

## 超、特高压直流线路瓷和玻璃绝缘子污闪特性研究

黄欢<sup>1</sup>, 蒋兴良<sup>1</sup>, 罗利云<sup>2</sup>, 苑吉河<sup>1</sup>, 孙利朋<sup>1</sup>(1. 重庆大学输配电装配及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;  
2. 江西省电力公司超高压分公司, 江西 南昌 330006)

**摘要:** 根据直流人工污秽试验, 笔者分析和比较了6种型式瓷和玻璃绝缘子污闪特性。试验结果表明: 不同型式绝缘子的污秽闪络性能不同, 盐密影响特征指数  $a$  与绝缘子的结构和材质有关, 其值在 0.32~0.55 间。同样污秽下, 玻璃绝缘子的污闪电压梯度高于相同结构的瓷绝缘子, 外伞型绝缘子的污闪电压梯度低于钟罩型绝缘子。绝缘子的有效爬电系数与其型式和污秽程度有关, 可表示为  $K=M \times (SDD)^a$ 。在试验的五种非标准绝缘子中, 玻璃钟罩型绝缘子较好的利用了其爬电距离, 而双伞型瓷绝缘子的有效爬电系数最低。

**关键词:** 直流绝缘子; 污秽; 闪络特性; 闪络电压梯度; 有效爬电系数

**中图分类号:** TM852

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1609(2008)05-0424-04

Pollution Flashover Performances Porcelain and Glass Insulators Intended for EHV/  
UHV DC Transmission LineHUANG Huan<sup>1</sup>, JIANG Xing-liang<sup>1</sup>, LUO Li-yun<sup>2</sup>, YUAN Ji-he<sup>1</sup>, SUN Li-peng<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Transmission &amp; Distribution Equipment and Power System Safety and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Extra High Voltage Branch Company, Jiangxi Province Power Corporation, Nanchang 330006, China)

**Abstract:** Based on the DC artificial pollution tests, the flashover performances of six types of porcelain and glass insulators was analyzed and compared. The test results show that the insulators with different configuration and materials have different pollution flashover characteristics, the exponent  $a$  characterizing the influence of salt deposit density on flashover voltage depends on the configurations and materials, which varies within 0.32 and 0.55. Under the same pollution degree, the flashover voltage gradients of glass insulators are higher than those of porcelain insulators with the same configuration, while the flashover voltage gradients of outer-rib insulators are lower than those of anti-fog insulators. The effectiveness of creepage distance relates with insulator types and pollution degree, which can be denoted by  $K=M \times (SDD)^a$ . For the tested five types of non-standard insulators, the anti-fog glass insulators make good use of their creepage distance, while the two-outer-rib porcelain insulators have the lowest effectiveness of creepage distance.

**Key words:** DC insulator; pollution; flashover performance; flashover voltage gradient; effectiveness of creepage distance

## 0 引言

随着输电等级的不断提高, 电网的分布范围也愈来愈大, 同时工农业生产的发展造成污秽程度日益加剧。据统计, 由于污闪引起的绝缘事故次数在电网总事故次数中已占第2位, 仅次于雷害, 而污闪事故造成的损失却是雷害事故的10倍<sup>[1]</sup>。

由于直流电压下恒定电场的集尘效应, 使得直

流绝缘子的积污在同样条件下比交流绝缘子严重得多<sup>[2-3]</sup>; 同时, 直流电弧燃烧稳定且伞裙间弧络现象比交流严重<sup>[4]</sup>, 因此直流输电线路污闪问题受到广泛重视。国内外学者对此进行了大量的试验研究。

绝缘子的直流污闪电压  $U_f$  (kV) 与盐密  $SDD$  ( $\text{mg}/\text{cm}^2$ ) 的关系可表示为<sup>[5]</sup>

$$U_f = A \cdot (SDD)^a \quad (1)$$

式(1)中,  $A$  是与绝缘子结构和材质有关的系数;  $a$  为表征  $SDD$  对  $U_f$  影响的特征指数。文[4]由14种绝缘

收稿日期: 2007-10-23; 修回日期: 2008-04-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(90210026); “十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAA02A19)。

作者简介: 黄欢(1978-), 女, 湖南省新邵县人, 硕士研究生, 从事高电压与绝缘技术研究。

子直流污闪试验提出:影响污闪电压的特征指数 $a$ 值在0.30~0.33,不同绝缘子的 $a$ 值有一定差异。文[5]提出:直流下 $a$ 值为0.33,交流下则为0.20。文[6]由12种支柱绝缘子的直流污闪试验表明:支柱绝缘子的 $a$ 值为0.32~0.41。重庆大学和东北电力试验研究院根据160kN及以下绝缘子的直流污闪试验提出, $a$ 值在0.225~0.36<sup>[1,7]</sup>。

随着输电线路电压等级的不断提高,大爬距、大吨位绝缘子不断涌现,然而,针对不同结构大吨位绝缘子污闪性能差异的研究目前较少。因此笔者对超、特高压直流输电线路用大吨位瓷和玻璃绝缘子的污闪特性进行人工污秽试验研究,具有一定的理论意义和实际工程应用价值。

## 1 试品、试验装置及方法

试品为标准绝缘子和超、特高压直流输电线路常用的5种典型绝缘子,即XP-160、XZP<sub>1</sub>-300、XZP-300、XZSP-300瓷绝缘子和LXZY-210、FC300P/C195DC(简称FC300)玻璃绝缘子,其基本技术参数及结构示意图见表1和图1。试验串长为7片。

表1 试品绝缘子技术参数

| 型式                    | D/mm | H/mm | L/mm |
|-----------------------|------|------|------|
| XP-160                | 255  | 155  | 305  |
| XZP <sub>1</sub> -300 | 400  | 195  | 635  |
| XZP-300               | 360  | 195  | 545  |
| XZSP-300              | 400  | 195  | 635  |
| LXZY-210              | 320  | 170  | 545  |
| FC300                 | 380  | 195  | 710  |

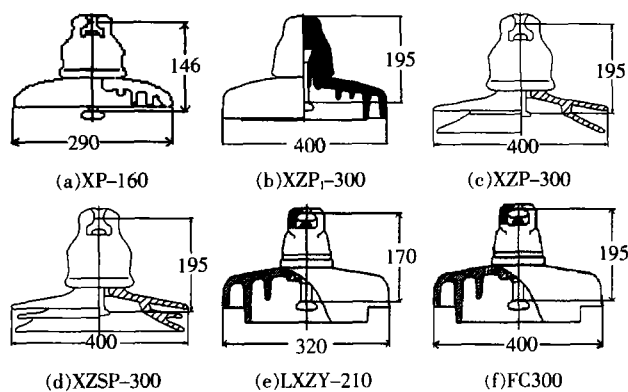
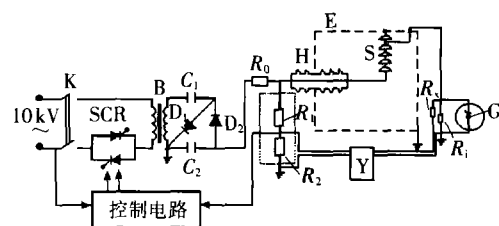


图1 试品绝缘子结构示意图

试验在内径7.8m、高11.6m的大型多功能人工气候室内进行。试验电压由±600kV/0.5A双反馈直流污秽试验电源提供,其泄漏电流0.5A时的动态压降<5%,纹波系数<3%,满足直流污秽试验对电源的要求。试验时的闪络电压采用精度2%的直流电阻分压器测量。试验原理接线图见图2。



K—空气开关 B—10kV/150kV试验变压器 C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub>—倍压整流电容 D<sub>1</sub>、D<sub>2</sub>—高压硅堆 R<sub>0</sub>—限流电阻 R<sub>1</sub>—电阻分压器高压臂 R<sub>2</sub>—电阻分压器低压臂 R<sub>3</sub>—保护隔离电阻 R<sub>4</sub>—2Ω无感电阻 G—保护放电管 H—穿墙高压套管 E—人工气候室 S—试品 Y—示波器

图2 试验原理接线示意图

参照相关试验标准<sup>[8]</sup>,试验方法如下:

**试品染污:**试品染污采用固体涂层法的定量涂刷方式,用NaCl模拟导电物质,用硅藻土模拟不溶性物质。盐密/灰密分别选择0.03/0.18、0.05/0.30、0.08/0.48、0.15/0.90 mg/cm<sup>2</sup>。

**试品布置:**绝缘子串垂直悬挂于人工气候室顶部的电动葫芦上,试品与接地体的最小间距>3.5m,满足“>0.5 m/100 kV”的要求<sup>[9]</sup>。

**试品湿润:**试品湿润采用蒸汽雾。由贴近人工气候室底部周围布置的多个放气孔使雾汽分布均匀,放气孔雾气出口方向与试品绝缘子串轴心线成90°夹角,距离>3.5m,加湿10~15min的时间可使试品表面污秽充分湿润。湿润开始前试品与环境的温差<±2K;试验过程中雾室温度控制在<35℃。

**闪络试验:**盘形悬式绝缘子负极性污闪电压低于正极性<sup>[10]</sup>,因此仅进行负极性试验。绝缘子充分湿润后,采用均匀升压法对试品加压直至绝缘子串闪络。对每种污秽度选择3串试品,每串试品进行4~5次闪络。取与所有闪络电压平均值误差小于7%的试验数据为有效试验数据,且有效试验数据不少于9次。取有效试验数据的平均值为污秽绝缘子(串)的闪络电压,并折算为每片的闪络电压 $U_f$ 。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 不同型式绝缘子污闪特性

根据以上试验方法的人工污秽试验,6种绝缘子串在不同的污秽度下的试验结果见图3。由试验结果得到的对应式(1)的 $A$ 、 $a$ 及拟合相关系数平方和 $R^2$ 见表2。由表2和图3可知:

(1)绝缘子的污闪电压与其爬电距离有关。爬电距离最小的XP-160绝缘子污闪电压最低,而爬电距离最大的FC300绝缘子污闪电压最高。在XP-160、XZP-300和XZSP-300 3种绝缘子中,其爬电距离的关系是 $L_{(XP-160)} < L_{(XZP-300)} < L_{(XZSP-300)}$ ,而其污闪电压也有相同的规律,即 $U_{f(XP-160)} < U_{f(XZP-300)} < U_{f(XZSP-300)}$ ,即

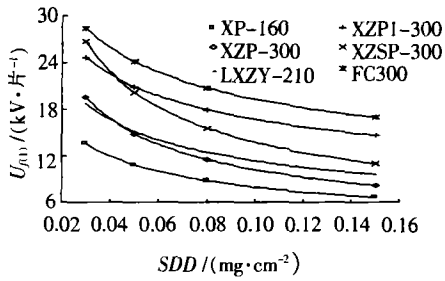


图3 污闪电压与盐密 SDD 的关系

表2 不同型式绝缘子的 A 和 a 值

| 型式                    | A    | a     | R <sup>2</sup> |
|-----------------------|------|-------|----------------|
| XP-160                | 2.88 | 0.443 | 0.968          |
| XZP <sub>1</sub> -300 | 7.90 | 0.325 | 0.920          |
| XZP-300               | 2.95 | 0.540 | 0.990          |
| XZSP-300              | 3.87 | 0.551 | 0.963          |
| LXZY-210              | 4.36 | 0.416 | 0.979          |
| FC300                 | 9.22 | 0.321 | 0.976          |

绝缘子的污闪电压随着爬电距离的增加而升高。

然而污闪电压并不完全取决于爬电距离,与绝缘子的形状和污秽程度也有关。如爬电距离相同的 XZP<sub>1</sub>-300 防雾型绝缘子和 XZSP-300 三伞型绝缘子的污闪电压虽然都较高,但两者在不同污秽度下的污闪电压不同。在 SDD=0.043 mg/cm<sup>2</sup> 时两种绝缘子的污闪电压相同,而 SDD<0.043 mg/cm<sup>2</sup> 时, XZSP-300 绝缘子的污闪电压高于 XZP<sub>1</sub>-300 绝缘子; SDD>0.043 mg/cm<sup>2</sup> 时,则有 XZSP-300 绝缘子的污闪电压小于 XZP<sub>1</sub>-300 绝缘子。

(2)各种型式绝缘子的污闪电压 U<sub>f</sub> 均随盐密 SDD 的增加而降低,但其降低趋势与绝缘子型式有关。表征盐密 SDD 对污闪电压影响的特征指数 a 的大小反映了绝缘子污闪电压随着盐密增加而下降的快慢程度, a 越小, SDD 对污闪电压的影响也就越小。6种绝缘子的 a 值在 0.32~0.55 之间,不同型式绝缘子之间有明显差异。

3种防雾型绝缘子 XZP<sub>1</sub>-300、LXZY-210 和 FC300 的 a 值分别为 0.325、0.416 和 0.321,而两种外伞型绝缘子 XZP-300 和 XZSP-300 分别为 0.540 和 0.551,防雾型绝缘子的 a 值明显小于外伞型,即随着盐密的增加,防雾型绝缘子污闪电压没有外伞型的下降的快。这是因为防雾型绝缘子下表面的深棱型结构使得其下表面不容易被雾汽完全湿润,当下表面完全湿润后上表面的污秽已有流失,且深棱抑制了局部电弧的发展;外伞型绝缘子的上、下表面较易被雾汽完全湿润,绝缘子表面的污秽对污闪电压的影响更明显。XP-160 绝缘子下表面有浅棱,其 a 值介于防雾型和外伞型之间。

(3)A 值与绝缘子材质和结构有关。随着结构高

度 H 和爬电距离 L 的增加, A 增大,如 FC300 绝缘子的 H、L 均大于 LXZY-210 绝缘子,前者的 A 也大于后者。然而 A 与 H、L 没有简单的数学关系,如爬电距离和结构高度相同的 XZP<sub>1</sub>-300 瓷绝缘子和 XZSP-300 瓷绝缘子的 A 值并不相同。

### 2.2 不同型式绝缘子的爬电闪络梯度

污秽绝缘子沿爬电距离的闪络电压梯度 E<sub>c</sub> (kV/cm) 可表示为<sup>[7]</sup>

$$E_c = U_f / L \tag{2}$$

式(2)中, L 为绝缘子的爬电距离, cm。

由式(1)、(2), 可得

$$E_c = \frac{A}{L} \cdot (SDD)^{-a} = E_0 \cdot (SDD)^{-a} \tag{3}$$

式(3)中, E<sub>0</sub>=A/L, 由绝缘子材质和结构决定, 由表 1、2 可得 6 种试品的 E<sub>0</sub> 见表 3。由式(3)和表 3 可得绝缘子沿爬电距离的闪络电压梯度与盐密的关系见图 4。由式(3)可知, E<sub>c</sub> 随盐密 SDD 的变化规律与 U<sub>f</sub> 随 SDD 的变化规律一致。

表3 E<sub>0</sub> 值

| 型式                    | E <sub>0</sub> | 型式       | E <sub>0</sub> |
|-----------------------|----------------|----------|----------------|
| XP-160                | 0.094          | XZSP-300 | 0.061          |
| XZP <sub>1</sub> -300 | 0.124          | LXZY-210 | 0.080          |
| XZP-300               | 0.054          | FC300    | 0.130          |

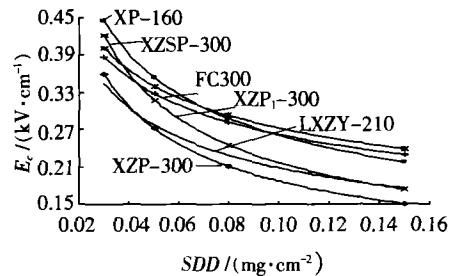


图4 SDD 对不同型式绝缘子爬电闪络梯度的影响

### 2.3 不同型式绝缘子的有效爬电系数

绝缘子的有效爬电系数 K 反映了放电发展过程中爬电距离利用的有效性, 可表示为<sup>[11]</sup>

$$K = E'_c / E_c \tag{4}$$

式(4)中, E'<sub>c</sub> 为非标准绝缘子的爬电闪络梯度, kV/cm; E<sub>c</sub> 为标准绝缘子的爬电闪络梯度, kV/cm, 文中以普通悬式绝缘子 XP-160 为标准绝缘子。由式(3)、(4)可得绝缘子的有效爬电系数与 SDD 关系为

$$K = M \cdot (SDD)^m \tag{5}$$

式(5)中, M 为与绝缘子结构有关的系数; m 为表征 SDD 对有效爬电系数影响的特征指数, 与绝缘子结构和材质等有关。由表 3 中 E<sub>0</sub> 和表 2 中 a 可得不同型式绝缘子的 M、m 值, 见表 4。不同型式绝缘子的 K 与 SDD 的关系见图 5。

表4  $M$  和  $m$  值

| 型式                    | $M$   | $m$    |
|-----------------------|-------|--------|
| XZP <sub>1</sub> -300 | 1.319 | 0.118  |
| XZP-300               | 0.574 | -0.097 |
| XZSP-300              | 0.649 | -0.108 |
| LXZY-210              | 0.851 | 0.027  |
| FC300                 | 1.383 | 0.122  |

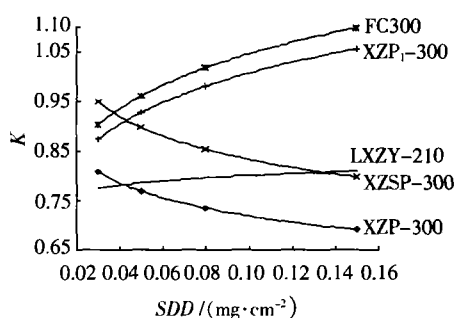


图5 盐密对不同型式绝缘子有效爬电系数的影响

由表4和图5可知:

(1)不同型式绝缘子的有效爬电系数不同。盐密较小时,XZSP-300三伞型绝缘子的 $K$ 值最大;而盐密较大时,FC300防雾型绝缘子的 $K$ 值最大,且其 $K$ 值均大于0.9,即在轻污秽下,XZSP-300绝缘子对爬电距离的利用最好;在重污秽下,FC300绝缘子对爬电距离的利用更好。重污秽下,外伞型绝缘子的伞裙间易发生桥接,从而降低绝缘子的有效爬电系数,而防雾型绝缘子伞下深棱抑制了电弧的发展,从而提高了绝缘子的有效爬电系数。

结构类似的FC300和XZP<sub>1</sub>-300两种防雾型绝缘子,前者的 $K$ 值大于后者,即玻璃绝缘子的爬电距离利用的比瓷绝缘子高。XZSP-300和XZP-300两种外伞型绝缘子,在盐密较小时,电弧是紧贴绝缘表面发展的,有效爬电系数都比较高,三伞型绝缘子多一个小伞,电弧越过小伞发展比双伞型更难,故其爬电有效系数较大。随着盐密增加,三伞型绝缘子的 $K$ 值反而小于双伞型,这是因为在较大盐密时,绝缘子表面泄漏电流较大,三伞型绝缘子的伞裙间更易被电弧短接。

材质相同、结构类似的绝缘子 $K$ 值差异也较大。如FC300比LXZY-210大,主要是其下表面的深棱较LXZY-210的深棱更高,且多一条深棱,更好地抑制了局部电弧的发展。

(2)绝缘子的有效爬电系数 $K$ 与 $SDD$ 有关,不同型式绝缘子 $K$ 值随着 $SDD$ 的增加而变化的规律不同,与绝缘子的结构和材质有关。3种防雾型绝缘子的特征指数 $m$ 都为正数,即随着 $SDD$ 增加;有效

爬电系数增加;而外伞型绝缘子的特征指数 $m$ 都为负数,即污秽越重,钟罩型绝缘子对爬电距离的利用越优于外伞型绝缘子。

### 3 结论

(1)绝缘子污闪电压的盐密影响特征指数与结构和材质有关,笔者试验的6种绝缘子的 $a$ 值在0.32~0.55。

(2)在污秽较严重时,外伞型绝缘子的伞裙间易发生弧络,而防雾型绝缘子的伞下深棱能有效抑制电弧的发展,即在较重污秽下,防雾型绝缘子的污闪性能优于外伞型绝缘子,且对爬电距离的利用较好。

(3)玻璃绝缘子具有比同样结构瓷绝缘子更高的爬电闪络梯度和有效爬电系数。

### 参考文献:

- [1] 顾乐观, 孙才新. 电力系统的污秽绝缘 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1990.
- [2] LAMPE W, HÖGLUND T, NELLIS C, et al. Long-term Tests of HVDC Insulators under Natural Pollution Conditions at the Big Eddy Test Center [J]. IEEE Trans Power Delivery, 1989, 4(1): 248-258.
- [3] 宿志一. ±500 kV 葛南直流输电设备外绝缘运行概况分析[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 57-60.
- [4] 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.
- [5] SUNDARARAJAN R. Effect of Insulator Profiles on DC Flashover Voltage under Polluted Conditions [J]. IEEE Trans Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(1): 124-132.
- [6] NAITO K, MATSUOKA R, SAKANISHI K. Investigation for the Insulation Performance of the Insulator Covered with Ice [J]. IEEE Trans Power Delivery, 1991, 6(3): 1634-1640.
- [7] BAKER A C, ZAFFANELLA L E. Contamination Performance of HVDC Station Post Insulators [J]. IEEE Trans Power Delivery, 1988, 3(4): 1968-1975.
- [8] IEC 61245-1993. Artificial Pollution Tests on High-voltage Insulators to be Used on D. C. Systems[S]. 1993.
- [9] VLASTOS A E, FEIJU Y. Clean Fog Rapid Procedure Test of Artificially and Naturally Polluted HVDC Porcelain Barrel Insulator [J]. IEEE Trans Power Delivery, 1991, 6(4): 1791-1797.
- [10] 蒋兴良, 张志劲, 胡建林, 等. 高海拔下不同伞形结构750 kV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.
- [11] GB/T 16434. 高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准[S]. 1996.