

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.11.040

多因素分析绝缘子位置对自然积污的影响

王黎明¹, 高思明¹, 梅红伟¹, 赵晨龙¹, 程登峰², 夏令志²

(1. 清华大学深圳研究生院, 深圳 518055; 2. 国网安徽省电力公司电力科学研究院, 合肥 230022)

摘要: 由于绝缘子是带电运行, 绝缘子的位置会影响到绝缘子的自然积污。为研究绝缘子位置对绝缘子自然积污的影响, 对安徽电网 1 000 kV 特高压淮南站里不同高度的避雷器绝缘子污秽进行采集。测量其等值盐密, 等值灰密, 局部表面电导率, 污秽粒径以及污秽成分, 进行多因素分析。试验结果表明, 位置不仅影响绝缘子的污秽程度分布, 还会影响到污秽的局部表面电导率, 污秽成分及污秽粒径分布; 绝缘子串两端的小颗粒污秽积累相较于中间更为严重; 绝缘子位置越低, 大颗粒污秽积累越严重; 污秽成分和局部表面电导率均呈现沿串 U 形分布。试验结果为绝缘子位置对绝缘子自然积污的影响提供参考。

关键词: 等值盐密; 等值灰密; 局部表面电导率; 污秽粒径; 污秽成分

Multi-parameter Analysis of Insulator Location Effect on Natural Contamination

WANG Liming¹, GAO Siming¹, MEI Hongwei¹, ZHAO Chenlong¹,
CHENG Dengfeng², XIA Lingzhi²

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China;

2. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230022, China)

Abstract: Since insulator is charged, the position of insulator will affect the natural contamination of the insulator. To investigate the effect of insulator position on natural contamination, the natural contamination of insulators at different heights in the 1 000 kV UHV Huainan substation of Anhui power grid was collected. The equivalent salt deposit density (*ESDD*), non-soluble salt deposit density (*NSDD*), partial surface conductivity (*PSC*), natural contamination particle size and natural contamination components were measured. Experimental results show that: the location not only affects *ESDD* and *NSDD*, but also affects *PSC*, natural contamination components and natural contamination particle size; *PSC* and natural contamination components show U-shaped distribution along the string; the natural contamination of small particles at both ends of the insulator string is more than that in the middle; the lower the insulator location, the thicker the natural contamination of large particles. This study may provide a reference for studying the influence of insulator location on natural contamination of insulators.

Key words: *ESDD*; *NSDD*; *PSC*; contamination particle size; contamination component

0 引言

绝缘子在电力系统稳定运行中起着关键的支持作用和绝缘作用, 是电力系统中十分重要的部件^[1-3]。但由于绝缘子放置于自然环境中, 大气中的污染物将会粘附在绝缘子表面, 在湿润时会提高绝缘子表面的电导率, 从而降低绝缘子的绝缘能力。为减少污秽对绝缘子绝缘性能的影响, 针对绝缘子积污问题, 目前已有众多研究成果^[4-9]。

为区分污秽对绝缘子的绝缘性能的影响, 可通过采集绝缘子表面的污秽, 将其溶解后测量溶液的电导率, 结合溶液容量和采集面积计算出等值盐密 (equivalent salt deposit density, *ESDD*), 并使用滤纸称重法测量污秽中不可溶成分的重量, 结合采集面积计算出等值灰密 (non-soluble salt deposit density, *NSDD*)。然后, 根据所得到的等值盐密/等值灰密和污区等级划分图进行污区等级划分^[2]。但是, 由于污秽中难溶性盐成分的存在, 导致通过溶解方式测量得出的

绝缘子表面污秽水平和实际的绝缘性能变化存在较大的偏差。为此,清华大学、重庆大学等科研机构对自然污秽对绝缘子的影响进行深入的研究。

国网江苏省电力公司电力科学研究院魏旭^[10]等结合了电导率测量,研究了自然污秽的可溶性盐成分对于绝缘子表面污秽度的影响,并定量分析了硫酸钙对等值盐密的贡献,得出绝缘子表面外绝缘性能主要由易溶盐决定,硫酸钙等微溶盐的影响很小。

文[11]通过有效盐密和局部表面电导率(partial surface conductivity, *PSC*)的概念来表征输变电设备污秽程度,从而弥补等值盐密法与污闪电压相关度较低的缺陷,实现对输变电设备进行更好的污秽评估。

文[12-13]等研究了不同污秽成分下绝缘子的污闪特性,得出在进行自然污秽测试时需要考虑污秽成分的物理和化学特性以及对电弧发展影响。

从上述的研究可发现污秽对绝缘子外绝缘性能影响是*ESDD*和*NSDD*难以完全体现的,需要更多的参数来表征绝缘子污秽水平。为此文中对绝缘子的污秽进行采集后,除了测量等值盐密和等值灰密外,还测量了污秽的成分、粒径以及局部表面电导率。

由于绝缘子带电运行,绝缘子积污特性则受到绝缘子位置的影响,众多研究表明,绝缘子污秽浓度分布呈现沿串U形分布^[14-18]。为能够进一步得出绝缘子位置对积污特性的影响,文中在安徽特高压变电站中采集并测量了主变压器避雷器位于不同高度的支柱绝缘子污秽的等值盐密、等值灰密、污秽成分、污秽粒径以及局部表面电导率,通过多因素分析的方法研究绝缘子位置对积污的影响。

1 试验条件与方法

1.1 试验条件

为研究位置对自然积污的影响,对在安徽电网的1 000 kV特高压交流变电站的绝缘子污秽进行采集,采样的地点为安徽电网的1 000 kV特高压淮南站,见图1。采集期为在1 000 kV特高压淮南站设备更换期。



图1 淮南特高压变电站

Fig. 1 Huainan UHVAC substation

特高压淮南变电站处于偏僻地区,附近无大型

公路。通过观察可知,变电站附近没有明显的重污染源。特高压淮南变电站的周围主要是山林,同时存在养殖场和农田。由于农田是需要进行施肥,将会在空气散发出硝酸根离子等可溶性盐粒子,可溶性盐附着在绝缘设备上,将会大大地降低其绝缘性能,对特高压变电站的正常可靠运行产生威胁。所以,农田可认为是一个污染源。

在此次的变电站绝缘子污秽采集中,将对变电设备上的污秽使用采样布进行表面污秽采集,用于测量绝缘子表面的等值盐密、等值灰密以及污秽成分。同时将使用刮片采集干燥的表面污秽用于进行污秽的粒径分析。最后,将使用局部表面电导率测量仪对绝缘子表面的局部表面电导率进行测量。

此次进行污秽采集的设备是1 000 kV特高压淮南变电站的1号主变压器的C相1 000 kV侧避雷器绝缘子。避雷器绝缘子由5个组件组成,为区分将由上之下编号为1-5,见图2。



图2 1 000 kV避雷器支柱绝缘子

Fig. 2 1 000 kV post insulator of arrester

避雷器绝缘子组件的伞裙形状为一大一小伞型,1-2号支柱绝缘子的形状相同,3-5号支柱绝缘子的形状相同,1号避雷器支柱绝缘子为近电端绝缘子,5号避雷器支柱绝缘子为近地端绝缘子。此次采集,首先使用局部表面电导率仪进行对1-5号支柱绝缘子进行局部表面电导率的测量。然后进行了污秽的采集,用于测量其等值盐密及等值灰密和成分分析。最后,使用刮片采集支柱绝缘子1、3、5号上的干燥污秽,用于进行污秽的粒径分析。

1.2 试验装置及原则

为保证污秽采集和测量的准确性,在进行污秽采集和*ESDD*、*NSDD*的测量时,将根据相关的绝缘子选取标准中的污秽采样和测量方法^[2],进行合理的污秽采集和数据测量。

测量局部表面电导率将使用局部表面电导率测量仪进行测量。局部表面电导率测量仪是清华大学电机系提出并研制的^[19-21],由LCR电桥和圆形电极探头组成。其原理是使用LCR电桥测量被去离子水湿润的污秽表面,测量其表面的电阻,结合

圆形电极探头结构特性,进行换算,得出局部表面电导率。文中使用的LCR数字电桥型号为UT612。局部表面电导率测量仪的使用见图3。



图3 局部表面电导率测量仪的使用
Fig. 3 Use of the partial surface conductivity
measuring apparatus

2 试验结果与分析

2.1 等值盐密、等值灰密及局部表面电导率

此次进行测量的避雷器绝缘子为大小伞形瓷支柱绝缘子,通过测量其外周长和大小伞上下表面的母线长度,计算出其表面积。通过观察和测量数据对比,认为支柱绝缘子1和支柱绝缘子2的大小相同,表面积相等;支柱绝缘子3、4、5的大小相同,表面积相等。通过测量的外径和母线长度计算,得出支柱绝缘子1、2的表面积约为 $4.86 \times 10^3 \text{ cm}^2$,支柱绝缘子3、4、5的表面积约为 $7.31 \times 10^3 \text{ cm}^2$ 。

通过测量采集所得样品溶解后的电导率以及样品中不溶物的质量,结合计算所得的绝缘子表面积,得出等值盐密及等值灰密,见表1。通过测量结果可以发现,等值盐密的大小随着支柱绝缘子位置的下降先变小后变大,等值灰密同样呈现该趋势,表明在带电的情况下,绝缘子污秽积累呈现沿串U形分布,且等值盐密的变化程度相较于等值灰密更为明显。灰盐比均值为4.72,标准差为0.63,灰盐比较为恒定,可见位置对灰盐比影响不大。

表1 不同高度绝缘子的等值盐密/等值灰密积污速度
Table 1 ESDD/NSDD of various height of insulators

支柱绝缘子	ESDD/(mg·cm ⁻²)	NSDD/(mg·cm ⁻²)	灰盐比
1	0.031	0.12	3.9
2	0.022	0.10	4.5
3	0.018	0.09	5.0
4	0.016	0.09	5.6
5	0.037	0.17	4.6

对避雷器各支柱绝缘子的局部表面电导率进行测量,并与实测的等值盐密进行对比,定义K值=局部表面电导率/等值盐密,见表2。

表2 不同高度绝缘子的局部表面电导率
Table 2 Partial surface conductivity of various
height of insulators

支柱绝缘子	PSC/ μs	ESDD/(mg·cm ⁻²)	K值
1	10.7	0.031	345
2	8.9	0.022	405
3	7.3	0.018	406
4	6.9	0.016	431
5	13.7	0.037	370

通过测量5个支柱绝缘子的局部表面电导率,可知其大小随着支柱绝缘子位置的下降先变小后变大,表明在带电的情况下,绝缘子局部表面电导率也呈现沿串U形分布。通过计算得出平均的K值为391,各个支柱绝缘子之间的K值差距不大,可以发现局部表面电导率和等值盐密有一定的对应关系且绝缘子位置对其影响不大。

2.2 污秽粒径及成分

结合图形和体积分数表,对于可悬浮颗粒(粒径100 μm 以内)的污秽积累,支柱绝缘子3的粒径偏大,支柱绝缘子1和支柱绝缘子5的粒径相似,粒径偏小,对于粒径20 μm 以内的污秽颗粒,支柱绝缘子1和5的体积分数均大于支柱绝缘子3,可见电场作用对于粒径20 μm 以内的污秽积累有更为明显的加强作用,绝缘子串两端的小颗粒污秽积累相较于中间更严重;当污秽的粒径在100 μm 以上时,此时的污秽颗粒物无法在空气中悬浮。明显看见该范围的污秽颗粒体积分数中,支柱绝缘子5的体积分数明显高于支柱绝缘子1和3。对于粒径在200 μm 以上的污秽颗粒,支柱绝缘子1上没有任何积累。可见粒径较大的污秽颗粒难以在较高的绝缘子上积累,符合大粒径污秽颗粒难悬浮的特性。结果见表3和图4。

表3 不同高度绝缘子的粒径分布
Table 3 Size distribution of various height of insulators

粒径/ μm	范围内体积占比/%		
	支柱绝缘子1	支柱绝缘子3	支柱绝缘子5
0.0~2.5	10.16	9.10	9.87
2.5~10.0	26.03	23.54	25.10
10.0~20.0	29.17	27.00	28.49
20.0~50.0	29.15	33.38	30.05
50.0~100.0	5.06	6.40	5.48
100.0~200.0	0.44	0.39	0.76
200.0~300.0	0.00	0.17	0.22
300.0以上	0.00	0.00	0.00

为分析支柱绝缘子的污秽成分特性,对采集的污秽进行溶解,并对溶解液中的离子成分体积分数进行了测量,分别测定了溶解液中的氯离子、硝酸

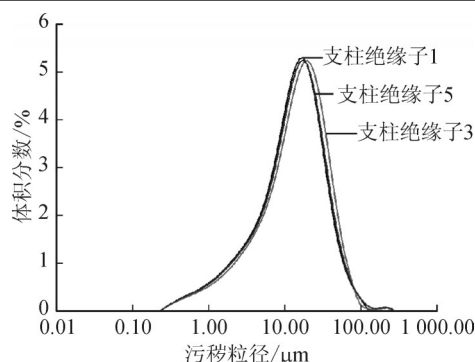


图4 不同高度绝缘子的粒径分布

Fig. 4 Size distribution of various height of insulators

根离子、硫酸根离子、钠离子、钾离子以及钙离子。结果见表4、5。

表4 不同高度绝缘子的阴离子质量占比

Table 4 Anion mass ratio of various height of insulators %			
支柱绝缘子	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
1	1.65	17.84	80.51
2	2.10	24.96	72.94
3	2.06	25.35	72.60
4	2.02	25.35	72.62
5	1.76	22.13	76.11

表5 不同高度绝缘子的阳离子质量占比

Table 5 Cation mass ratio of various height of insulators %			
支柱绝缘子	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺
1	0.77	1.66	97.58
2	4.32	3.20	92.48
3	4.11	3.21	92.68
4	4.12	3.04	92.84
5	3.84	2.82	93.33

通过污秽成分分析可以发现,污秽溶解液中阴离子主要是硫酸根离子,阳离子主要是钙离子。

对于阴离子,近电端的支柱绝缘子1的硫酸根质量占比最高,其次是近地端的支柱绝缘子5,位于两者中间的支柱绝缘子偏小,呈现沿串U形分布。3个支柱绝缘子污秽的硝酸根离子体积分数偏高,硝酸根离子是由于附近农田施肥造成的。附近农田对变电站污秽积累有一定的影响。

对于阳离子,近电端的支柱绝缘子1的钙离子质量占比最高,其次是近地端的支柱绝缘子5,位于两者中间的支柱绝缘子偏小,呈现沿串U形分布,但趋势没有阴离子明显。

3 结论

为研究绝缘子位置对变电设备污秽积累特性

的影响,对安徽电网1 000 kV特高压交流变电站淮南站不同位置的支柱绝缘子进行了污秽取样,测量出其表面的等值盐密、等值灰密、局部表面电导率,污秽粒径及污秽成分,得出如下的测量结果:

1)特高压淮南站变电设备的等值盐密的大小随着绝缘组件位置的下降先变小后变大,等值灰密同样呈现该趋势,表明在带电的情况下,绝缘子污秽积累呈现沿串U形分布,且等值盐密的变化程度相较于等值灰密更为明显。灰盐比均值为4.72,标准差为0.63,绝缘子位置对灰盐比影响不大。

2)在带电的情况下,绝缘子局部表面电导率同样呈现沿串U形分布,局部表面电导率和等值盐密有一定数值关系。

3)对于可悬浮颗粒(粒径100 μm以内),电场作用对于粒径20 μm以内的污秽积累有更为明显的加强作用,绝缘子串两端的小颗粒污秽积累相较于中间更严重;对于不可悬浮颗粒(粒径在100 μm以上),污秽颗粒难以在较高的绝缘子上积累,大颗粒污秽主要影响因素为绝缘子的高度。

4)特高压淮南站的污秽成分中,阴离子主要是硫酸根离子,阳离子主要是钙离子。阴离子和阳离子的质量占比均呈现沿串U形分布,阴离子的趋势更为明显。

参考文献:

- [1] 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,2006:182-259.
GUAN Zhicheng, LIU Yingyan, ZHOU Yuanxiang, et al. Insulators and outdoor insulation of power transmission equipments[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 182-259.
- [2] 污秽条件下使用的高压绝缘子的选择和尺寸确定:GB/T 26218[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
Selection and dimensioning of high-voltage insulators intended for use in polluted conditions:GB/T 26218[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [3] 关志成,张福增,王新,等. 特高压直流输电线路外绝缘设计和绝缘子选型[J]. 高压电技术, 2006, 32(12): 120-124.
GUAN Zhicheng, ZHANG Fuzeng, WANG Xin, et al. Consideration on external insulation design and insulator selection of UHVDC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 120-124.
- [4] 李恒真,刘刚,李立涅. 广州地区线路盘式防污型玻璃绝缘子的自然积污规律[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(25): 118-124.
LI Hengzhen, LIU Gang, LI Licheng. Natural contamination of disc insulators in Guangzhou area[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25): 118-124.

- tion deposit law of line disc anti-contamination glass insulator in Guangzhou area[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(25):118-124.
- [5] 王黎明,王耿耿,黄睿,等. 降雨对绝缘子表面污秽的清洗作用[J]. 电网技术, 2015, 39(6):1703-1708.
WANG Liming, WANG Genggeng, HUANG Rui, et al. Cleaning effect of rainfall on surface contamination of insulators[J]. Power System Technology, 2015, 39(6):1703-1708.
- [6] 孙保强,王黎明,关志成,等. 电压种类及极性对绝缘子积污的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(12):3101-3108.
SUN Baoqiang, WANG Liming, GUAN Zhicheng, et al. Influence of voltage types and polarity on contamination of insulators[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12):3101-3108.
- [7] WANG J, WANG K, ZHOU M, et al. The natural contamination of XP-70 insulators in Shenzhen, China[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1):349-358.
- [8] WANG Haiyan, LIU Gang. Study on insulator natural contamination trend under different physiognomies of local area[C]// Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Vancouver:IEEE, 2008:89-93.
- [9] TAKASU K, SHINDO T, ARAI N. Natural contamination test of insulators with DC voltage energization at inland areas[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(4):1847-1853.
- [10] 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.
WEI Xu, ZHOU Zhicheng, ZHAO Chenlong, et al. Effect of soluble composition degree of insulator surface[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12):3109-3115.
- [11] 姜新建,董弘川,王黎明,等. 用有效盐密作为表征污秽度的新方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(12):3869-3875.
JIANG Xinjian, DONG Hongchuan, WANG Liming, et al. New method to describe contamination degree of insulators by effective equivalent salt deposit density[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12):3869-3875.
- [12] 蒋兴良,李鑫,张东东,等. 可溶性污秽成分对绝缘子交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(6):1915-1920.
JIANG Xingliang, LI Xin, ZHANG Dongdong, et al. Effect of soluble contamination on the AC flashover performance of insulator[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6):1915-1920.
- [13] 张志劲,张东东,袁超,等. 污秽成分对 XP-160 绝缘子串交流闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(7):1970-1976.
ZHANG Zhijin, ZHANG Dongdong, YUAN Chao, et al. Effect of contamination component on AC flashover performance of insulator string XP-160[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(7):1970-1976.
- [14] 陈孝明,黄俊杰,阮玲,等. 绝缘子污秽可溶性成分对等值盐密的影响分析[J]. 高压电器, 2016, 52(1):184-189.
CHEN Xiaoming, HUANG Junjie, RUAN Ling, et al. Analysis on influence of soluble components of insulator contamination on ESDD[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1):184-189.
- [15] 徐康泰,屠幼萍. 500 kV 交流岭深线路复合绝缘子的积污特性[J]. 高压电器, 2014, 50(12):1-6.
XU Kangtai, TU Youping. Contamination characteristics of composite insulators on 500 kV Ling-Shen transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(12):1-6.
- [16] 张锐,黄道春,吴光亚,等. 交流特高压支柱瓷绝缘子的自然积污特性研究[J]. 电网技术, 2014, 38(11):3217-3223.
ZHANG Rui, HUANG Daochun, WU Guangya, et al. Study on natural contamination characteristics of UHV AC post porcelain insulator[J]. Power System Technology, 2014, 38(11):3217-3223.
- [17] 郑秋玮,刘华钢,邹建明,等. ± 500 kV 兴安直流线路复合绝缘子积污特性[J]. 中国电力, 2015, 48(8):86-91.
ZHENG Qiwei, LIU Huagang, ZOU Jianming, et al. Contamination accumulating features of composite insulator of ± 500 kV Xingren-Bao'an HVDC transmission line[J]. Electric Power, 2015, 48(8):86-91.
- [18] 王晶,陈林华,刘宇,等. 电场对复合绝缘子积污特性影响的研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(3):585-593.
WANG Jing, CHEN Linhua, LIU Yu, et al. Effect of the electric field on the contamination accumulation characteristic of the insulators[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3):585-593.
- [19] 关志成,刘虹,王黎明,等. 用局部表面电导率法研究绝缘子的积污规律[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(1):10-12.
GUAN Zhicheng, LIU Hong, WANG Liming, et al. Analysis of the contamination of insulators using the partial surface conductivity method[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2000, 40(1):10-12.
- [20] 孙保强,关志成,王黎明,等. 局部表面电导率测量仪器及测试方法[J]. 高电压技术, 2014, 40(3):878-884.
SUN Baoqiang, GUAN Zhicheng, WANG Liming, et al. Instruments and method for measuring partial surface conductivity[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3):878-884.
- [21] WANG L, CAO B, MEI H, et al. Effects of natural contamination components on the surface conductivity under saturated moisture[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5):2945-2951.

王黎明(1963—),男,博士,教授,主要从事高电压与绝缘技术以及外绝缘状态监测评估方面的研究工作。