

# 特高压交直流污秽试验电源特性试验研究

丁 薇<sup>1</sup>, 张福增<sup>2</sup>, 马 仪<sup>1</sup>, 王 科<sup>1</sup>, 徐肖伟<sup>1</sup>

(1. 云南电力试验研究院, 昆明 650217; 2. 南方电网科学研究院, 广州 510623)

**摘要:** 到目前为止,已有大量文献介绍了各类绝缘子的人工污秽试验结果,少有文献涉及交直流人工污秽试验电源的特性试验研究。特高压交直流污秽试验电源电压高,电源特性实现难度大,因此需要对电源特性进行试验研究,探索交直流污秽电源的参数特性及其规律。昆明特高压实验室污秽实验室开展了一系列特高压交直流污秽电源的特性试验研究。研究成果一方面为人工污秽试验的理论研究和工程应用提供依据,同时为待建或已建交直流污秽试验电源的特性试验研究提供参考。文中说明了污秽交直流试验电源的工作原理和性能要求,详细介绍了特高压交直流人工污秽电源特性试验的方法与内容。

**关键词:** 特高压; 交直流试验电源; 短路电流; 污秽试验

**中图分类号:** TM852 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)03-0001-05

## Test Research on Power Source Characteristics of UHV AC and DC Pollution Test

DING Wei<sup>1</sup>, ZHANG Fu-zeng<sup>2</sup>, MA Yi<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, XU Xiao-wei<sup>1</sup>

(1. Yunnan Electric Power Test & Research Institute (Group) Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510623, China)

**Abstract:** So far, many literatures have described the artificial pollution test results of various type of insulators, few literatures involving the test researches on the AC and DC power source used in artificial pollution test. The characteristics of UHV AC and DC power are hard to achieve, therefore it is necessary to carry on some studies to explore the characteristics and rules of the power. National Engineering Laboratory for UHV Engineering Technology (Kunming) has done a series of UHV AC and DC pollution tests to research the power source. The results of this research provide a basis for the theoretical study and engineering application of artificial pollution tests, as well as give the reference to the building DC and AC pollution power source. This paper explains working principle and performance requirements of the UHV AC and DC power source, and introduces the methods of the tests for UHV AC and DC power source.

**Key words:** UHV; the AC and DC test power source; short-circuit current; pollution test

## 0 引言

随着中国西电东送战略的实施和特高压技术的应用,已有特高压输电工程投入运行。由于电压等级更高,输送容量更大,一旦发生大范围污闪事故,其后果将更为严重。同时,由于高海拔地区空气密度较低,高海拔地区的污秽外绝缘问题更加值得关注。因此,非常有必要研究解决在高海拔条件下特高压输电工程的污秽外绝缘问题<sup>[1-2]</sup>。

为深入研究实际高海拔条件下特高压交直流输

电工程全尺寸绝缘子的闪络特性及机理,特高压工程技术(昆明)国家工程实验室(海拔 2 100 m)建设了特高压交直流污秽试验室。污秽实验室拥有开展特高压交直流人工污秽试验的电源系统,能够用以开展高海拔条件下特高压交、直流污秽外绝缘特性的研究试验,为工程建设奠定良好技术基础<sup>[3-4]</sup>。

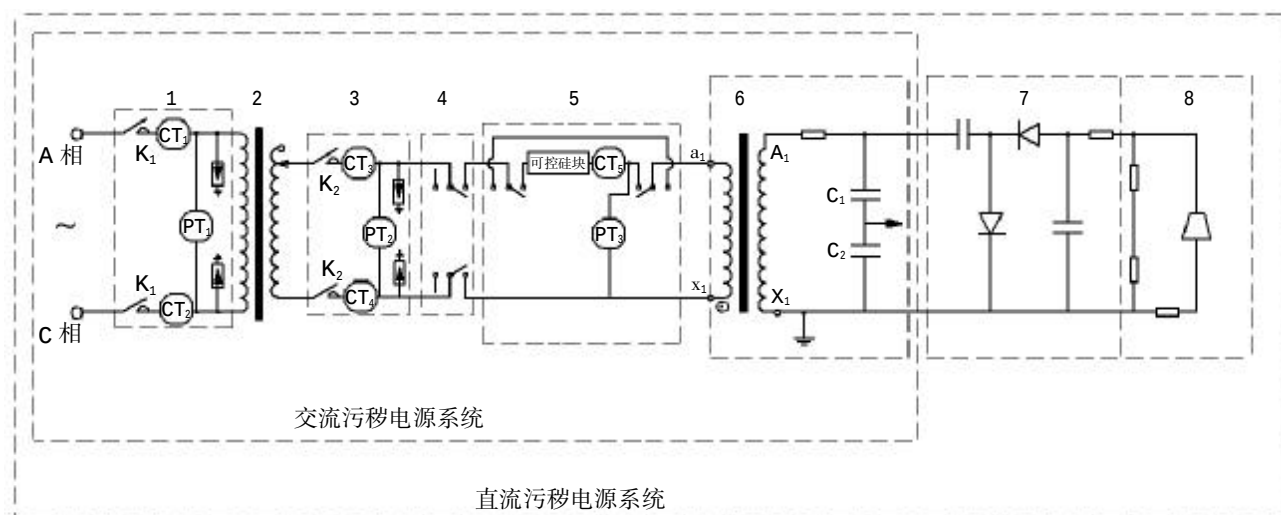
到目前为止,大量的文献介绍了各类绝缘子的人工污秽试验结果,少有文献涉及交直流人工污秽试验电源的特性试验研究。特高压交直流污秽试验电源电压高,电源特性实现难度大,因此更需要对电源参数、特性进行试验研究,探索交直流污秽电源的

参数特性及其规律,一方面可以更好的理解人工污秽试验及其试验结果的内涵,为人工污秽试验的理论研究和工程应用提供根据,同时为待建或已建交直流污秽试验电源的特性试验研究提供参考。文中说明了污秽实验室交直流电源设备的结构和工作原理,详细介绍了特高压交直流人工污秽电源设备特性试验和达到的技术参数。

## 1 交流污秽电源系统原理及特性试验

### 1.1 交流污秽电源系统结构

交流污秽电源装置由 4 800 kVA/800 kV 高压试验变压器、柱式调压器、800 kV 交流电容、交流保护电阻、控制系统和操作台及计算机测量系统、高压开关柜等部件组成,结构见图 1。



1—前级开关;2—柱式调压器;3—后级开关;4—补偿投切开关;5—动态补偿装置;6—变压器;7—整流装置;8—测量装置及试品。

图 1 原理接线图

Fig. 1 Wiring diagram of the system

### 1.2 交流污秽电源系统工作原理

交流污秽电源系统通过调节调压器的输出电压,改变污秽试验变压器的低压输入电压,从而实现特定交流高压的输出。交流污秽试验变压器铁心为两柱口字型铁心,A柱与X柱分别套装高压线圈和低压线圈;两柱低压线圈分别引出,在外部实现串并联。串联时变压器额定输出电压 400 kV,并联时额定电压 800 kV。

### 1.3 交流污秽电源特性试验

#### 1.3.1 保护电阻选择和短路电流测试

在特高压绝缘子闪络试验中会产生较大的短路电流,为避免短路电流对变压器和调压器造成损害,须限制产生的电流不大于 60 A。增加系统回路阻抗是减小短路电流最直接的方法<sup>[5]</sup>。但过大的回路阻抗又会使电容器充电电流减小,降低电源的坚挺特性,对直流试验中动态压降特性造成影响。另外,交流污秽试验 IEC 和国家标准<sup>[6-7]</sup>中对交流污秽电源要求:当爬电比距为  $16 \leq L_s \leq 25 \text{ mm/kV}$  时,最小短路电流在 6~15 A 之间变化。该交流污秽电源要求最小短路电流为 15 A。因此,实验室进行了在不同保护电阻下的绝缘子短路电流测试试验。根据测试结果,选择合适的保护电阻、确定交流污秽电源系统

的电压工作范围<sup>[8-9]</sup>。

1) 系统保护电阻为 2 kΩ,变压器低压绕组串联和并联时,系统短路电流情况见表 1、2。

表 1 低压绕组串联系统短路电流

Tab. 1 Short-current of the system when low-voltage winding is in series

| 绝缘子片数 | 闪络电压有效值/kV | 短路电流有效值/A | 实测回路阻抗/kΩ |
|-------|------------|-----------|-----------|
| 1     | 17.6       | 5.34      | 3.296     |
| 2     | 30.2       | 8.68      | 3.477     |
| 3     | 40.3       | 11.35     | 3.550     |
| 4     | 51.0       | 14.21     | 3.590     |
| 5     | 85.3       | 24.89     | 3.428     |
| 6     | 90.3       | 28.01     | 3.224     |
| 7     | 95.4       | 28.57     | 3.338     |
| 8     | 122.5      | 36.63     | 3.343     |
| 9     | 128.8      | 38.05     | 3.384     |
| 10    | 143.6      | 42.29     | 3.396     |
| 11    | 142.5      | 43.71     | 3.260     |
| 12    | 163.7      | 47.95     | 3.415     |
| 13    | 196.0      | 59.26     | 3.307     |
| 15    | 227.0      | 68.80     | 3.299     |

表 2 低压绕组并联系统短路电流

Tab. 2 Short-current of the system when low-voltage winding is in parallel

| 绝缘子片数 | 闪络电压有效值/kV | 短路电流有效值/A | 实测回路阻抗 /kΩ |
|-------|------------|-----------|------------|
| 1     | 63.0       | 10.54     | 5.979      |
| 2     | 120.0      | 18.32     | 6.551      |
| 3     | 88.0       | 13.81     | 6.373      |
| 4     | 137.0      | 20.39     | 6.720      |
| 5     | 162.0      | 24.63     | 6.578      |
| 6     | 210.0      | 30.87     | 6.803      |
| 7     | 265.0      | 37.94     | 6.984      |
| 8     | 311.0      | 42.61     | 7.299      |
| 9     | 326.0      | 45.44     | 7.175      |
| 10    | 427.0      | 62.41     | 6.842      |

通过试验数据可以得出,在保护电阻为 2 kΩ 条件下,系统电压在变压器低压绕组串联和并联分别为 227 kV 和 427 kV 时,短路电流超过 60 A。由于短路电流值过大限制了变压器试验电压不能达到试验要求的串联时 400 kV 并联时 800 kV,因此必须增加保护电阻以减小短路电流。

2)保护电阻为 10 kΩ 时,系统短路电流情况见表 3、4。

表 3 低压绕组并联系统短路电流

Tab. 3 Short-current of the system when low-voltage winding is in series

| 绝缘子片数 | 闪络电压有效值/kV | 短路电流有效值/A | 实测回路阻抗 /kΩ |
|-------|------------|-----------|------------|
| 3     | 139.0      | 13.37     | 10.399     |
| 3     | 160.0      | 15.16     | 10.506     |
| 4     | 190.0      | 17.75     | 10.704     |
| 5     | 268.0      | 24.89     | 10.766     |
| 6     | 287.0      | 25.88     | 11.088     |
| 7     | 328.0      | 28.57     | 11.480     |
| 8     | 394.0      | 33.52     | 11.754     |

由试验数据可以得出,当保护电阻增加为 10 kΩ 后,在短路电流不大于 60 A 的情况下,闪络电压在变压器并联和串联时可分别达到 800 kV 和 400 kV,满足试验电压要求。因此,确定交流污秽系统保护电阻为 10 kΩ。

选择 10 kΩ 保护电阻,交流系统试验电压范围见表 5。

由表 5 可见交流污秽试验电源工作电压在 160~800 kV 之间,满足人工污秽试验的要求。

### 1.3.2 系统电阻比电感测试

在调压器处于 100%、75%、50%、25%、0% 的位

表 4 低压绕组并联系统短路电流

Tab. 4 Short-current of the system when low-voltage winding is in parallel

| 绝缘子片数 | 闪络电压有效值/kV | 短路电流有效值/A | 实测回路阻抗/kΩ |
|-------|------------|-----------|-----------|
| 2     | 69.0       | 5.01      | 13.771    |
| 4     | 158.0      | 11.44     | 13.812    |
| 5     | 210.0      | 15.23     | 13.673    |
| 6     | 264.0      | 18.60     | 14.194    |
| 8     | 375.0      | 27.16     | 13.809    |
| 10    | 464.0      | 32.89     | 14.110    |
| 12    | 578.0      | 33.59     | 17.206    |
| 14    | 639.0      | 35.08     | 18.217    |
| 16    | 703.0      | 36.07     | 19.491    |
| 18    | 774.0      | 41.30     | 18.740    |
| 19    | 800.0      | 42.52     | 18.543    |

表 5 交流污秽试验电源工作范围

Tab. 5 Operating range of the AC pollution test power

| 变压器低压侧 | 保护电阻/kΩ | 电压范围/kV | 短路电流/A      |
|--------|---------|---------|-------------|
| 并联     | 10      | 210~800 | 15.23~42.52 |
| 串联     | 10      | 160~394 | 15.16~33.52 |

置上分别测量交流电源系统电阻比电抗值。用示波器测量系统的电压、电流波形,并得到电压电流波形的相位差,从而得出对应的  $R/X$  [10]。

变压器低压绕组串联、并联时的  $R/X$  见表 6、7。

表 6 低压绕组并联  $R/X$ Tab. 6  $R/X$  with low-voltage winding paralleling

| 调压器位置 | 电压峰值/V | $R/X$ 值 |
|-------|--------|---------|
| 100%  | 279.6  | 1.001   |
| 75%   | 279.4  | 0.970   |
| 50%   | 279.0  | 1.172   |
| 25%   | 279.6  | 0.970   |
| 0%    | 279.0  | 0.658   |

表 7 低压绕组串联  $R/X$ Tab. 7  $R/X$  with low-voltage winding series

| 调压器位置 | 电压峰值/V | $R/X$ 值 |
|-------|--------|---------|
| 100%  | 283.25 | 1.172   |
| 75%   | 274.00 | 1.333   |
| 50%   | 276.00 | 1.290   |
| 25%   | 276.00 | 1.135   |
| 0%    | 278.45 | 1.210   |

试验结果见表 8,电源系统满足 IEC 60507—1991 标准要求电阻电抗比( $R/X$ ) $\geq 0.1$ 。

表 8 交流污秽电源 R/X 范围

Tab. 8 The range of R/X

| 变压器低压侧 | 保护电阻/k $\Omega$ | R/X 值       |
|--------|-----------------|-------------|
| 并联     | 10              | 0.658~1.172 |
| 串联     | 10              | 1.135~1.333 |

## 2 直流污秽电源系统原理及特性试验

### 2.1 直流污秽电源系统结构

直流污秽电源装置由 4 800 kVA/800 kV 高压试验变压器、柱式调压器、高压硅堆、晶闸管调压装置、滤波电容器和倍压电容器、1 000 kV 直流阻容分压器、800 kV 交流电容分压器、直流保护电阻、交流保护电阻、控制系统和操作台及计算机测量系统、高压开关柜等部件组成,结构见图 1。

### 2.2 直流污秽电源系统工作原理

直流污秽电源系统输出的直流高压是由变压器输出的交流高压通过倍压整流产生。由于直流污秽试验要求污秽试验中电源电压降落小于 5%, 过冲小于 8%<sup>[11-12]</sup>, 系统在主变压器低压侧加装晶闸管调压装置。

一定负载下试验电源的输出电压降落取决于电源电压的高低、电源内阻抗、电容量以及泄漏电流的大小。泄漏电流越大, 在一定时间内电容上的电荷放掉越多, 若电容量足够大, 能在脉冲型泄漏电流的一个脉冲当中供给足够的电荷使电容电量不致下降过多, 则试品两端的电压保持稳定; 反之, 则试品两端的电压有较大下降。可见, 电压降落与电源内阻抗和电容量有关, 仅有稳定的交流电源还不能保证稳定的直流电源。如能使电源对电容的充电量随该电容负载放电速度的变化而变, 即放电慢时每周期中的充电量减少, 放电快时充电量相应增加, 则电源装置的输出电压也能保持相对稳定。基于这个原理, 设备通过采集直流阻容分压器的电压信号和试品接地线的电流信号, 构成电压、电流双反馈系统, 利用晶闸管调压装置的电压补偿功能, 来及时补偿当出现大的泄漏电流时滤波电容的电荷量损失, 起到稳压作用<sup>[13-16]</sup>。

### 2.3 直流污秽电源特性试验

按照 IEC 61245 对有关试验回路要求: 耐受试验中(重污秽下泄漏电流可超过 1 A)出现的相对电压降不应超过 10%; 同时满足输出直流 500 mA、持续时间 0.5 s 的负载电流下, 试品上电压降小于 5%, 电压过冲小于 8%<sup>[17]</sup>。

进行直流污秽试验时, 要保证试验电压的降落和过冲满足要求, 控制设备必须具有极高的控制精

度和响应速度, 实验室通过对直流电源系统反复调试, 最终通过污秽试验验证了直流污秽电源系统电流电压符合要求<sup>[18]</sup>。

#### 2.3.1 试验准备

1) 试品涂污: 固体层法, 污秽为高岭土、盐和水混合物;

2) 试品分为两组: 一组用 50 片 530 kN 玻璃绝缘子, 盐密 0.4 mg/cm<sup>2</sup>、灰密 1.0 mg/cm<sup>2</sup>; 另一组用 55 片 210 kN 瓷绝缘子, 盐密 0.4 mg/cm<sup>2</sup>、灰密 1.0 mg/cm<sup>2</sup><sup>[19-20]</sup>。

3) 试验条件: 温度: 22.5 ℃, 湿度: 18.3%, 气压: 795 hPa。

#### 2.3.2 试验波形

1) 用 50 片 530 kN 玻璃绝缘子, 加压至 360 kV, 检测电压电流波形, 电压电流波形见图 2。由图 2 可得最高电弧电流 500 mA, 并持续 700 ms, 起弧后电压降为起弧前电压的 1.83%, 起弧后电压补偿伴随轻微的过冲现象, 过冲 8%。

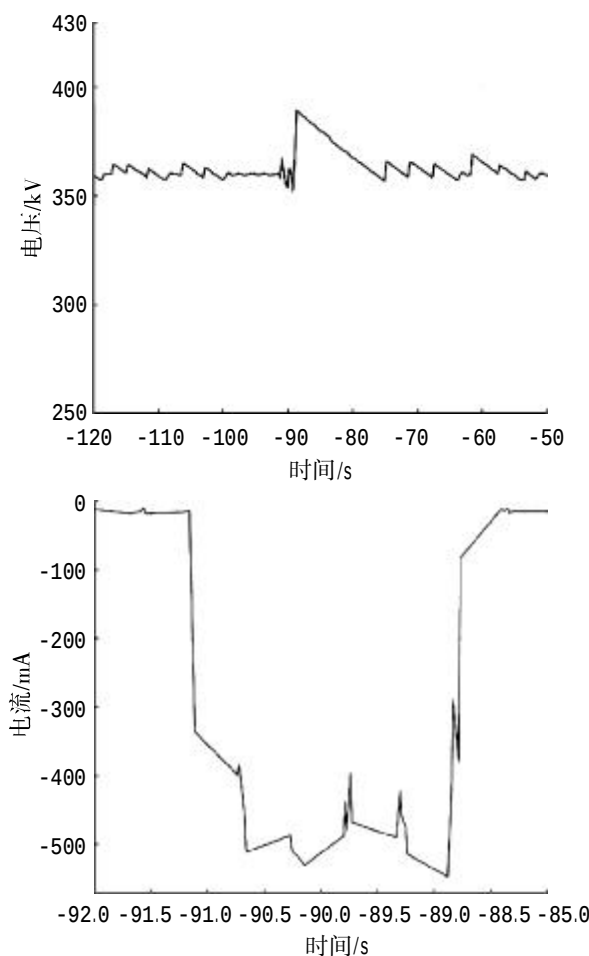


图 2 试验电压 360 kV 动态补偿特性

Fig. 2 Dynamic compensation feature at test voltage 360 kV

2) 用 55 片 210 kN 瓷绝缘子, 加压至 320 kV, 检测电压电流波形, 电压电流波形见图 3。由图 3 可

得最高电弧电流 500 mA, 并持续 500 ms, 起弧后电压降为起弧前电压的 3.12%, 起弧后电压补偿有轻微的过冲现象, 过冲为 2.8%。

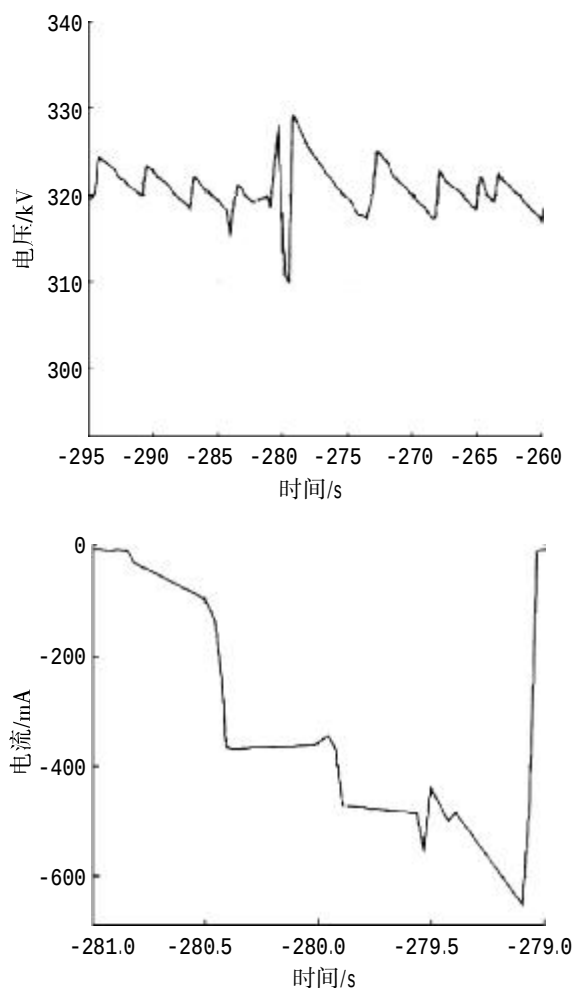


图3 试验电压 320kV 动态补偿特性

Fig. 3 Dynamic compensation feature at test voltage 320 kV

### 3 结论

1)通过实际试验,昆明特高压实验室交流污秽电源系统选择 10 kΩ 保护电阻,系统短路电流满足要求。系统串联时电压工作范围为 210~800 kV,并联时电压工作范围为 160~394 kV。

2)实验室直流污秽电源在泄漏电流 500 mA、持续 700 ms 的情况下电压降落 1.83%,过冲 8%,满足 IEC 和国家标准要求。

3)该特高压人工污秽实验室特高压交直流污秽电源参数达到 IEC 标准,能够用以开展高海拔条件下特高压交直流污秽外绝缘特性的研究。

### 参考文献:

[1] 舒印彪,张文亮.特高压输电若干关键技术研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(7):1-6.

SHU Yin-biao,ZHANG Wen-liang. Research of key

technologies for UHV transmission[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(7):1-6.

[2] 关志成,王国利.中国特高压输电工程及相关的关键技术[J]. 南方电网技术研究,2005,1(6):12-18.

GUAN Zhi-cheng, WANG Guo-li. The projects and related key techniques of ultra high voltage transmission in China [J]. China Southern Power Grid Technology Research, 2005, 1(6): 12-18.

[3] 中国新时代国际工程公司,中南电力设计院,广东省电力设计研究院.中国南方电网昆明特高压试验研究基地初步设计报告[R]. 广州:广东电力设计院,2008.

[4] 王国利,陆国庆,李锐海,等.特高压工程技术(昆明)国家工程实验室的建设[J]. 高电压技术,2007,33(5):1553-1558.

WANG Guo-li, LU Guo-qing, LI Rui-hai, et al. Construction of national engineering laboratory for UHV engineering technology (Kunming) [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(5):1553-1558.

[5] 张仁豫.高电压试验技术[M]. 北京:清华大学出版社,1982.

[6] IEC 60507—1991.Artificial pollution tests on high - voltage insulators to be used on AC systems [S].

[7] GB/T 4585—2004. 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S].

GB/T 4585—2004.Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on AC systems[S].

[8] 姜虹云,李锐海.高海拔地区交流人工污秽特性试验研究[J]. 云南电力技术,2001(1):13-16.

JIANG Hong-yun, LI Rui-hai. The research on characteristics of AC artificial pollution test [J]. Yunnan Electric Power, 2001(1):13-16.

[9] 张文亮,张国兵.特高压交流试验电源特点探讨及比较[J]. 中国电机工程学报,2007,27(4):1-4.

ZHANG Wen-liang, ZHANG Guo-bing. Discussion and comparison of characteristics of AC -testing supply used for UHVAC[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(4):1-4.

[10] RIZK F M, 伍企舜.交流电源参数对污秽绝缘子闪络特性的影响[J]. 电瓷避雷器,1986(5):26-36.

RIZK F M, WU Qi-shun. The effect of AC power parameters on polluted insulators flashover characteristics [J]. Insulators and Surge Arresters, 1986(5):26-36.

[11] GB/T 22707—2008. 直流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S].

GB/T 22707—2008. Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on DC systems[S].

[12] IEC 61245—1993.Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on DC systems[S].

[13] 张建辉,顾乐观,孙才新.可控硅控制直流污秽试验电源的探讨[J]. 高电压技术,1985,11(4):35-39.

(下转第 11 页)