

# 布置方式对直流绝缘子串 人工污秽闪络特性的影响

胡建林, 蒋兴良, 张志劲, 孙才新, 舒立春

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

## Influence of Suspension Mode on Artificial Pollution Flashover Performance of DC Insulator Strings

HU Jian-lin, JIANG Xing-liang, ZHANG Zhi-jin, SUN Cai-xin, SHU Li-chun

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

**ABSTRACT:** Suspension modes of DC insulator strings influence the pollution flashover voltage, whereas few researches are carried out to explore the influence of suspension modes on pollution flashover performance of DC insulator strings. Taking two kinds of typical DC porcelain insulators, i.e., XZP-210 and XZP-300, as test specimens and by means of test in the artificial fog chamber, the authors investigate the DC negative polarity pollution flashover performance of single link suspension insulator string (I-shape), double link suspension insulator string (II-shape) and insulator string arranged in V-shape respectively. Test results show that the suspension modes influence the pollution flashover voltage; under different pollution degrees, the DC pollution flashover voltage of V-shape insulator string is from 14.5% to 25.9% higher than that of I-shape insulator string; the DC pollution flashover voltage of II-shape insulator string is from 4.2% to 9.0% lower than that of I-shape insulator string; along with the increase of pollution degree, the increase percentage of pollution flashover voltage of V-shape arrangement and the decrease percentage of pollution flashover voltage of II-shape arrangement in comparison with I-shape arrangement are enlarged.

**KEY WORDS:** suspension modes; artificial pollution; DC insulator string; flashover performance; high voltage and insulation engineering

**摘要:** 直流绝缘子串布置方式对污闪电压有影响, 以 2 种典型直流瓷绝缘子(XZP-210 和 XZP-300)为试品, 在人工雾

室中通过试验研究了悬垂单串布置(I型)、悬垂双串布置(II型)和V型布置绝缘子串的直流负极性污闪特性, 分析了布置方式对负极性污闪电压的影响。结果表明: 直流绝缘子串布置方式对污闪电压有影响; 在不同污秽程度下, V型布置时直流污闪电压比I型布置时高14.5%~25.9%, II型布置则比I型布置低4.2%~9.0%; 且随着污秽程度的增加, V型布置相对于I型布置的污闪电压提高的百分数和II型布置相对于I型布置降低的百分数均增大。

**关键词:** 布置方式; 人工污秽; 直流绝缘子串; 闪络特性; 高电压与绝缘技术

## 0 引言

超特高压直流输电线路绝缘子串有垂直安装的悬垂串、水平安装的耐张串和倾斜安装的V型串或倒V型串以及国外部分线路采用的Y型串。运行经验和试验研究结果表明<sup>[1-5]</sup>: 安装方式对绝缘子串污闪特性有影响, 其主要表现为2个方面: ①积污特性有差异; ②沿染污绝缘子串放电发展的过程有差异。因此, 不同布置方式下绝缘子串的污闪或耐受电压也有差异。不同安装方式下积污特性的差异可根据运行线路积污特性的测量得到, 放电发展过程和闪络电压的差异可通过人工污秽试验得到。

文献[1]由喷浆法和盐雾法的污闪特性试验得知: 普通悬式绝缘子串在V型布置时的最低交流闪络电压比垂直布置时高15%~30%。文献[6]表明, 普通悬式瓷绝缘子(XP-70)和玻璃绝缘子(LXP-160), 在安装夹角为53°时, V型布置时的交流污闪电压较

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90221026)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(NSFC)(90221026).

悬垂布置(单串)时约高11%~16%;而悬垂双串(II型串)的交流污闪电压则较悬垂单串(I型串)降低5%~15%。文献[7]的试验结果表明,轴间距为500mm时,II型串的交流污闪电压较I型串降低4%~11%,且随着间距的减小,降低的幅度增大。文献[8]认为,II型串的交流污闪电压与I型串没有明显差异。

由上述分析可知,不同安装方式下绝缘子串污秽直流闪络特性的研究较少,没有相关文献报道。因此,为给云广±800 kV 特高压直流输电线路的外绝缘设计提供参考,本文在人工雾室通过试验研究了悬垂单串(I型串)、悬垂双串(II型串)和V型串的负极性直流污秽闪络特性(以下污闪电压均为负极性),分析了布置方式对绝缘子串人工污秽直流闪络特性的影响。

## 1 试验装置和试品及试验方法

### 1.1 试验装置

试验是在直径7.8 m、高11.6 m的圆柱形人工雾室中完成的,试验电压由±600 kV /0.5A 直流试验电源装置提供,其动态压降小于5%,纹波系数小于3%,满足IEC标准对直流污秽试验电源的要求。试验原理接线如图1所示,闪络电压采用精度为0.5%的直流电阻分压器测量。

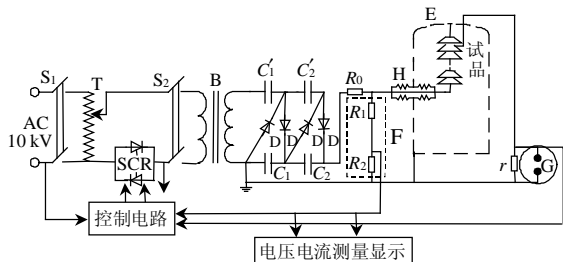


图1 污秽试验原理接线

$S_1$ —前级开关,  $S_2$ —后级开关, T—调压器, B—试验变压器,  $C_1$ 、 $C'_1$ 、 $C_2$ 、 $C'_2$ —倍压电容, D—高压硅堆, SCR—可控硅元件,  $R_0$ —限流电阻,  $r$ —分流器电阻, H—穿墙套管, E—人工雾室, F—电阻分压器( $R_1$ 为电阻分压器高压臂电阻,  $R_2$ 为电阻分压器低压臂电阻), G为保护放电管。

图1 Schematic diagram of pollution test circuit

### 1.2 试品

试品为XZP-210和XZP-300直流绝缘子,其基本技术参数和结构如表1和图2所示。

### 1.3 试验方法

参考IEC、IEEE、国际大电网会议(CIGRE)及表1 试品绝缘子的参数

| 型号      | 盘径 $D$ /mm | 结构高度 $H$ /mm | 爬电距离 $L$ /mm | 结构形状  |
|---------|------------|--------------|--------------|-------|
| XZP-210 | 320        | 170          | 545          | 图2(a) |
| XZP-300 | 400        | 195          | 635          | 图2(b) |

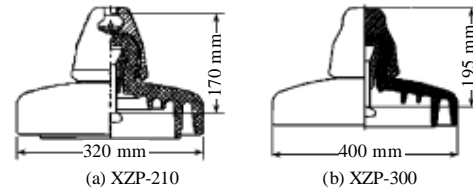


图2 试品绝缘子结构

Fig. 2 Configurations of test insulators

中国国家标准<sup>[9-12]</sup>, 本文采用的试验方法如下:

(1) 试品清洗。试验前,清洗并除去绝缘子表面的污物且让其在实验室自然环境下阴干。

(2) 试品染污。染污采用固体涂层法,染污方式为定量涂刷。用氯化钠模拟导电物质,用硅藻土模拟不溶性物质。染污后试品自然阴干24h后即进行试验。

(3) 试品湿润。试品湿润采用蒸汽雾。蒸汽雾由1.5 t/h 锅炉产生,通过沿人工雾室底部周围均匀布置的多个放气孔使雾室产生均匀分布的雾,放气孔离试品绝缘子串轴心的距离大于3.5 m,放气孔出口方向与试品绝缘子串轴心线成90°夹角,输入人工雾室蒸汽雾的速率约为0.05 kg/(h·m<sup>3</sup>)。湿润开始时试品与雾室环境温度之差小于±2℃,试验过程中雾室温度控制在35℃以下,如果温度过高,采用制冷系统加以控制。

(4) 闪络电压。本文试验采用均匀升压法,即待试品绝缘子表面污秽层充分湿润,其表面形成水膜以致边缘即将滴水时,立即采用均匀升压法对试品绝缘子施加电压进行闪络试验。每串染污试品闪络4~5次,取其中与平均值误差低于10%的3次试验结果;在同一个污秽度下,选择7~8串绝缘子进行重复试验,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该污秽度下绝缘子串的闪络电压。

(5) 污秽程度。本文对4种不同污秽度进行了试验研究,所选择的盐密( $\rho_{ESDD}$ )和灰密( $\rho_{NSDD}$ )如表2所示,盐密与灰密之比取1:6。根据人工雾室的尺寸,试验时串长为15片。

表2 试验研究的盐密和灰密

Tab. 2 The equivalent salt deposit density and non-soluble material deposit density in experiments

| $\rho_{ESDD}$ /(mg/cm <sup>2</sup> ) | 0.03 | 0.05 | 0.10 | 0.20 |
|--------------------------------------|------|------|------|------|
| $\rho_{NSDD}$ /(mg/cm <sup>2</sup> ) | 0.18 | 0.30 | 0.60 | 1.20 |

## 2 试验结果及分析

### 2.1 试验结果

国内外V型绝缘子串的夹角为70°~110°,大多

数为90°。文献[1]研究表明,即使绝缘子串倾斜5°,其污闪电压都有较明显的提高,20°时效果最好,在20°~90°之间没有明显变化。本文根据国内外V型串布置方式的经验,选择V型串夹角为90°。根据运行经验并参考文献[6-7],本文的试验研究中II型串布置时的轴心间距选择为600mm。

文献[13-14]提出:串长小于40片时,直流绝缘子串的污闪电压与串长呈线性关系。本文根据污闪电压与串长的线性关系取平均每片绝缘子的闪络电压 $U_f$ 作为分析目标。表3为本文试验得到的平均每片绝缘子的直流污闪电压 $U_f$ 与盐密 $\rho_{ESDD}$ 的关系,由表3可知,试验结果的标准偏差小于7%。

表3 不同布置方式时  
平均每片绝缘子的直流污闪电压

Tab. 3 DC pollution flashover voltage per insulator under different configuration mode of insulator string

| 布置方式 | 绝缘子型式   | $\rho_{ESDD}=0.03\text{mg}/\text{cm}^2$ |     | $\rho_{ESDD}=0.05\text{mg}/\text{cm}^2$ |     | $\rho_{ESDD}=0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ |     | $\rho_{ESDD}=0.2\text{mg}/\text{cm}^2$ |     |
|------|---------|---|-----|---|-----|--|-----|--|-----|
|      |         | $U_f/\text{kV}$                         | s/% | $U_f/\text{kV}$                         | s/% | $U_f/\text{kV}$                        | s/% | $U_f/\text{kV}$                        | s/% |
| I型   | XZP-210 | 17.3                                    | 6.5 | 14.4                                    | 4.3 | 11.1                                   | 6.8 | 8.9                                    | 3.7 |
|      | XZP-300 | 21.4                                    | 5.3 | 18.0                                    | 2.9 | 14.5                                   | 3.9 | 10.8                                   | 4.4 |
| II型  | XZP-210 | 16.5                                    | 3.2 | 13.5                                    | 3.3 | 10.2                                   | 4.9 | 8.1                                    | 5.9 |
|      | XZP-300 | 20.5                                    | 4.8 | 17.1                                    | 4.1 | 13.4                                   | 3.7 | 9.9                                    | 6.2 |
| V型   | XZP-210 | 19.8                                    | 7.0 | 16.8                                    | 5.3 | 13.5                                   | 3.8 | 11.2                                   | 4.6 |
|      | XZP-300 | 24.6                                    | 6.3 | 20.9                                    | 3.2 | 17.5                                   | 2.8 | 13.6                                   | 5.1 |

2.2 污闪特性分析

由表3可知,不同布置方式下平均每片绝缘子直流污闪电压 $U_f$ 与盐密 $\rho_{ESDD}$ 的关系如图3、4所示。由表2和图3、4可知:

(1) V型布置时, XZP-210和XZP-300绝缘子串的 $U_f$ 均高于I型布置,如在盐密 $\rho_{ESDD}=0.10\text{mg}/\text{cm}^2$ 时, V型布置时XZP-210的 $U_f$ 为13.5kV, I型布置时则为11.1kV。V型布置比I型布置高2.4kV, 即高21.6%。造成这种差异的原因是: ①V型布置时, 起始于钢脚附近的局部电弧紧贴下表面向前发展,

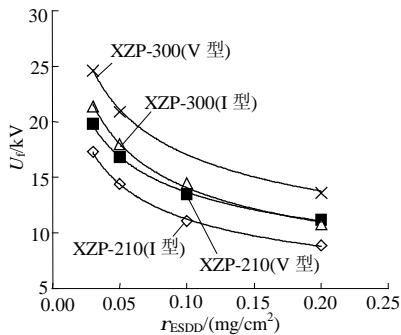


图3 I型与V型布置时 $U_f$ 与 $\rho_{ESDD}$ 的关系

Fig. 3 The relation between  $U_f$  and  $\rho_{ESDD}$  for I-shape configuration and V-shape configuration

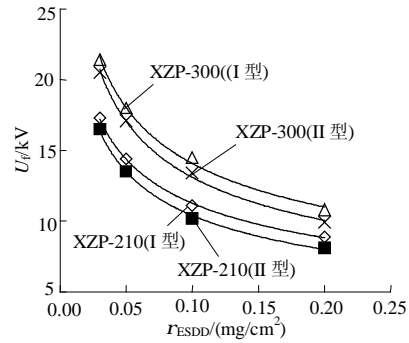


图4 I型和II型布置时 $U_f$ 与 $\rho_{ESDD}$ 的关系

Fig. 4 The relation between  $U_f$  and  $\rho_{ESDD}$  for I-shape configuration and II-shape configuration

泄漏距离得到充分利用, 放电产生的电离粒子易消散, 阻碍电弧的发展; ②垂直布置时, 起始于钢脚附近的局部电弧所产生的游离气体被局限在绝缘子片间的空间内, 临近闪络时形成的高导电通道促进了闪络的发展。

(2) I型布置时, XZP-210和XZP-300绝缘子串的 $U_f$ 均高于II型布置, 如XZP-300绝缘子在 $\rho_{ESDD}=0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 时, I型布置的 $U_f$ 为14.5kV, II型布置时 $U_f$ 则为13.4kV, II型比I型降低1.1kV, 即降低7.6%。其主要原因是: ①由于相邻串的影响, II型布置时绝缘子串电场分布发生畸变, 局部电弧更容易产生; ②提供了更多的闪络路径, 闪络概率增大。

(3) 由文献[15-19]可知, 绝缘子人工污秽直流污闪电压 $U_f$ 与 $\rho_{ESDD}$ 之间的关系可表示为

$$U_f = A \rho_{ESDD}^{-a} \tag{1}$$

式中:  $A$ 是与绝缘子结构和布置方式有关的常数;  $a$ 为表征 $\rho_{ESDD}$ 对 $U_f$ 影响的特征指数。将表3、图3、图4的试验结果按式(1)拟合, 得不同布置方式下XZP-210和XZP-300的 $A$ 、 $a$ 以及相关系数平方 $R^2$ 如表4所示。

表4 由试验结果按式(1)拟合得到的 $A$ 和 $a$   
Tab. 4 The constant  $A$  and special exponent  $a$  gained by regression according to formula (1)

| 布置方式 | 绝缘子型号   | $A$  | $a$   | $R^2$ |
|------|---------|------|-------|-------|
| V型   | XZP-300 | 8.42 | 0.306 | 0.95  |
|      | XZP-210 | 3.83 | 0.301 | 0.97  |
| I型   | XZP-300 | 6.20 | 0.356 | 0.93  |
|      | XZP-210 | 5.00 | 0.353 | 0.95  |
| II型  | XZP-300 | 5.44 | 0.381 | 0.96  |
|      | XZP-210 | 4.36 | 0.378 | 0.97  |

由表4可知, 对于XZP-210和XZP-300绝缘子: ① $A$ 值与布置方式有关, V型串高于I型串, I型串高于II型串; ② $a$ 与布置方式有关, II型串高

于 I 型串, I 型串高于 V 型串, 即 II 型布置时,  $U_f$  随  $\rho_{ESDD}$  增加而降低的趋势最明显, I 串次之, V 串最小。

由表 3、图 3、4 得不同布置方式下污闪电压随布置方式变化而降低的百分数如图 5、6 和表 5、6 所示。

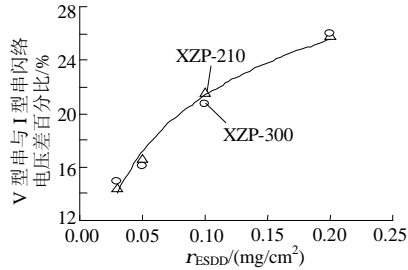


图 5 V 型布置  $U_f$  相对于 I 型布置升高的百分数与  $\rho_{ESDD}$  的关系

Fig. 5 The relation between increase percentage of  $U_f$  of V-shape than that of I-shape and  $\rho_{ESDD}$

表 5 V 型布置的  $U_f$  相对于 I 型布置升高的百分数

Tab. 5 Increase percentage of  $U_f$  of V-shape than that of I-shape

| 绝缘子型式   | $\rho_{ESDD}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$ |      |      |      |
|---------|---------------------------------------|------|------|------|
|         | 0.03                                  | 0.05 | 0.10 | 0.20 |
| XZP-210 | 14.5                                  | 16.7 | 21.6 | 25.8 |
| XZP-300 | 15.0                                  | 16.1 | 20.7 | 25.9 |

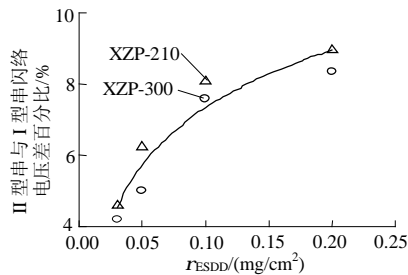


图 6 II 型布置的  $U_f$  相对于 I 型布置降低的百分数与  $\rho_{ESDD}$  的关系

Fig. 6 The relation between reduction percentage of  $U_f$  of II-shape than that of I-shape and  $\rho_{ESDD}$

表 6 II 串  $U_f$  相对于 I 串降低的百分数

Tab. 6 Reduction percentage of  $U_f$  of II-shape than that of I-shape

| 绝缘子型式   | $\rho_{ESDD}/(\text{mg}/\text{cm}^2)$ |      |     |     |
|---------|---------------------------------------|------|-----|-----|
|         | 0.03                                  | 0.05 | 0.1 | 0.2 |
| XZP-210 | 4.6                                   | 6.3  | 8.1 | 9.0 |
| XZP-300 | 4.2                                   | 5.0  | 7.6 | 8.3 |

由图 5、6 和表 5、6 可知: ①不同  $\rho_{ESDD}$  下, V 型布置的  $U_f$  比 I 型布置高 14.5%~25.9%, II 型布置比 I 型布置降低 4.2%~9.0%; ②随着  $\rho_{ESDD}$  增加, V 型布置的  $U_f$  相对于 I 型布置提高的百分比和 II 型布置相对于 I 型布置降低的百分比均逐渐增大。

### 3 结论

(1) 布置方式对直流绝缘子串人工污秽闪络电压有影响。在不同  $\rho_{ESDD}$  下 XZP-210 和 XZP-300 绝缘子串, 采用 V 型布置时的  $U_f$  比 I 型布置时高 14.5%~25.9%; 采用 II 型布置的  $U_f$  则比 I 型串布置时低 4.2%~9.0%。

(2) 随着  $\rho_{ESDD}$  的增加, V 型布置时  $U_f$  相对于 I 型布置时所提高的百分数与 II 型布置时  $U_f$  相对于 I 型串布置时所降低的百分数均逐渐增大。

(3) 根据人工污秽试验结果, 选择直流输电线路外绝缘时应考虑布置方式的影响。

### 参考文献

- 张仁豫. 绝缘污秽放电[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1994.
- 宿志一.  $\pm 500$  kV 葛南直流输电设备外绝缘运行概况及分析[J]. 电网技术, 2001, 25(2): 57-60.  
Su Zhiyi. Operation and analysis of external insulation of  $\pm 500$  kV Ge-Nan transmission equipments[J]. Power System Technology, 2001, 25(2): 57-60(in Chinese).
- 周浩, 余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 1-8.  
Zhou Hao, Yu Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-8(in Chinese).
- 刘兆林. 1996 年末华东电网雾闪故障分析及对策[J]. 电网技术, 1997, 21(8): 63-66.  
Liu Zhaolin. Analysis of fog flashover faults in east China power system at the end of 1996 and its countermeasures[J]. Power System Technology, 1997, 21(8): 63-66(in Chinese).
- 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, 59.  
Tang Cunyan, Liang Xidong. A brief introduction to service performance and natural contamination test on abroad DC polymeric insulators[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 50-53, 59(in Chinese).
- 李震宇, 崔吉峰, 周远翔, 等. 绝缘子安装结构对污闪电压的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 52-55, 80.  
Li Zhenyu, Cui Jifeng, Zhou Yuanxiang, et al. Influence of insulator installation form on its pollution flashover voltage[J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 52-55, 80(in Chinese).
- Sklenicka V, Vokalek J, Paul C. Pollution performance of double insulator assemblies[C]. The Proceeding of 11th High Voltage Engineering Symposium, London, 1999, 4: 100-102.
- 南方电网技术研究中心, 清华大学深圳研究生院.  $\pm 800$  kV 云广特高压直流输电工程平原及高海拔地区线路污秽外绝缘应用研究[R]. 广州: 南方电网技术研究中心, 2005.
- IEC/TR2 61245(1993-10), Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on DC system[S].
- IEEE Std.4-1995, IEEE standard techniques for high-voltage testing [S].
- CIGRE WG'S-33.04. Artificial pollution testing of HVDC insulators: analysis of factors influencing performance[J]. Electra, 1992, (140): 99-113.

(下转第 20 页 continued on page 20)