison of natural contaminants accumulated on surfaces of suspension and post insulators with DC and AC stress insulator in northern China's inland areas[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 13-17(in Chinese).
- [8] 司马文霞, 蒋兴良, 武利会, 等. 低气压下覆冰染污 10kV 合成绝缘子直流电气特性[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 122-126.
- Sima Wenxia, Jiang Xingliang, Wu Lihui, et al. DC electrical performance of icing and polluted 10kV composite insulator at low atmospheric pressure[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 122-126(in Chinese).
- [9] Ramos N G, Campillo R M T, Naito, K. A study on the characteristics of various conductive contaminants accumulated on high voltage insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 8(4)1993: 1842-1850.
- [10] Zhou J G, Dong G, Imakoma T, et al. Contamination performance of outer-rib type suspension insulators[C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific, 2002: 2185-2190.
- [11] 孙才新, 舒立春, 蒋兴良, 等. 高海拔、污秽、覆冰环境下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 115-120.
- Sun Caixin, Shu Lichun, Jiang Xingliang, et al. AC/DC flashover performance and its voltage correction of UHV insulators in high altitude and icing and pollution environments[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 115-120(in Chinese).
- [12] 孙才新, 司马文霞, 舒立春. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [13] GB/T 4585-2004. 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S]. 2004. GB/T 4585-2004. Artificial pollution test method for AC 1000V and above[S]. 2004.
- [14] 吴光亚, 蔡炜, 卢燕龙, 等. 直流输电线路绝缘子串片数的防污设计[J]. 高电压技术, 2001, 27(6): 51-53.
- Wu Guangya, Cai Wei, Lu Ynalong, et al. Selection of numbers of insulator of pollution insulator strings for DC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(6): 51-53(in Chinese).
- [15] Matsuoka R, Kondo K, Naito K, et al. Influence of nonsoluble contaminants on the flashover voltages of artificially contaminated insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996 11(1): 420-430.
- [16] Sundararajan R, Gorur R. Influence of inert materials on the pollution flashover voltage of porcelain insulators[C]. Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Arlington, TX, USA, 1994: 651-656.
- [17] Sundararajan R, Gorur R S. Role of non-soluble contaminants on the flashover voltage of porcelain insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996, 3(1): 113-118.
- [18] 李晓峰, 李正赢, 丁颖川, 等. 绝缘子表面电导特性的研究及仿真[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 67-74.
- Li Xiaofeng, Li Zhengying, Ding Yingchuan, et al. Studying and simulating the surface conductance characteristic of polluted insulators[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 67-74(in Chinese).
- [19] 杨虎, 刘琼荪, 钟波. 数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.

收稿日期: 2006-03-25.

作者简介:

蒋兴良(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 从事高电压绝缘技术、输电线路覆冰及防护措施研究, [xlijiang@cqu.edu.cn](mailto:xlijiang@cqu.edu.cn);

舒立春(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事高电压绝缘技术研究;

张永记(1980—), 男, 硕士研究生, 从事高电压绝缘技术研究工作。

(责任编辑 韩 蕾)