

# 试验程序差异对绝缘子污秽测量结果影响

武 剑<sup>1</sup> 张志劲<sup>2</sup> 冉军德<sup>1</sup> 陈 杭<sup>1</sup> 郑 凯<sup>1</sup> 王海飞<sup>1</sup> 朱俊宇<sup>2</sup>

(1. 国网重庆市电力公司检修分公司, 重庆 400039;

2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

**摘 要:** 染污绝缘子闪络威胁电网安全可靠运行, 长期以来掌握运行中绝缘子积污特性是电力部门重要的工作之一, 相关规程也规定了绝缘子自然积污测试方法, 但测试过程差异对测量结果的影响并不清楚。这里采用瓷和复合绝缘子, 模拟不同等级污秽, 采用不同测试方法对盐密和灰密进行了测量, 并对各种方法的试验结果进行了对比分析, 结果表明: 采用污秽溶解静置 24 h、去离子水用量 300 ml、专用取样布擦拭法、每片绝缘子取样布使用 6 张的方法可使测量结果更准确。研究结果可为绝缘子自然积污测试技术提供技术参考。

**关键词:** 绝缘子; 盐密; 灰密; 污秽测试

**Abstract:** Surface flashover of polluted insulators is threatening the safe and reliable operation of power grid. The research of the contamination deposited characteristic on insulators of transmission line has been the one of the most important works of power grid departments for a long time. Some relevant regulations also provide the natural contamination test methods for insulators. However, the effects of the difference of test procedures on the measurement results have not been discussed yet. Porcelain insulators and composite insulators are adopted as the sample, the different pollution levels are simulated, and the salt deposit density (SDD) and non-soluble deposit density (NSDD) are measured using different kinds of test methods. Then the test results of different methods are compared. The research results show that, it is recommended to let the pollution solution stand for 24 hours, use 300 ml deionized water, wrap the pollution by special sampling cloth, and use 6 pieces of clothes for each insulator unit to make sure the accuracy of test data. The proposed research can provide a technical reference for the natural contamination test technology of insulators.

**Key words:** insulator; salt deposit density (SDD); non-soluble deposit density (NSDD); pollution test

中图分类号: TM85 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)04-0038-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.04.008

## 0 引 言

目前中国的特高压输电工程仍然在飞速发展的进程中<sup>[1]</sup>。为满足社会经济对电力的需求, 数条特高压直流输电线路在建或者已投入运行<sup>[2]</sup>。电网覆盖范围的扩大, 电压等级的提升, 意味着电力系统的安全稳定运行额外重要。因此在防污方面仍需加强巩固, 多采用科学安全的方法来得到外绝缘设备的积污特性, 从而指导防污工作开展<sup>[1-2]</sup>。

国内外科研机构在绝缘子积污特性方面开展了相关的研究工作<sup>[3]</sup>。目前表征绝缘子污秽度的特征量有等值盐密、表面污层电导率和泄漏电流等。等值盐密可以直观地反映绝缘子的污秽程度, 而且

测量简单, 因此在工程应用中得到了广泛的使用<sup>[4]</sup>。此外, 绝缘子表面灰密对绝缘子的污闪电压也有一定影响, 已有研究表明闪络电压与盐密、灰密均成幂函数关系, 并且二者对闪络电压的影响是独立的<sup>[5-6]</sup>, 因此在开展输电线路污秽测试时, 需要测量其灰密值, 从而对污秽等级划分提供参考。

还有研究表明, 输电线路外绝缘污秽所含化学成分复杂<sup>[7]</sup>, 包括多种可溶物、难溶物以及导电物质和惰性物质, 因此有相关学者建议在开展污秽度测试时, 需对典型杆塔区域的污秽化学成分进行测量, 并且根据不同化学成分对应的闪络电压关系, 对杆塔的绝缘水平进行换算, 再对污秽等级的划分进行修正<sup>[8]</sup>。

目前电力相关机构在防污闪以及外绝缘设计方面取得了一定的效果, 但是污闪事故时有发生<sup>[9]</sup>。

科技项目: 国家电网公司科技项目资助(2016 渝电科技 35 号, SGTYHT/14-JS-188)

长期以来掌握运行中绝缘子积污特性是电力部门重要的工作之一,相关规程也规定了绝缘子自然积污测试方法,但测试过程差异对测量结果的影响并不清楚。为了更科学地指导防污工作的开展,使绝缘子自然积污测试更加简便高效、准确易行,下面以瓷和玻璃绝缘子为对象,模拟不同等级污秽,采用不同测试方法对盐密和灰密进行测量,分析清洗方法、用水量、污液静置时间等因素对测量结果的影响,并对各种方法的试验结果进行对比分析。研究结果可直接运用于工程实际,对输配电外绝缘防污工作的开展具有指导意义。

## 1 污秽测量方法、试品及测量仪器

### 1.1 污秽测量方法

根据相关规程,盐密及灰密测量流程如图1所示。

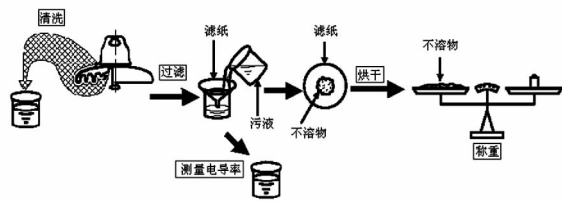


图1 盐密及灰密测量流程图

利用测量过滤后的污液电导率,可以得到绝缘子的等值盐密为

$$D_{ESD} = \frac{S_a V}{A} \quad (1)$$

式中:  $D_{ESD}$  为等值盐密,  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ;  $V$  为污液体积,  $\text{cm}^3$ ;  $A$  为绝缘子表面积,  $\text{cm}^2$ ;  $S_a$  为污液的盐度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 可由式(2)求得:

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

式中  $\sigma_{20}$  为换算到水温  $20^\circ\text{C}$  时污液的电导率,  $\text{S}/\text{m}$ 。

各温度下的污液电导率  $\sigma_\theta$  与  $\sigma_{20}$  的关系为

$$\sigma_{20} = \sigma_\theta [1 - b(\theta - 20)] \quad (3)$$

式中:  $\theta$  为测量污液电导率时对应的污液温度,  $^\circ\text{C}$ ;  $b$  为污液温度的系数。 $b$  与  $\theta$  有如下关系:

$$b = -3.2 \times 10^{-8} \theta^3 + 1.032 \times 10^{-5} \theta^2 - 8.272 \times 10^{-4} \theta + 3.544 \times 10^{-2} \quad (4)$$

将滤纸过滤后的不溶物进行烘干、称重,则求得灰密为

$$D_{NSD} = \frac{W}{A} \quad (5)$$

式中:  $D_{NSD}$  为灰密,  $\text{mg}/\text{cm}^2$ ;  $W$  为烘干的剩余不溶物质量,  $\text{mg}$ , 其值等于  $W_1 - W_2$ , 其中  $W_1$  为烘干后纸巾试样、不溶污秽物与烘干后过滤纸质量总和,  $W_2$  为烘干后纸巾试样与过滤纸质量总和。

运行部门采用上述相同测量方法进行污秽测量,但在实际操作中,结合各自生产情况和经验摸索,对测量流程有不同的理解,主要体现在:

#### 1) 清洗

污秽如何清洗并没有明确规定,现有污秽清洗一般有刷子清洗法、脱脂棉清洗法、专用取样布擦拭法、湿巾擦拭法等,但各种清洗方法对污秽测量结果的影响并不清楚,且专用取样布和湿巾使用数量也未说明。

#### 2) 清洗的水用量

污秽的清洗和溶解可采用电导率小于  $10 \mu\text{S}/\text{cm}$  的去离子水。去离子水用量通常根据绝缘子表面积大小来确定,表面积越大的绝缘子需要的水量越多。目前相关标准给出了满足工程应用的用水量推荐值,然而不同区域的污秽成分有差异,难溶及微溶物的含量不同,所以用水量的多少必然会对污秽度的测试结果造成影响,同时用水量越多则过滤所需时间越长,影响效率。因此选择合理的用水量十分重要,需要开展相关研究以确定。

#### 3) 污秽溶解静置时间

污液过滤前静置的时间没明确规定,一般为  $4 \sim 24 \text{ h}$ 。不同区域自然积污中污秽成分各异,而各种污秽成分溶解是需要一定时间的,为保证污液中各导电物质能充分溶解以反映真实的盐密,污秽溶解静置时间的确定非常重要。静置时间短,导致测量结果偏小,不能真实反映实际污秽度;静置时间长,则效率低,浪费人力、财力。

### 1.2 试品

试验中选取普通悬式瓷绝缘子(XP-160)和复合绝缘子(FXBW-10/70)为研究对象,其基本技术参数如表1所示, $H$ 为结构高度, $D$ 为盘径, $L$ 为泄漏距离, $A$ 为表面积。

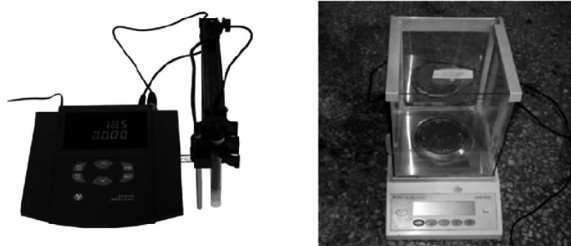
表1 绝缘子主要参数

| 编号    | 绝缘子的型号     | $H/\text{mm}$ | $D/\text{mm}$ | $L/\text{mm}$ | $A/\text{cm}^2$ |
|-------|------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| No. 1 | XP-160     | 155           | 255           | 350           | 1 691           |
| No. 2 | FXBW-10/70 | 415           | 130/100       | 600           | 1 467           |

### 1.3 测量仪器

试验所采用的实验装置主要有配制污秽的  $500 \text{ ml}$  烧杯、毛细刷子、漏斗、温度计。电导率测量采用

型号为 DD-810E 的电导率仪,其具体参数为电极常数  $\times(1 \sim 3\ 000)\ \mu\text{S}/\text{cm}$ ,测量温度范围为  $0 \sim 99.9^\circ\text{C}$ ;分辨率可达到  $0.001\ \mu\text{S}/\text{cm}$ , $0.1^\circ\text{C}$ ,污秽质量测量采用型号为 BT-224S 电子天平,其读数精度可达  $0.1\ \text{mg}$ ,如图 2 所示。



(a) 电导率仪 (a) 电子天平  
图 2 测量仪器

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同清洗方法下绝缘子积污结果与分析

人工配制几种不同比例的氯化钠与硅藻土污液,利用浸污法对两种试品绝缘子进行染污,然后利用不同的测量方法对比同一染污情况下同种试品绝缘子的盐密和灰密,以及同种测量方法下不同试品绝缘子的盐密和灰密进行测量,测量结果如表 3 至表 6 所示。

表 3 不同浓度污秽下盐密/灰密测量结果 1

单位:  $\text{mg}/\text{cm}^2$

| 方法    | XP-160 |       | FXBW-10/70 |       |
|-------|--------|-------|------------|-------|
|       | SDD    | NSDD  | SDD        | NSDD  |
| 传统刷洗法 | 0.031  | 0.175 | 0.071      | 0.449 |
| 专用试纸  | 0.027  | 0.174 | 0.068      | 0.427 |
| 湿巾 1  | 0.023  | 0.149 | 0.064      | 0.414 |
| 湿巾 2  | 0.023  | 0.146 | 0.063      | 0.409 |
| 脱脂棉法  | 0.019  | 0.133 | 0.065      | 0.376 |

注:污液配制为水 30 L、NaCl 350 g、硅藻土 1 200 g

表 4 不同浓度污秽下盐密/灰密测量结果 2

单位:  $\text{mg}/\text{cm}^2$

| 方法    | XP-160 |       | FXBW-10/70 |       |
|-------|--------|-------|------------|-------|
|       | SDD    | NSDD  | SDD        | NSDD  |
| 传统刷洗法 | 0.043  | 0.141 | 0.139      | 0.388 |
| 专用试纸  | 0.038  | 0.131 | 0.136      | 0.360 |
| 湿巾 1  | 0.039  | 0.112 | 0.124      | 0.357 |
| 湿巾 2  | 0.036  | 0.108 | 0.102      | 0.316 |
| 脱脂棉法  | 0.030  | 0.108 | 0.093      | 0.3   |

注:污液配制为水 30 L、NaCl 700 g、硅藻土 1 200 g

表 5 不同浓度污秽下盐密/灰密测量结果 3

单位:  $\text{mg}/\text{cm}^2$

| 方法    | XP-160 |       | FXBW-10/70 |       |
|-------|--------|-------|------------|-------|
|       | SDD    | NSDD  | SDD        | NSDD  |
| 传统刷洗法 | 0.076  | 0.352 | 0.249      | 0.730 |
| 专用试纸  | 0.075  | 0.330 | 0.229      | 0.708 |
| 湿巾 1  | 0.069  | 0.252 | 0.190      | 0.678 |
| 湿巾 2  | 0.068  | 0.253 | 0.210      | 0.684 |
| 脱脂棉法  | 0.062  | 0.238 | 0.192      | 0.588 |

注:污液配制为水 30 L、NaCl 1 500 g、硅藻土 2 000 g

表 6 不同浓度污秽下盐密/灰密测量结果 4

单位:  $\text{mg}/\text{cm}^2$

| 方法    | XP-160 |       | FXBW-10/70 |       |
|-------|--------|-------|------------|-------|
|       | SDD    | NSDD  | SDD        | NSDD  |
| 传统刷洗法 | 0.157  | 0.400 | 0.403      | 0.775 |
| 专用试纸  | 0.152  | 0.373 | 0.388      | 0.753 |
| 湿巾 1  | 0.151  | 0.353 | 0.330      | 0.690 |
| 湿巾 2  | 0.148  | 0.350 | 0.311      | 0.688 |
| 脱脂棉法  | 0.133  | 0.317 | 0.281      | 0.650 |

注:污液配制为水 30 L、NaCl 2 000 g、硅藻土 3 000 g

由以上测试结果可知:采用不同擦拭方法,对污秽测量结果有一定影响,5种擦拭方式中,不管是瓷绝缘子还是复合绝缘子,由于传统方法清洗污秽时,可以比较彻底地清洗绝缘子表面,所以测量的结果最大,专用试纸次之,其次湿巾,最小的是脱脂棉法。这可能是由于擦洗绝缘子表面时,不同擦拭方式对污秽处理存在差异导致的,而湿巾可能含有其他化学成分也会对数据稍有干扰。因此,考虑现场操作的便利性,建议采用专用试纸收集污秽。

考虑到专业试纸可能对污秽量具有饱和性,对于各种污秽程度的绝缘子,合理采用专用试纸片数以保证污秽测量结果的准确性非常重要。项目组开展了不同浓度的污秽情况下,使用不同的片数时对盐密、灰密测试结果对比分析,测量结果如表 7、表 8 所示。

表 7 不同试纸片数下盐密灰密测量结果 1

单位:  $\text{mg}/\text{cm}^2$

| 专用试纸片数 | XP-160  |       | FXBW-10/70 |       |
|--------|---------|-------|------------|-------|
|        | SDD     | NSDD  | SDD        | NSDD  |
| 1      | 0.016 5 | 0.122 | 0.058 1    | 0.319 |
| 2      | 0.018 9 | 0.124 | 0.063 3    | 0.321 |
| 3      | 0.019 8 | 0.129 | 0.064 8    | 0.323 |
| 4      | 0.020 0 | 0.130 | 0.065 0    | 0.324 |

注:污液配制为水 30 L、NaCl 350 g、硅藻土 1 200 g

表8 不同试纸片数下盐密灰密测量结果2

单位: mg/cm<sup>2</sup>

| 专用试纸片数 | XP-160  |       | FXBW-10/70 |       |
|--------|---------|-------|------------|-------|
|        | SDD     | NSDD  | SDD        | NSDD  |
| 1      | 0.052 3 | 0.256 | 0.157 7    | 0.645 |
| 2      | 0.059 4 | 0.271 | 0.160 4    | 0.711 |
| 3      | 0.062 1 | 0.286 | 0.170 7    | 0.718 |
| 4      | 0.062 8 | 0.288 | 0.170 9    | 0.720 |

注: 污液配制为水 30 L、NaCl 1 500 g、硅藻土 2 000 g

由以上测试结果可知: 采用不同片数试纸擦拭时, 对污秽测量影响结果明显, 且污秽越严重时, 差异越明显。综合测试结果以及现场积污情况, 建议试纸用量为上、下表面各 3 片。

### 2.2 不同去离子水用量下积污测试结果与分析

实际测量中, 各研究单位对洗刷并溶解绝缘子表面污秽物所采用的去离子水量一般按表 9 进行选择。

表9 绝缘子表面积与盐密测量用水量的关系

| 面积<br>$A_x / \text{cm}^2$ | $\leq 1\ 500$ | $1\ 500 < A_x \leq 2\ 000$ | $2\ 000 < A_x \leq 2\ 500$ | $2\ 500 < A_x \leq 3\ 000$ |
|---------------------------|---------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 用水量<br>$Q_x / \text{ml}$  | 300           | 400                        | 500                        | 600                        |

根据表 9 中的建议确定用水量, 可基本保证绝缘子表面洗刷的污秽能充分溶解。然而目前该用水量的确定仅仅满足了按照工程经验, 且不同污秽区域的污秽成分有差异, 难溶及微溶污秽物质的含量不同, 所以用水量的多少必然会对污秽度的测试结果和效率造成影响。

为研究用水量对污秽测试的影响, 开展了相关试验, 试验过程中用所推荐的专用试纸法测量污秽度, 试纸用量为上、下表面各 3 片, 试验结果如表 10、表 11 所示。

表10 不同用水量下盐密/灰密测量结果1

单位: mg/cm<sup>2</sup>

| 用水量 /ml | XP-160 |       | FXBW-10/70 |       |
|---------|--------|-------|------------|-------|
|         | SDD    | NSDD  | SDD        | NSDD  |
| 300     | 0.035  | 0.153 | 0.135      | 0.367 |
| 400     | 0.038  | 0.165 | 0.139      | 0.360 |
| 500     | 0.036  | 0.176 | 0.142      | 0.372 |

注: 污液配置制为水 30 L、NaCl 700 g、硅藻土 1 200 g

由表中数据可得, 用水量对污秽度的测量影响十分有限, 随着用水量的增大, 盐密和灰密测量值变化不明显, 且没有明显的规律。这可能是因为实验室配

制的人工污液中只含有氯化钠一种导电成分, 而且浸污过程中不同绝缘子表面实际污秽量有一定的误差。

表11 不同用水量下盐密/灰密测量结果2

单位: mg/cm<sup>2</sup>

| 用水量 /ml | XP-160 |       | FXBW-10/70 |       |
|---------|--------|-------|------------|-------|
|         | SDD    | NSDD  | SDD        | NSDD  |
| 300     | 0.072  | 0.314 | 0.248      | 0.735 |
| 400     | 0.075  | 0.330 | 0.239      | 0.728 |
| 500     | 0.080  | 0.328 | 0.242      | 0.698 |

注: 污液配制为水 30 L、NaCl 1 500 g、硅藻土 2 000 g

输电线路绝缘子污秽中含有微溶成分硫酸钙, 其所占的百分比则可达 20% ~ 60%。常温下硫酸钙溶解度有 2 g/L, 不考虑饱和, 硫酸钙对等值盐密的贡献最多达到氯化钠的 0.48<sup>[7]</sup>。假设某重污秽地区的实际盐密值为 0.2 mg/cm<sup>2</sup>, 且污秽量的 80% 为硫酸钙, 则按照普通瓷绝缘子面积换算, 可得污秽中硫酸钙的含量约为 0.46 g, 足以被 300 ml 的水溶解。

此外, 实验中发现 300 ml 的水能够完全浸泡擦拭污秽后的试纸, 可保证试验顺利开展和试验结果的精度, 且绝大多数绝缘子上、下表面积小于 1 500 cm<sup>2</sup>, 综上可量, 建议去离子水量取 300 ml。

### 2.3 污液不同静置时间下积污测试结果与分析

实际测量中, 通常将绝缘子污秽溶液搅拌静置一段时间, 使可溶物充分溶解, 从而准确得到等值盐密值。运行环境下绝缘子表面含有大量的硫酸钙等不溶物。此时静置时间长短会对其溶解产生影响, 从而影响测量结果。

表12 不同污液静置时间下现场绝缘子盐密测量结果

单位: mg/cm<sup>2</sup>

| 污液静置时间/h | 绝缘子位置 |       |       |
|----------|-------|-------|-------|
|          | 1/3   | 2/3   | 3/3   |
| 1        | 0.061 | 0.050 | 0.043 |
| 2        | 0.065 | 0.053 | 0.044 |
| 4        | 0.066 | 0.054 | 0.045 |
| 6        | 0.067 | 0.056 | 0.047 |
| 8        | 0.068 | 0.056 | 0.047 |
| 10       | 0.069 | 0.058 | 0.048 |
| 12       | 0.071 | 0.059 | 0.049 |
| 20       | 0.072 | 0.060 | 0.049 |
| 22       | 0.072 | 0.061 | 0.049 |
| 24       | 0.072 | 0.061 | 0.049 |

注: 如 2/3 2 表示从接地端往高压端数第 2 片, 3 表示该试验绝缘子串片数

以 ±800 kV 天中线某杆塔的 XP-70 绝缘子自然积污试验串为例,研究其表面污秽擦拭样品浸泡在去离子水中的污液静置时间对污秽度测试结果的影响,试验结果如表 12 所示。

由表中数据可得,不同静置时间下测得污液的盐密值有一定的差异,且随着静置时间的增加,测量到的盐密值有增大趋势,但是在一定时间后会趋近于一个稳定值。测量数据表明,当污液静置 20~24 h 后盐密测得值趋于稳定,意味着污秽中的微溶物也得到了充分溶解。因此建议在专用试纸浸泡 24 h 后再进行污秽度测试。

### 3 结 论

1) 不同擦拭方法对污秽测量结果有一定影响。5 种擦拭方式中,传统方法得到的测量结果最大,专用试纸次之,其次湿巾,最小的是脱脂棉法。考虑现场操作的便利性,建议采用专用试纸收集污秽,并且建议试纸用量为上、下表面各 3 片。

2) 污液静置时间越长,测得到的盐密和灰密值有一定的增加趋势,但是在 24 h 左右趋于平缓。考虑到时间成本,建议在专用试纸浸泡 24 h 后再进行污秽度测试。

3) 去离子水的用量对所用绝缘子试品污秽度的测试结果影响不大。采用专业试纸法测量污秽度

(上接第 37 页)

#### 参考文献

[1] 郑晓冬,郇能灵,杨光亮,等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(7): 10-14.

[2] 谢绍宇,王秀丽,王锡凡. 交直流混联系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(7): 10-16.

[3] Aik D L H, Andersson G. Power Stability Analysis of Multi-infeed HVDC Systems [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(3): 923-931.

[4] IEEE PES Transmission and Distribution Committee. IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short-circuit Capacities [R]. New York: 1997.

时建议去离子水用量取 300 ml。

#### 参考文献

[1] 董曼玲,姚帅,郭磊,等. 天山一中州特高压直流输电工程投运后河南电网主变直流偏磁分析及抑制[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 611-618.

[2] 张仁豫. 绝缘污秽放电(第一版) [M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.

[3] 蒋兴良,舒立春,孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[4] 滕云,田阳,李辉,等. 绝缘子等值盐密的组合预测模型[J]. 高电压技术, 2016, 39(6): 1488-1493.

[5] 黄青丹,张东东,宋浩永,等. 基于等值盐密修正的绝缘子闪络电压计算[J]. 2016, 42(6): 1907-1913.

[6] 张志劲,刘小欢,蒋兴良,等. 污秽不均匀度对 XP-160 绝缘子串交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 280-286.

[7] 张志劲,张东东,刘小欢,等. 污秽成分对 LXY4-160 绝缘子串交流闪络特性的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 298-305.

[8] 魏旭,周志成,赵晨龙,等. 可溶盐成分对绝缘子表面污秽度评估的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3109-3115.

[9] 张志劲,蒋兴良,孙才新. 污秽绝缘子闪络特性研究现状及展望[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 35-40.

(收稿日期: 2017-04-10)

[5] 李少华,刘涛,苏匀,等. ±800 kV 特高压直流输电系统解锁/闭锁研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 84-87.

[6] 阴玉婷,杨明玉,郑永康. 智能变电站网络化二次系统及其在线监测研究综述[J]. 电气自动化, 2014, 36(1): 1-4.

#### 作者简介:

禹佳(1983),本科、高级工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

刘俊杰(1989),本科、助理工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

孙文(1980),本科、高级工程师,研究方向为特高压直流输电技术。

(收稿日期: 2017-04-16)