

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.01.006

高电导率雾对染污瓷绝缘子闪络特性的影响

王铭民¹, 周志成², 王凯琳³, 赵晨龙³, 王黎明³

(1. 江苏省电力公司, 南京 211000; 2. 江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 211103;
3. 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 在常规的固态缓慢积污与高导电性的液态污秽快速积污两种基本积污形式之外, 在内陆地区, 由于人类活动(例如秸秆焚烧、燃放爆竹等)或自然因素(山火、酸雨等)引起的高电导率、高温度的天气条件, 在固体积污的基础上叠加快速积污过程, 更容易造成污闪。文中通过对XP-70型号的瓷绝缘子进行人工污秽试验, 研究闪络电压与雾电导率之间的关系, 指出高电导率雾对污闪发展过程具有促进作用, 并对比清洁雾条件下的污层受潮过程, 系统地研究在污层等值盐密相同时, 高电导率雾条件下闪络电压的变化特征, 建立了雾电导率与等值盐密之间的等效关系。考虑不同地区高电导率、高湿度天气条件出现的情况与规律, 需要对污闪预警模型进行修正, 根据折算后所等效的等值盐密值, 结合其与闪络电压之间的关系, 得到更灵敏有效的预警机制, 降低污闪发生的概率。

关键词: 染污瓷绝缘子; 闪络特性; 高电导率雾; 盐密

Analysis on Flashover Performance of Polluted Porcelain Insulators in High Conductivity Fog Environment

WANG Mingmin¹, ZHOU Zhicheng², WANG Kailin³, ZHAO Chenlong³, WANG Liming³

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 211000, China; 2. Jiangsu Electric Power Company Research Institute, Nanjing 211103, China; 3. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Guangdong Shenzhen 518055, China)

Abstract: Except from the two basic and conventional contamination accumulation modes, the common slow solid mode and the rapid liquid mode, there is another kind of rapid contamination accumulation mode which is even easier to cause the pollution-flashover. It is related to human activities, such as burning straw and setting off firecrackers, or natural factors as forest fire and acid rain. Those factors result in the weather condition of high conductivity and high humidity, due to whom the rapid contamination accumulation is added to the normal one. In this paper, the relationship between flashover voltage and the fog conductivity is researched, by doing artificial polluted tests using porcelain insulators of XP-70. Contrast to the process of the pollution's getting wet under the clean fog, the variation characteristics of flashover voltage under the high conductivity fog is systemically studied. It is pointed out that the high conductivity fog decreases flashover voltage, which is more notable on low salt deposit. After studying the changing law of the flashover voltage under different fog conductivity and salt deposit, the relational expression among them was obtained. According to the local meteorological environment, the warning model was revised, by using the expression. It also can be decided if the insulation configuration should be improved.

Key words: polluted porcelain insulator; flashover performance; high conductivity fog; salt deposit density

0 引言

IEC标准将污秽类型分为A类和B类:A类一

般为固态污秽,包括自然污秽(如沙漠型污秽)和人类活动导致的污秽(如工业型污秽),这类污秽一般对应于常规的缓慢积污;B类一般为高导电性的液态污秽,目前主要指海雾型等自然污秽,这类污秽

收稿日期:2015-06-17; 修回日期:2015-07-16

一般对应于沿海区域的快速积污^[1-3]。

然而,随着社会经济的不断发展,由工业生产等人类活动造成的环境恶化也不断加重,大气中污染物浓度整体呈上升趋势,绝缘子表面积污态势愈加严峻^[4-6]。同时,在某些人类活动例如烟花爆竹燃放、秸秆焚烧等的作用下,空气中污染物浓度会出现短时间内的剧烈上升^[7],一方面造成绝缘子表面的快速积污过程,另一方面若在污染物剧烈上升的过程中遭遇大雾等潮湿天气,会造成污染物在绝缘子表面的沉积量增加,且使污层受潮,大大增加闪络风险。

在实际运行中,不仅内陆地区受到高浓度污染物天气的影响,沿海地区兴建的化工厂等也会对绝缘子表面污层造成影响^[8]。文[9]中记录了珠海地区部分监测点绝缘子在一次大雾来临前后的泄漏电流变化情况,监测到清洁绝缘子在盐雾、酸雾到来时的强烈放电现象,而在到来前后数据均表现正常,也说明了仅靠盐密来描述污秽程度而不考虑电导率雾的影响时,与实际运行经验脱节的情况。

在这样的情况下,若仍使用常规缓慢积污过程与清洁雾作用的结果,则会造成较大误差,导致不能及时对可能到来的闪络采取预防措施,威胁电网的安全与稳定运行。因此,需要将此作为一类特殊天气,考虑其来临时对绝缘子污闪发展过程,尤其是污闪电压的影响,对于沿海地区与内陆地区均适用。中国电科院宿志一指出,在雾霾天气对输变电设备外绝缘的影响中,雾水电导率是影响绝缘子染污的主要因素^[10]。在雾水电导率一定时,雾霾成分对污闪电压影响不大,但表面污秽度与可溶盐组分对污闪电压有显著影响。

综上所述,研究电导率雾对染污瓷绝缘子的影响刻不容缓,而问题的关键在于研究其雾电导率对污闪电压的影响。文中通过一个温度、湿度可控的小雾室,模拟高电导率雾天气,进行人工污秽试验,研究了雾电导率对污闪电压的影响,并测量得到试验前后绝缘子表面盐密、灰密变化量,对比清洁雾试验,建立雾电导率与表面等值盐密的等效关系。

1 试验设备与方法

整套电导率雾条件下的人工污秽试验在一个温度与湿度均可控的小雾室中进行。整个污秽试验系统由温度与湿度可控制的小雾室、污秽试验电源、泄漏电流监测设备、电导率发生与测量装置和系统监控软件组成,其整体结构见图1。

1.1 温湿度可控的小雾室

温湿度可控的小雾室由直径 85 cm、高 120 cm

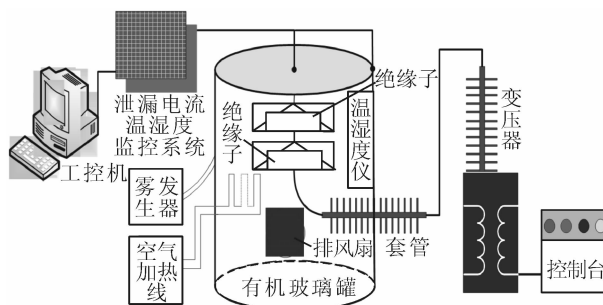


图1 试验系统示意图

Fig. 1 Test system structure

的绝缘有机玻璃圆柱筒、超声波雾加湿装置、减湿抽气装置、内部循环风扇、沿雾室壁均匀分布的空气加热线、温湿度传感器和监控软件系统组成,其实物见图2。

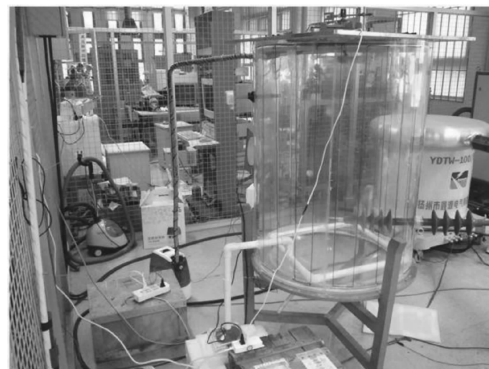


图2 温湿度可控小雾室的实物图

Fig. 2 Physical map of spray chamber

在小雾室中,相对湿度可在当前环境湿度至99%范围内实现自动控制,温度可在比当前环境温度高 30 ℃且总体小于 60 ℃的范围内实现自动控制。为了实现对小雾室内温度和湿度的准确控制,使其达到程序设定的目标温度和目标湿度后只能够在很小的范围内波动,需要依据小雾室中的初始温湿度状况,通过软件自动调节各个相关的硬件设备,采用优化的控制策略。控制结果为可以达到相对湿度波动范围 $\leq \pm 3\%$ 、温度波动范围 $\leq \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的精度水平。并且通过试验证明,在上述小雾室中,温湿度分布梯度很小,温度梯度 $\leq \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度梯度 $\leq \pm 3\%$,完全在小雾室技术参数期望值的范围内。同时,也说明在此小雾室内,试品悬挂位置对其湿润特性的影响可以忽略不计。

1.2 电导率雾发生装置

该试验中采用超声波起雾器直接对电导率溶液震荡起雾,而雾电导率以溶液电导率为表征量,用电导率仪进行测量。对超声波产生的雾进行冷凝处理,并测量冷凝水的电导率,结果与原配溶液电导率相符,则认为震荡产生的电导率雾的试验方法

是有效的。

文[10-12]中研究表明在电导率一定时,雾霾成分对闪络电压没有影响,因此,研究中采用 NaCl 作为电导率雾中的可溶盐成分,使用去离子水对电导率溶液进行配制,并忽略空气中不溶物的影响。

1.3 污秽试验系统其他组成部分

温湿度可控污秽试验系统的其他组成部分还包括:污秽试验电源系统、泄漏电流测量系统和监控软件。

1)污秽试验电源系统由调压器、变压器、电压分压器、试验控制台和电压测量仪表组成,变压器容量 100 kVA,最大输出电压 50 kV,额定输出电流 2 A,可用于 35 kV 及以下电压等级线路绝缘子的试验研究。

2)泄漏电流测量系统,由泄漏电流传感器、采集卡、电源保护器和 PC 机组成。泄漏电流传感器由实验室自行研制,属于接触式电阻型传感器,传感器本身带有过压和过流保护装置,防止绝缘破坏时将高压引入测量系统。系统测量范围为 0.5 mA~5 A,总体误差控制在 $\pm 3\%$ 以内。

3)温湿度可控污秽试验系统的监控软件是基于 LabVIEW 语言开发的,包括试验电压、泄漏电流的测量界面,泄漏电流特征量的统计界面,小雾室内温度、湿度的测量和控制界面。

1.4 试验样品

该试验中以典型型号 XP-70 悬式瓷绝缘子为对象进行试验,其基本技术参数与结构见图 3、表1。

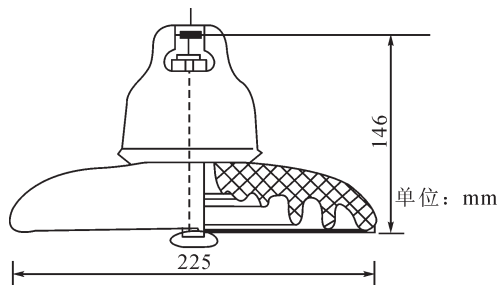


图3 试验用绝缘子示意图

Fig. 3 Insulator sample in the test

表1 试品的基本技术参数

Table 1 Technical parameters of insulator

绝缘子型式	盘径/mm	结构高度/mm	泄漏距离/mm
XP-70	225	146	295

1.5 试验方法

文中绝缘子的染污方式采用定量涂刷法,采用硅藻土模拟绝缘子表面不溶物成分,NaCl 模拟绝缘子表面可溶物成分,采用盐密值表征污秽程度,取标准值为 0.1 mg/cm^2 ,灰密值取标准值为 1.0 mg/cm^2 ,

雾电导率取 $2\,000 \mu\text{S/cm}$ 为标准值。

进行闪络试验时,取 2 片绝缘子悬挂在小雾室内,当污层达到充分湿润的条件时,采用均匀升压法进行闪络试验。具体操作为:将电压升至 40%预期闪络电压,然后均匀地每秒升压预期闪络电压的 10%~20%,直至闪络。每串试品只闪络 3 次,闪络间隔 10 min 以使可能形成的局部干区充分受潮,取其闪络电压平均值,并要求各次闪络电压与平均值值差 $\leq 15\%$ [13-14]。

2 试验结果分析

2.1 电导率雾对闪络电压影响分析

为确保该套泄漏电流监测系统对电流信号测量的精度,需要在软件平台内反复校正相关参数。一方面,为了提高测量精度,泄漏电流传感器对电流信号进行分段采集处理;另一方面,为了实现系统硬件部分的功能,在配套的软件中也设置有分段提取信号的运算方法,并需要分段校正相关参数[15]。

分别取盐密值为 0.05 、 0.1 、 0.25 mg/cm^2 ,灰密取标准值,对清洁雾条件下的闪络电压与电导率雾(标准值)条件下的闪络电压进行比较,见图 4、表 2。

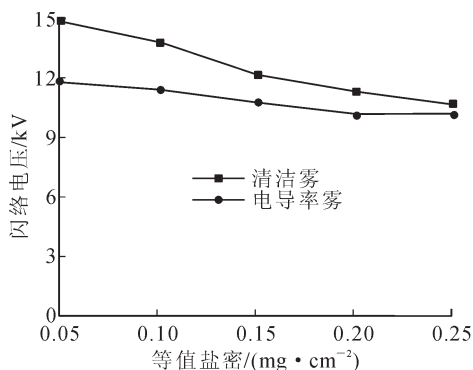


图4 电导率雾对闪络电压影响

Fig. 4 Effect of electrical conductivity fog on flashover voltage

表2 试验参数

Table 2 Test parameters

参数	数值				
盐密/($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
清洁雾闪络电压/kV	14.9	13.8	12.2	11.3	10.7
电导率雾闪络电压/kV	11.8	11.4	10.8	10.2	10.2

由上述试验结果可知,在表面等值盐密、灰密均相同的情况下,雾电导率的变化会引起闪络电压的下降,但对于不同盐密时的影响情况不同。在盐密较小时,下降幅度较大,达到了 28.2%,而在盐密已经达到比较高的水平时,电导率雾对于闪络电压的影响则相对较小,仅为 13.6%。

分析造成这种差距的原因,研究表明,电导率雾作用的根本原因在于绝缘子表面盐密的累积,放电仍属于沿面放电而非间隙放电^[16-19]。在试验中,控制雾流量与受潮时间一定,并且由于决定污秽吸湿能力灰密相同,因此可以认为绝缘子表面吸收的雾量基本相同,则造成闪络电压作用非线性原因一方面是由于盐密对闪络电压的影响具有饱和趋势,另一方面是由于不同电导率雾附着在绝缘子表面对污秽进行湿润后,受到其最大溶解度与环境温度的影响,污秽中可溶盐成分的溶解情况与自身密度有关,即与等值盐密有关。随着盐密的线性增长,溶解在表层水分中的盐量并非线性增长,而是呈饱和特性。以上两者共同作用下,电导率雾对闪络电压的影响呈现出随盐密升高而减弱的特点。

2.2 闪络电压与雾电导率关系

为了进一步研究雾电导率对闪络电压的影响情况,及其与盐密的关系,分别取盐密值为 0.05、0.1、0.15、0.2、0.25 mg/cm²,灰密取标准值,研究其分别在不同电导率雾条件下的闪络电压变化情况。实验结果见图 5、表 3。其中,雾电导率的值均已折算到 20 °C 条件下。

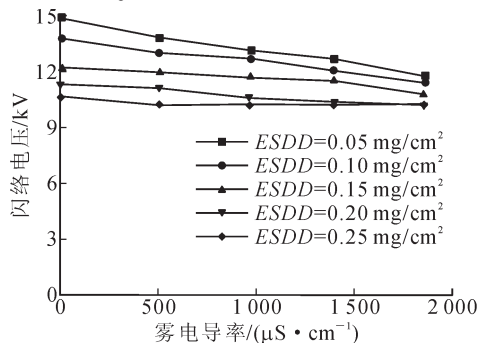


图 5 闪络电压与雾电导率关系

Fig. 5 Relationship between flashover voltage and electric conductivity

表 3 闪络电压试验结果

Table 3 Test result of flashover voltage		kV				
ESDD/ (mg·cm ⁻²)	雾电导率/(μS·cm ⁻¹)	10	503.1	970.9	1 393.7	1 857.2
0.05		14.9	13.8	13.2	12.7	11.8
0.10		13.8	13.0	12.7	12.1	11.4
0.15		12.2	12.0	11.7	11.5	10.8
0.20		11.3	11.1	10.6	10.4	10.2
0.25		10.7	10.2	10.2	10.2	10.2

由试验结果可知,电导率雾对于盐密较低时的闪络电压影响较大,随着电导率的升高,闪络电压下降明显,但其下降作用也存在趋于饱和的特征。而当盐密达到一定量后,电导率雾对闪络电压的影

响很小。即在污秽较轻的地区,需要尤其考虑电导率雾的影响,例如沿海地区等,一方面由于电导率雾对于较轻污秽影响较大,另一方面在此类地区考虑绝缘配置时并未将电导率雾天气纳入考虑,更容易在突发恶劣天气时发生闪络。对于重污秽地区则原有的绝缘配置在整体污秽水平一定时,足以防范污闪事故的发生。

2.3 雾电导率与等值盐密等效关系

在清洁雾条件下,闪络电压与盐密呈负指数关系^[20]。

$$U_f = A \cdot S^{-a} \quad (1)$$

根据实验结果对数据进行拟合,得到

$$U_f = 8.105 \cdot 2 \cdot S^{-0.2119} \quad (2)$$

将电导率作用的结果看做等值盐密作用,即

$$U_f = A \cdot (S + S_f)^{-a} \quad (3)$$

式(1)–(3)中: S 代表电导率雾来临前绝缘子表面原有盐密值; S_f 则代表雾电导率等效作用的结果,或将等值盐密作为自变量进行考虑,研究闪络电压与其的关系,并考察电导率值对拟合系数的影响,都得不到较好的拟合结果,见图 6。因此直接考虑电导率与等值盐密对闪络电压的共同作用结果,对实验数据进行多元函数拟合,得到结果见图 7。

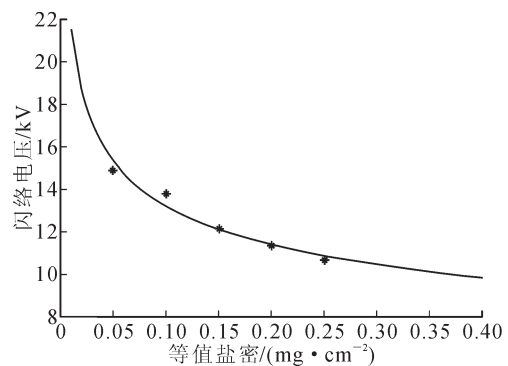


图 6 清洁雾条件下盐密与闪络电压关系

Fig. 6 Relationship between salt density and flashover voltage under the condition of clean fog

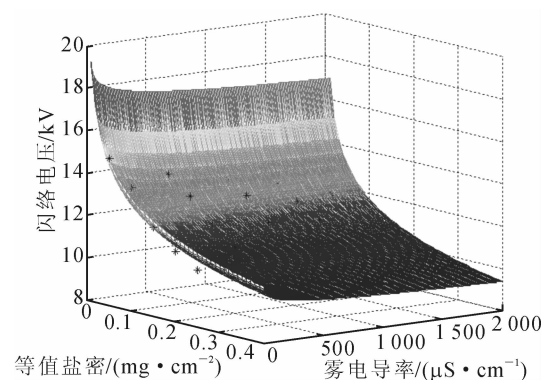


图 7 电导率雾条件下盐密与电导率关系

Fig. 7 Relationship between salt density and electrical conductivity under the condition of in high conductivity fog

拟合结果表达式为

$$U_f = 9.58 \cdot S^{-0.161} \cdot \gamma_{20}^{-0.0214} \quad (4)$$

式(4)中: S 为等值盐密, mg/cm^2 ; γ_{20} 表示雾溶液折合到20℃条件下的电导率, $\mu\text{S}/\text{cm}$ 。从图7中可知,随着等值盐密的增大与雾电导率的增大,都使绝缘子闪络电压下降,且下降作用呈饱和趋势,与实际相符。其中,盐密变化对于闪络电压的影响更显著,电导率的影响随着盐密的增大进一步降低,与前述实验结果的分析相符。

对拟合结果进行有效性检验,拟合残差值为0.0019,拟合度为0.8563,拟合结果较好。对各点残差及其置信区间作图,发现盐密为0.05、电导率为1857.2的数据点为异常点,剔除它重新计算得到新的表达式

$$U_f = 8.94 \cdot S^{-0.188} \cdot \gamma_{20}^{-0.0179} \quad (5)$$

此时残差值为0.0011,拟合度达到0.9198。剔除异常点后得到的拟合结果,进一步增大盐密的影响程度并降低电导率雾的影响程度,也侧面证明了盐密影响程度更大的结论。在清洁雾条件下电导率值接近10 $\mu\text{S}/\text{cm}$,此时 $\gamma_{20}^{-0.0179} = 0.96 \mu\text{S}/\text{cm}$,表达式与单独考虑盐密影响时基本一致。

将拟合公式应用于预警系统中的闪络电压预测,根据气象部门提供的或自行测量的雾电导率参数,对电压进行修正。可以计算得到在当前污秽程度,使工作电压致闪络的雾电导率,或在雾到来时是否会造成绝缘子闪络,从而采取预防措施。若由于地区气候条件恶化或新建化工厂等人工因素,使得工作电压致闪络的电导率雾天气高发,则需要考虑提高当地绝缘配置,从而避免污闪事故的大面积发生。

3 结论

1)电导率雾相对于清洁雾作用的情况,造成绝缘子污闪电压下降,影响较显著;随着雾电导率的上升,绝缘子污闪电压下降;对于表面污秽程度不同的绝缘子,影响结果也不一样,表面污秽程度越低,污闪电压下降越严重,在低污秽地区需要特别考虑电导率雾天气的作用;下降作用呈饱和趋势。

2)电导率雾的作用与等值盐密之间无明显数值等效关系,但由于作用途径与效果与等值盐密相似,因此可以参考盐密与闪络电压的关系,得到雾电导率与盐密综合作用的闪络电压表达式,拟合度较高。在进行闪络预警时,对于电导率雾天气使用该拟合公式对闪络电压进行修正,若造成工作电压致闪络的雾电导率在当地常发,则需要提高该地绝

缘配置。

参考文献:

- [1] 殷琼,陈原.高导电性降水降雪型快速积污导致的输变电设备污闪机理与防治措施[J].电网技术,2008,32(4):1-6.
YIN Qiong, CHEN Yuan. Mechanism of pollution-flashover in power transmission and transformation equipments caused by rainfall or snowfall type high conductivity rapid contamination accumulation and its prevention measures[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 1-6.
- [2] 高嵩,刘洋,路永玲,等.交流特高压输电线路运行维护现状综述[J].江苏电机工程,2014,33(2):81-84.
GAO Song, LIU Yang, LU Yongling, et al. A review on operation and maintenance of UHV AC transmission line[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(2): 81-84.
- [3] 李清,胡文,李黎,等.绝缘子自然积污饱和趋势及气象因素影响分析[J].高电压技术,2014,40(11):3336-3342.
LI Qing, HU Wen, LI Li, et al. Analysis of natural contamination saturation tendency[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3336-3342.
- [4] 王少华,胡文堂,龚坚刚,等.浙江电网架空输电线路绝缘子串的自然积污特性[J].高电压技术,2014,40(4):1002-1009.
WANG Shaohua, HU Wentang, GONG Jiangang, et al. Natural pollution accumulation characteristics of overhead transmission line insulator strings of Zhejiang electric power grid[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(4): 1002-1009.
- [5] 王彬,梁曦东,张轶博,等.交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验[J].高电压技术,2009,35(9):2322-2328.
WANG Bin, LIANG Xidong, ZHANG Yibo, et al. Natural pollution test of composite and porcelain insulators under AC and DC stress[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2322-2328.
- [6] 詹清华,阮江军,钟连宏.珠三角地区架空线路绝缘子的自然积污特性[J].高电压技术,2010,36(11):2662-2667.
ZHAN Qinghua, RUAN Jiangjun, ZHONG Lianhong. Natural contamination of pearl river delta region overhead transmission line insulators[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(11): 2662-2667.
- [7] 王红磊.南京市大气气溶胶理化特征观测研究[D].南京:南京信息工程大学,2013.
WANG Honglei. Observation study of the aerosol's characteristics in the city of Nanjing[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.
- [8] 谷裕,郝艳捧,张福增,等.沿海地区与内陆地区复合支柱绝缘子直流污闪特性比较[J].电网技术,2014,38(5):1373-1378.

- GU Yu,HAO Yanpeng,ZHANG Fuzeng,et al. Comparison of DC flashover performances of polluted composite post insulators in coastal areas and inland areas[J]. Power System Technology,2014,38(5):1373-1378.
- [9] 孙廷玺,张振旗. 湿沉降对珠海地区输电线路外绝缘的影响[J]. 电瓷避雷器,2010(6):1-5.
- SUN Tingxi,ZHANG Zhenqi. The influence of wet precipitation to the external insulation of transmission line in Zhuhai[J]. Insulators and Surge Arresters,2010 (6):1-5.
- [10] 宿志一. 雾霾天气对输变电设备外绝缘的影响[J]. 电网技术,2013,37(8):2284-2290.
- SU Zhiyi. Influences of fog-haze on external insulation of transmission and distribution equipments[J]. Power System Technology,2013,37(8):2284-2290.
- [11] 俞燮根. 绝缘子模拟固体涂层叠加湿沉降试验研究[J]. 华东电力,1997,25(4):3-6.
- YU Xiegen. Moisture settling test on the insulator analog solid coating in the similitude of fog sedimentation[J]. East China Electric Power,1997,25(4):3-6.
- [12] 马德英,刘 动,卢 明,等. 雾霾中的雾对盐密的影响[J]. 陕西电力,2014,42(12):56-59.
- MA Deying,LIU Dong,LU Ming,et al. Influence of fog-haze environment on ESDD[J]. Shaanxi Electric Power,2014,42(12):56-59.
- [13] 张楚岩,张福增,李锐海,等. 绝缘子人工污秽试验加压方式的比较[J]. 高电压技术,2013,39(1):44-53.
- ZHANG Chuyan,ZHANG Fuzeng,LI Ruihai,et al. Comparison of on-load voltage methods in artificial contamination test for insulators[J]. High Voltage Engineering,2013,39(1):44-53.
- [14] 魏 旭,周志成,戴罕奇,等. 高温硫化硅橡胶试品表面染污方法研究[J]. 高压电器,2015,51(2):51-56.
- WEI Xu,ZHOU Zhicheng,DAI Hanqi,et al. Discussion on contaminating method for high temperature vulcanizing silicone rubber samples[J]. High Voltage Apparatus,2015,51(2):51-56.
- [15] 薛恒嵩. 利用泄漏电流递归分析法研究绝缘子雾凇闪络[J]. 江苏电机工程,2013(6):47-50.
- XUE Hengsong. Research on insulator rime flashover through leakage current regression analysis[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2013(6):47-50.
- [16] 蒋兴良,黄 俊,董冰冰,等. 雾水电导率对输电线路交流电晕特性的影响[J]. 高电压技术,2013,39(3):636-641.
- JIANG Xingliang,HUANG Jun,DONG Bingbing,et al. Influence of fog water conductivity on AC corona characteristics of transmission line[J]. High Voltage Engineering,2013,39(3):636-641.
- [17] 李源军. 雾中输电线路绝缘子交流放电特性及闪络过程研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
- LI Yuanjun. Study on the AC flashover performance of transmission line insulator in fog environment[D]. Chongqing :Chongqing University,2014.
- [18] 彭 波,汤美云,周卫华,等. 污秽绝缘子在不同脉冲电压条件下的闪络特性研究[J]. 高压电器,2014,50(5):51-55.
- PENG Bo,TANG Meiyun,ZHOU Weihua,et al. Flashover characteristics of polluted insulators under different impulse voltage waveforms[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(5):51-55.
- [19] 蒋兴良,刘 洋,孟志高,等. 雾霾对绝缘子交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术,2014,40(11):3311-3317.
- JIANG Xingliang,LIU Yang,MENG Zhigao,et al. Effect of fog-haze on AC flashover performance of insulator[J]. High Voltage Engineering,2014,40(11):3311-3317.
- [20] 关志成,刘瑛岩,周远翔,等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
- GUAN Zhicheng,LIU Yingyan,ZHOU Yuanxiang,et al. Insulators and power transmission equipment external insulation[M]. Beijing: Tsinghua University Press,2006.
- 王铭民(1974—),男,高级工程师,长期从事高电压技术、电网设备运维技术研究及管理工作。

(上接第 29 页)

- switching sure testing[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology),1978,18(1):18-32.
- [3] 陈昌渔,杨学昌. 有关变压器操作波感应耐压试验若干技术问题的论述[J]. 电工电能新技术,1992(1):1-4.
- CHEN Changyu,YANG Xuechang. Some comments on switching sure field test of power transformer[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,1992(1):1-4.
- [4] 张仁豫,陈昌渔,王昌长. 高电压试验技术[M]. 第 3 版.北京:清华大学出版社,2009.
- ZHANG Renyu,CHEN Changyu,WANG Changchang.High voltage testing technology[M]. The Third Edition.Beijing: Tsinghua University Press,2009.
- [5] 谭浩强,田淑清. FORTRAN 语言[M]. 北京:清华大学出版社,1984.
- TAN Haoqiang,TIAN Shuqing. FORTRAN language[M]. Beijing: Tsinghua University Press,1984.