

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2022.06.029

模拟雾霾与自然雾霾下积污等效性分析

王建辉^{1,2}, 赵悦菊^{1,2}, 滕济林^{1,2}, 苗文华^{1,2}, 郑永立^{1,2}, 俞葆青^{1,2}

(1. 北京国电富通科技发展有限公司, 北京 100070;

2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要:雾霾天气的不确定性使得研究其对电力设备影响的工作较难开展,然而模拟雾霾环境下的研究能否等效于实际雾霾天气下的情况,关系着其结论对实际工作的指导价值。为此,文中在模拟雾霾和自然雾霾环境下分别测试积污样品的表面污层电阻和泄漏电流,分析讨论了2种环境对绝缘子影响的等效性。研究发现,从测试的等值附盐密度、非可溶沉积物密度和表面污层电阻等数据看,2种雾霾环境下的绝缘子具有等效对应关系,即绝缘子自然雾霾下积污1 a等效于模拟雾霾下积污10~20 d;从泄漏电流参数看,2种雾霾环境下的复合绝缘子不具有等效性,模拟雾霾下的泄漏电流结论不能直接用于指导实际工作。

关键词:雾霾;等效性;积污;绝缘子;表面电阻;泄漏电流

中图分类号:TM216

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)06-0244-08

0 引言

输电线路绝缘子污闪事故不仅危害电网的安全运行,还可能造成巨大经济损失,因此污闪事故的防治受到电网运维部门的高度重视。然而,绝缘子污闪事故是一个错综复杂的过程,国内外技术人员对此展开众多研究^[1-7],污秽的种类和比例、污秽均匀分布与否以及非可溶沉积物密度(以下简称灰密)对污闪电压都有很大影响,尤其是污秽程度和绝缘子的积污特征是影响污闪的主要因素。自然界中的污秽构成复杂,地区之间积污与当地环境和天气有着密切的联系,并且越是恶劣环境,污闪的概率就越大。例如近年来,雾霾天气的频繁发生对电力外绝缘设备的影响非常大,因为雾霾发生时多伴随高导电率雾,而且空气中硫酸盐、硝酸盐、铵盐等含量较高,绝缘设备极易被大量可溶盐的污秽覆盖,在输电负荷较大的情况下,很容易发生污闪事故^[8-11]。

上述大多研究都是利用氯化钠和硅藻土等化学物质配制污秽液,然后采用人工涂覆的方式来模拟污秽绝缘子的积污状态,或者在人工模拟气候室的环境下获得积污绝缘子^[12-17]。这些方法虽然简单易行,但忽略了实际污秽的复杂性,尤其是雾霾天气下的积污污秽,既含有无机物质,也含有有机物质,还具有矿物质等成分,与一般情况下的污秽存在差大差异。因此,采用上述人工配制污秽涂覆的方法或在人工模拟雾霾环境下所得出的结论能

否客观反映真实雾霾环境下的情况,还需要进一步研究证实,而国内外在此方面尚未见有相关报道。

由此,文中开展了自然雾霾环境(普通天气和雾霾天气混合积污)和模拟雾霾环境下绝缘子的积污特性试验,通过对比积污过程中表面污层电阻、泄漏电流、等值附盐密度(以下简称盐密)、灰密等特性,分析2种雾霾环境对绝缘子染污和电气性能的等效性,最终得出模拟雾霾与自然雾霾环境等效关系。

1 试验样品的准备

1.1 自然雾霾和模拟雾霾环境

雾霾是指在一定湿度下,空气中的水滴以细小颗粒物,尤其是PM_{2.5}(空气动力学当量直径小于等于2.5 μm的颗粒物)为成核物质,形成一种稳定的气溶胶状态^[18]。

我国雾霾具有明显的时空特征,中东部高于西部,北方高于南方,冬季高,夏季低,总体而言,冬季PM_{2.5}质量浓度显著高于其他季节。尤其在河北南部,PM_{2.5}质量浓度可达150 μg/m³及以上,这一方面是由于冬季燃煤取暖导致排放大幅增加,另一方面是因为冬季气象条件不利于大气污染物的扩散。化学组成上,雾霾基本都由硫酸盐、硝酸盐、铵盐(上述3类盐合称SNA),有机物(简称OM)和矿物颗粒等几部分组成。其中二次水溶性组分SNA与OM是中国典型城市雾霾中最重要的2类成分。

雾霾的成分组成与地区的经济生产特点和地区污染程度有很大关系。例如,农业排放具有季节性,铵盐贡献率居各城市首位,高达13%;北方冬季

收稿日期:2022-05-21;修回日期:2022-07-30

基金项目:国家电网有限公司科技项目(521700140004)

燃煤阶段,硫酸盐的贡献最高;北京、天津作为典型的交通密集型大城市,硝酸盐绝对强度以及对PM_{2.5}的贡献比例居于前位。由此可见,我国雾霾主要来源有农业排放、燃煤排放、交通排放和工业建筑扬尘等。将这些来源和雾霾组分进行比对可得出几个主要的成分源:水溶性离子(以硫酸盐、硝酸盐和铵盐等成分为主)、交通排放(如汽车尾气)、燃煤排放(供热厂、火电厂等工厂排放)和矿尘颗粒(如地表扬尘等)。

因此,文中选取的自然雾霾下的积污样品为在河北某地区雾霾频发的冬、春季节进行积污试验的样品;模拟雾霾下的积污样品为在搭建的模拟雾霾实验室进行积污试验的样品^[19]。

实验室人工模拟雾霾参数的设定依据为:根据河北近些年冬季户外雾霾参数特征(PM_{2.5}质量浓度约为70~200 μg/m³,湿度为70%~90%,雾水电导率为200 μS/cm),人工模拟雾霾的参数设定为实际雾霾的10倍以上,通过加速来体现雾霾成分对材料的影响。人工模拟雾霾参数设定如表1所示。

表1 人工模拟雾霾的特征参数

Table 1 The characteristic parameters of artificially simulated fog-haze

参数	数值
盐雾溶液电导率/(μS·cm ⁻¹)	1 500
相对湿度/%	80
PM _{2.5} 质量浓度/(μg·m ⁻³)	1 800

人工模拟雾霾采用溯源法,即从雾霾的来源及成因上出发,考虑各个复杂因素,模拟产生源。人工模拟雾霾实验装置包括3个部分,分别为雾霾产生装置、雾霾模拟腔体和雾霾检测装置。雾霾产生装置由燃煤发生装置、燃油发生装置、粉尘发生器和盐雾发生器组成。图1为雾霾模拟实验装置示意图。

按照设定的模拟雾霾参数,进行加速积污试验。图2为检测的PM_{2.5}质量浓度变化柱状图。随着雾霾模拟物的不断补充,并渐渐扩散,最终达到稳定阶段。

1.2 试验样品和积污过程

绝缘子样品为瓷绝缘子、玻璃绝缘子、涂覆室温硫化硅橡胶防污闪涂层的玻璃绝缘子(下文简称涂层绝缘子)和复合绝缘子(由硅橡胶为基体的高分子聚合物制成的伞套、玻璃纤维增强树脂芯棒及两端金具组成的绝缘子)。图3为2种积污环境。模拟环境下的积污样品是瓷绝缘子、玻璃绝缘子和涂层绝缘子在模拟雾霾环境下进行加速积污,积污

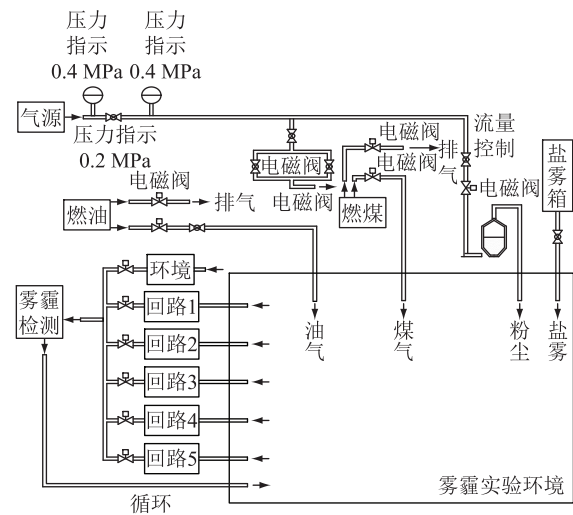


图1 雾霾模拟实验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of fog-haze simulation experiment device

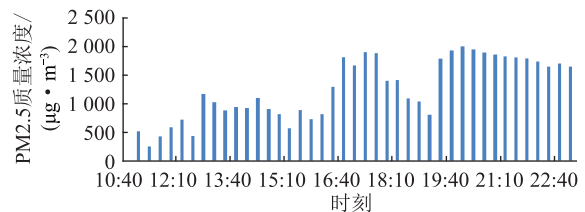
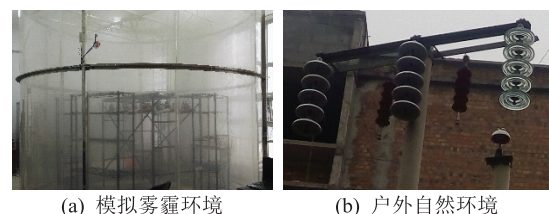


图2 PM_{2.5}质量浓度随雾霾形成过程变化

Fig.2 The PM_{2.5} mass concentration changes in the fog formation process

5 d, 10 d, 20 d 及 40 d 后分别取出 3 个平行样品进行绝缘特性测试,结果取平均值;实际雾霾下的积污样品是瓷绝缘子、玻璃绝缘子和复合绝缘子在雾霾天气频发的河北地区户外 20 m 高压线杆上进行不带电自然雾霾积污。试验线杆周围 10 km 内基本是农田和村庄,积污跟踪期 1 a,在一定时间段分别取出 3 个样品进行盐灰密和绝缘特性测试,盐灰密和表面电阻结果取平均值,泄漏电流数据取统计中位值。



(a) 模拟雾霾环境 (b) 户外自然环境

图3 2种积污环境

Fig.3 Two fouling environments

2 表面污层电阻和泄漏电流与盐灰密的关系

虽然绝缘子的污闪机理比较复杂^[20],但基本过

程都是在绝缘子表面染污后,具有一定的盐灰密,组成特定的污层电阻,并在一定受潮条件下激发泄漏电流的发生发展,最终演变为电弧甚至闪络的过程。由此来看,污秽层的盐灰密、绝缘子的表面污层电阻和泄漏电流在特定条件下具有一定关系。在实际运行中,泄漏电流、污层电导率和盐灰密都是在动态变化;但从静态、宏观角度看,可以在相同的温湿度和受潮状态下,测量三者静态下的宏观定性数据,从而分析染污样品的等效性。

采用局部表面电阻测试法,选取不同位置进行测量,对测量结果进行均值化处理,得到最真实的表面电阻状况。采用数字超高电阻微电流测量仪,把所得到的结果经过 A/D 转换后以数字形成显示出电阻值,测试方式见图 4。

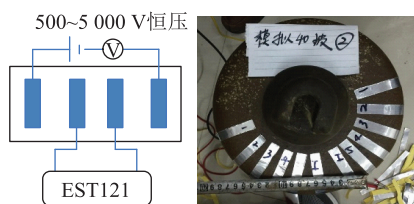


图 4 表面电阻测试方法

Fig.4 Surface resistance test method

泄漏电流采用全电流工频泄漏电流检测法,测试结果因电压、气候、污秽的不同而发生变化,属于动态数据。样品选用常规室温下恒定处理 24 h 以上的样品,测试在干燥环境下进行,尽量排除湿度的影响。

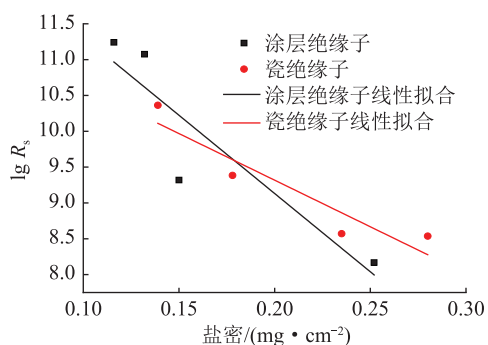
对模拟雾霾和自然雾霾环境下的表面污层电阻、盐密和灰密的变化进行线性拟合,结果如图 5 所示, R_s 为表面污层电阻。

模拟积污下盐密与表面污层电阻的关系比较符合线性规律;而灰密和表面污层电阻的拟合曲线偏离比较大。同时由如图 5(c)可见,灰密分布发散程度较大,没有明显的规律可循,而盐密分布比较紧凑,与表面污层电阻有明显的线性关系,由此可知,盐密是影响表面污层电阻的关键因素,盐密越大,表面污层电阻就越低,盐密能够在一定程度上反映表面污层电阻的降低程度,这也与多个研究文献的结论相吻合^[20-23]。

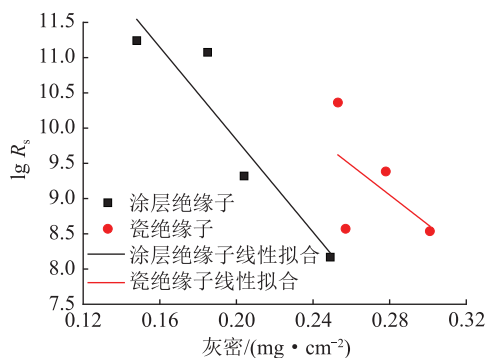
因为泄漏电流是根据施加电压的变化而形成的动态数据,所以假设令:

$$R_x = U/I \quad (1)$$

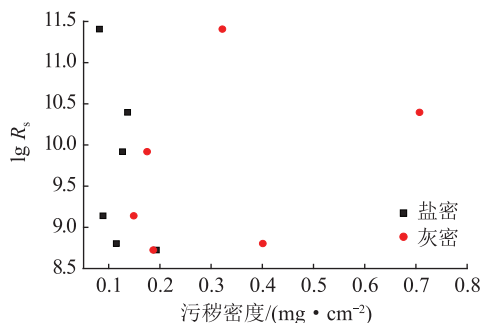
R_x 为施加电压 U 和泄漏电流 I 的曲线的斜率,也可以认为是形成一定泄漏电流时的表观电阻。 R_s 和 R_x 与盐密的关系可通过图 6 表示。可见,当盐密小于 0.15 mg/cm^2 时,绝缘子的 R_s 要高于 R_x ,并且数



(a) 模拟雾霾下积污绝缘子的 $\lg R_s$ 与盐密的关系



(b) 模拟雾霾下积污绝缘子 $\lg R_s$ 和灰密的关系



(c) 自然雾霾下积污绝缘子 $\lg R_s$ 和盐密及灰密的关系

图 5 不同积污环境下 $\lg R_s$ 与盐密及灰密的线性关系

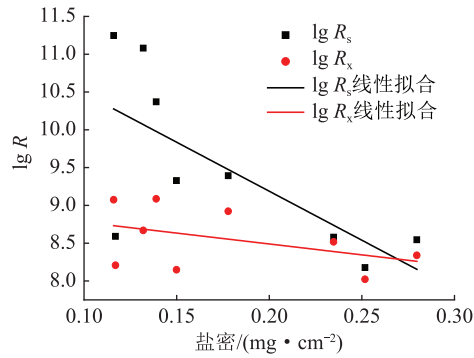
Fig.5 Linear relationship between $\lg R_s$ and equivalent salt deposit density or nonsoluble desposit density under different fouling environments

据离散性较大,此现象的原因在于低盐密的绝缘子表面污秽层较薄,分布不均匀。当盐密大于 0.15 mg/cm^2 时,2 种电阻的测量值逐渐接近,说明在盐密增大后,污层的均匀度增加,2 种测量结果逐渐接近。

综上,对于具有高导电率的雾霾,其能大幅度增加绝缘子表面的盐密,对绝缘子表面污层电阻及泄漏电流等产生较大影响,从而大大降低了设备的绝缘水平。可见,盐密是影响绝缘子绝缘特性的关键因素。

3 盐密和灰密的等效性分析

除了上述表面污层电阻和泄漏电流的测量外,还可通过对比 2 种雾霾环境下的盐密和灰密来考察

图6 不同盐密度下绝缘子的 $\lg R_s$ 与 $\lg R_x$ Fig.6 $\lg R_s$ and $\lg R_x$ of insulators with different ESDD

等效性。图7为不同绝缘子在自然雾霾和模拟雾霾环境下的盐密和灰密随积污时间的变化,盐密用 ρ_{ESDD} 表示,灰密用 ρ_{NSDD} 表示。由图7可见,模拟雾霾环境下积污速率明显高于自然雾霾环境下的积污速率,尤其是盐密。这也说明模拟雾霾环境可以通过加速积污来模拟户外长时间积污的效果。

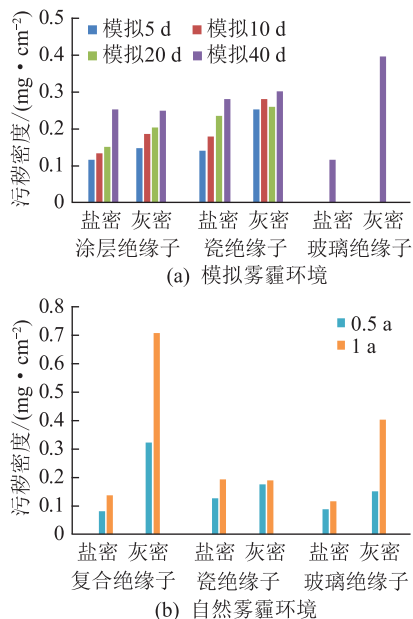


图7 不同积污绝缘子在模拟雾霾和自然雾霾环境下盐密和灰密变化

Fig.7 The variation of ESDD and NSDD of different polluted insulators under simulated fog-haze and natural fog-haze

从图7中还可以看出,积污速率与绝缘子的表面材质有较大关系。从玻璃绝缘子积污情况看,模拟40 d的盐密和灰密积污量与自然雾霾环境下1 a的积污量趋于相同。从瓷绝缘子的积污情况看,模拟积污5 d的盐密和灰密是自然环境下积污0.5 a的盐密和灰密的1.1~1.4倍,模拟积污20 d的盐密和灰密是自然积污1 a盐密和灰密的1.2~1.4倍。从硅橡胶材质的绝缘子积污看,模拟积污5 d的盐

密约是自然积污0.5 a盐密的1.4倍,而灰密是自然积污0.5 a灰密的0.5倍;模拟积污10 d的盐密约等同于自然积污1 a的盐密,而模拟积污10 d的灰密是自然积污1 a灰密的0.3倍。

假设令:

$$K = \rho_{\text{NSDD}} / \rho_{\text{ESDD}} \quad (2)$$

式中: K 为灰盐比。瓷绝缘子在模拟雾霾和自然雾霾的2种环境积污过程中, K 都是由大于1的数逐渐减小,并逐渐趋于1。而硅橡胶材质绝缘子的 K 值在模拟雾霾环境下也近似地由大于1的数逐渐趋于1;但在自然雾霾环境下,瓷和硅橡胶材质绝缘子的 K 值都是逐渐增大,直到为1的几倍。

从上述试验可知,模拟积污下的盐密灰密累积速度明显高于自然条件下的累积速度,体现了模拟积污的加速特征,从积污速率看,2种环境是有差别的。但从积污数量看,模拟雾霾环境下积污5 d的盐密基本能达到户外雾霾环境下积污0.5 a的盐密程度;对于瓷绝缘子,模拟雾霾下积污20 d的灰密相当于户外自然雾霾下积污1 a的灰密程度。

4 等效性分析

通过观察2种雾霾环境下的盐密、表面污层电阻和泄漏电流等影响绝缘性重要参数的对比变化,讨论分析两者的等效性。

4.1 2种雾霾环境盐密度等效性

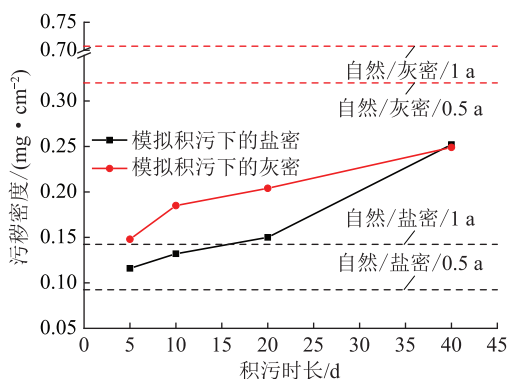
图8为不同绝缘子在2种环境下的盐密和灰密的相关性分析,由图8可见,无论是硅橡胶材质,还是瓷材质,自然积污1 a的盐密值介于模拟积污下10 d和20 d的盐密值之间。这说明该模拟雾霾条件下20 d的绝缘子盐密可代表自然雾霾条件下积污1 a的盐密状态。

4.2 表面污层电阻等效性

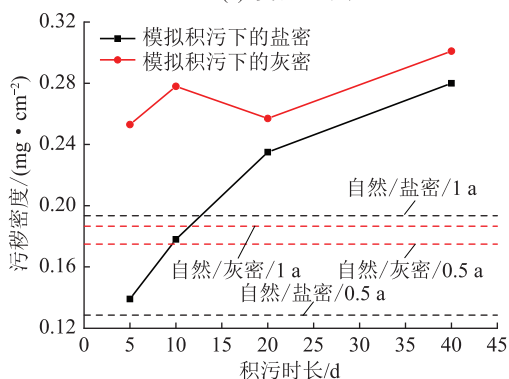
图9为玻璃绝缘子、瓷绝缘子和涂层绝缘子分别在2种雾霾条件下的表面污层电阻对比。玻璃绝缘子的模拟积污样品较少,无法与自然积污样品进行充分对比。但从瓷质绝缘子和涂层绝缘子可以看出,模拟积污样品与自然积污样品的表面污层电阻都随时间而不断下降。2种绝缘子在自然条件下积污1 a的表面污层电阻也恰好介于模拟积污10 d和20 d之间的表面污层电阻,这一点与4.1节中盐密的等效结果一致。因此,从表面污层电阻角度,可以认为模拟积污20 d后的2种绝缘子可以等效代表在某个地区户外1 a内的自然积污状况。

4.3 泄漏电流特征等效性分析

图10为在2种雾霾环境积污下的绝缘子的泄



(a) 复合绝缘子



(b) 瓷绝缘子

图8 不同积污时长的盐密和灰密的变化

Fig.8 The variation of ESDD and NSDD under different durations of contamination

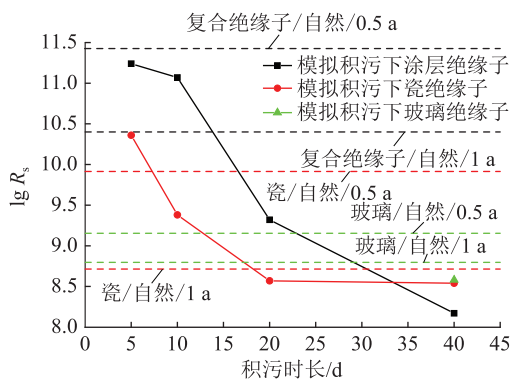
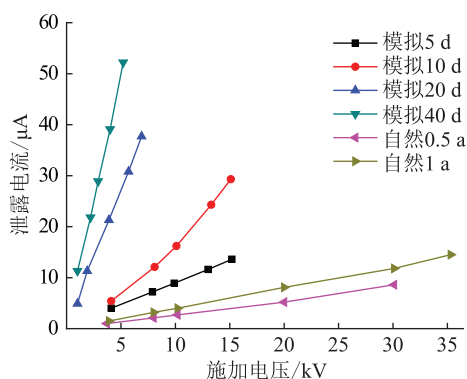


图9 模拟雾霾与自然雾霾积污下绝缘子 $\lg R_x$ 的相关性

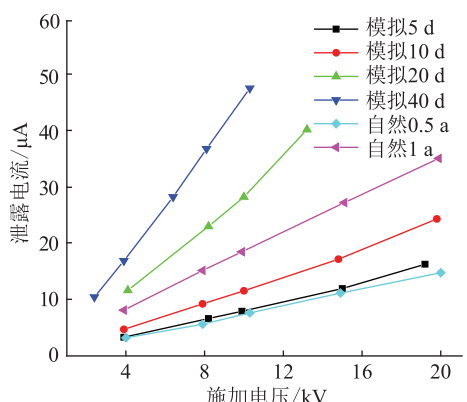
Fig.9 The correlation of $\lg R_x$ of insulators under simulated and natural fog-haze contaminated environments

漏电流变化趋势,由图10可见,无论模拟雾霾还是自然雾霾环境下,硅橡胶材质的绝缘子积污时间越长,泄漏电流与电压的斜率就越大;而且自然雾霾环境下积污的0.5 a和1 a的复合绝缘子泄漏电流斜率都远低于模拟雾霾环境下的。玻璃和瓷绝缘子也具有上述相似的规律。

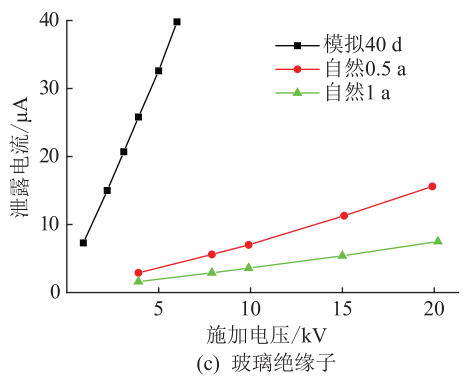
由图11看出,3种绝缘子在2种雾霾环境积污下的 $\lg R_x$ 变化趋势与表面污层电阻一样,都是随着积污时间变长而不断降低。但与表面污层电阻特



(a) 涂层绝缘子和复合绝缘子



(b) 瓷绝缘子



(c) 玻璃绝缘子

图10 在2种环境积污下绝缘子的泄漏电流变化趋势

Fig.10 Leakage current of insulators under two fouling environments

点不同的是,模拟积污下的涂层绝缘子和瓷绝缘子的表面污层电阻之间的差距随积污时间变小,最后趋于相同;而其 $\lg R_x$ 之间的差距随积污时间变长而变大。

等效性分析看,瓷绝缘子自然积污1 a的 $\lg R_x$ 介于模拟下积污10 d和20 d之内,而复合绝缘子自然积污1 a和0.5 a的 $\lg R_x$ 远高于模拟下积污的硅橡胶绝缘子。该结果中硅橡胶材质绝缘子与上述盐密和表面污层电阻的等效性结果不一致,但瓷绝缘子与盐密和表面污层电阻的等效对应结果一致。由此,对于硅橡胶材质绝缘子,影响泄漏电流特性的因素比较复杂,在文中试验中没有得到与盐密一致的对应等效关系。

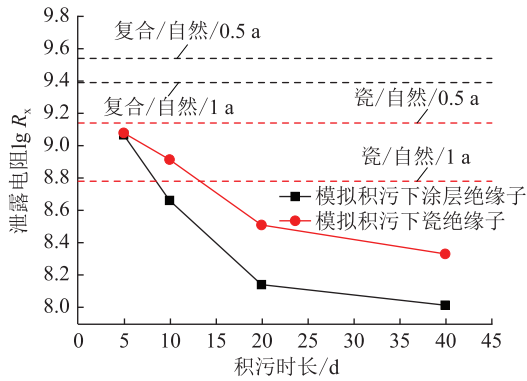


图 11 模拟雾霾和自然雾霾积污下绝缘子 $\lg R_x$ 的相关性

Fig.11 The correlation of $\lg R_x$ of insulators under simulated and natural fog-haze contaminated environments

由此,对于硅橡胶材质绝缘子,当讨论绝缘子静态绝缘特性时,如果只讨论表面污层电阻和盐密和灰密,模拟雾霾下的积污特性可以等效于自然雾霾积污特性,但讨论泄漏电流的动态绝缘特性时,模拟雾霾积污的样品与自然雾霾积污的样品之间难以简单等效对应,需要考虑多种因素影响。

5 结论

通过考察模拟雾霾积污下和自然雾霾积污下各种绝缘子样品的表面污层电阻和泄漏电流特性,来评估模拟雾霾下积污与实际雾霾积污影响的等效关系,结论如下:

(1) 从盐密、灰密和表面污层电阻方面看,模拟雾霾积污和自然雾霾积污具有一定对应关系,即自然雾霾下积污 1 a 的绝缘子相当于模拟雾霾下积污 10~20 d 的绝缘子。

(2) 从泄漏电流特性看,无机瓷绝缘子在模拟雾霾积污与自然雾霾积污样品的泄漏电流特征对应关系与盐密和灰密及表面污层电阻的结果一致,但对于硅橡胶材质,没有获得一致的等效关系,这需要考虑多种因素影响。

(3) 盐密大于 0.15 mg/cm^2 时,绝缘子的表面污层电阻可近似看作泄漏电流斜率的测量值。

由此可见,当涉及表面电阻、盐密和灰密等静态参数时,模拟雾霾下的加速研究结果符合实际雾霾积污的影响特征;但涉及到动态电学研究参数,例如泄漏电流时,需要根据绝缘子材质的不同区分对待。涂层绝缘子和复合绝缘子的模拟雾霾下的泄漏电流特性与实际雾霾环境下的泄漏电流行为不相符。所以,模拟雾霾下的涂层绝缘子和复合绝缘子的泄漏电流特性数据不能直接用于指导实际雾霾环境下的研究工作。

后续将对硅橡胶材质绝缘子的泄漏电流特性在模拟雾霾积污和自然雾霾积污下的等效关系进行系统研究,获得等效规律并确定差异性影响因素。

本文得到南瑞集团有限公司科技项目 (FTZY2-01805, FTZY201902) 资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 蒋兴良,赵世华,毕茂强,等. 污秽绝缘子闪络特性与泄漏电流特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 220-226, 27.
- [2] 李璟延. 污秽绝缘子泄漏电流特性与污秽预警方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2010.
- [3] 陈吉,蒋兴良,陈成瑞,等. 不同试验方式对绝缘子污闪特性的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(6): 241-248.
- [4] 陈吉,蒋兴良,陈成瑞,等. 气压参数对瓷和玻璃绝缘子直流污闪特性影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(1): 187-193.
- [5] 张东东,刘欣,黄宵宁,等. 典型工业粉尘地区复合绝缘子污秽成分及其闪络特性[J]. 电力工程技术, 2022, 41(4): 162-168.
- [6] 苏忠义. 接触网绝缘子泄漏电流与环境因素的关系研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2016.
- [7] 柯睿. 绝缘子泄漏电流影响因素研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2011.
- [8] 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.

- logy, 2013, 37(8):2284-2290.
- [9] 宁博扬, 杨倩倩, 李怀科, 等. 人工雾霾环境下绝缘子的积污特性[J]. 电瓷避雷器, 2017(4):215-220.
NING Boyang, YANG Qianqian, LI Huaik, et al. Contamination characteristics of insulators under artificial fog-haze environment [J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(4):215-220.
- [10] 隆晨海. 雾霾中绝缘子积污特性及其交流放电特性研究[D]. 重庆:重庆大学, 2015.
LONG Chenhai. Study on effect of haze on pollution characteristics and AC discharge performance of insulators[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [11] 徐伟, 路永玲, 唐梦颖, 等. 江苏电网近年雷电活动及输电线路雷击跳闸分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6):106-110.
XU Wei, LU Yongling, TANG Mengying, et al. Analysis of lightning activities and transmission line lightning strike tripping in jiangsu power grid in recent years [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6):106-110.
- [12] 姚文俊, 何正浩, 邓鹤鸣, 等. 模拟雾霾对输电线外绝缘影响的试验研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2015, 34(2):95-99.
YAO Wenjun, HE Zhenghao, DENG Heming, et al. Experimental investigation on influences of external insulation of overhead line in simulated fog-haze environment [J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2015, 34(2):95-99.
- [13] 黄道春, 熊紫腾, 阮江军, 等. 污秽中 CaSO_4 质量分数对瓷绝缘子串泄漏电流特性的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(5):1644-1650.
HUANG Daochun, XIONG Ziteng, RUAN Jiangjun, et al. Influence of CaSO_4 mass fraction in contamination on the leakage current characteristics of porcelain insulator string [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(5):1644-1650.
- [14] 周志成, 赵晨龙, 高高, 等. 绝缘子自然污秽下受潮及导电特性分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(12):3680-3687.
ZHOU Zhicheng, ZHAO Chenlong, GAO Song, et al. Analysis on wetting and conductive properties of natural polluted insulators [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12):3680-3687.
- [15] 刘长义, 王黎明, 刘动, 等. 雾霾参数对绝缘表面等值盐密的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(6):1841-1847.
LIU Changyi, WANG Liming, LIU Dong, et al. Influence of fog-haze parameters on equivalent salt deposit density of external insulation [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6):1841-1847.
- [16] 武山, 吕子峰, 郝吉明, 等. 大气模拟烟雾箱系统的研究进展[J]. 环境科学学报, 2007, 27(4):529-536.
WU Shan, LYU Zifeng, HAO Jiming, et al. Progress in studies of atmospheric simulation smog chamber facility [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(4):529-536.
- [17] 王黎明, 刘动, 陈枫林, 等. 雾霾模拟方法及其装置研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(11):3297-3304.
WANG Liming, LIU Dong, CHEN Fenglin, et al. Simulation method and testing apparatus of fog-haze [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11):3297-3304.
- [18] 张小曳. 中国不同区域大气气溶胶化学成分浓度、组成与来源特征[J]. 气象学报, 2014, 72(6):1108-1117.
ZHANG Xiaoye. Characteristics of the chemical components of aerosol particles in the various regions over China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(6):1108-1117.
- [19] 王建辉, 赵悦菊, 孙伟, 等. 人工模拟雾霾实验及其装置[J]. 环境工程学报, 2017, 11(9):5130-5137.
WANG Jianhui, ZHAO Yueju, SUN Wei, et al. Experiment and its device for artificial simulated fog-haze environment [J]. Chinese journal of Environmental Engineering, 2017, 11(9):5130-5137.
- [20] 郭裕钧. 盘型悬式绝缘子基于污层电阻动态变化的闪络模型研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
GUO Yujun. Study on flashover model on disc suspension insulators based on dynamic variation of pollution layer resistance [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [21] 宋云海. 基于表面电导的绝缘子积污在线监测系统[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
SONG Yunhai. The study base on the insulator pollution deposit on-line monitoring of surface conductance [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
- [22] 韩文奇. 基于泄漏电流的直流绝缘子污闪研究[D]. 大连:大连理工大学, 2011.
HAN Wenqi. The research of DC insulator based on leakage current [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2011.
- [23] 李亚伟, 张星海, 贾志东, 等. 不同覆冰类型绝缘子串的泄漏电流特征分析[J]. 电网技术, 2017, 41(11):3691-3697.
LI Yawei, ZHANG Xinghai, JIA Zhidong, et al. Characteristic analysis of leakage current of insulator strings under different icing types [J]. Power System Technology, 2017, 41(11):3691-3697.

作者简介:



王建辉

王建辉(1982),女,硕士,高级工程师,从事电力外绝缘新材料开发与研究工作(E-mail:2001070010@163.com);

赵悦菊(1982),女,博士,高级工程师,从事电力外绝缘防护材料的开发与应用研究工作;

滕济林(1976),男,硕士,研究员级高级工程师,从事环境及水处理产业开发工作。

Equivalent analysis of contaminations under simulated fog-haze and natural fog-haze

WANG Jianhui^{1,2}, ZHAO Yueju^{1,2}, TENG Jilin^{1,2}, MIAO Wenhua^{1,2}, ZHENG Yongli^{1,2}, YU Baoqing^{1,2}

(1. Beijing Guodian Futong Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211006, China)

Abstract: The uncertainty of haze weather makes it difficult to carry out research on its impact on power equipment. However, whether the research under simulated haze environment is equivalent to that under actual haze weather is related to the guiding value of the research conclusion to the actual work. For this reason, in this paper, the samples are contaminated under simulated haze environment and natural haze environment respectively. By testing the surface contamination layer resistance and leakage current of the contaminated samples under the two environments, the equivalence of the effects of the two environments on insulators is analyzed and discussed. It is found that from the measured data of salt density, ash density and surface pollution layer resistance, the insulators under the two haze environments have an equivalent corresponding relationship, that is, the insulators with pollution accumulation under natural haze for one year are equivalent to those with pollution accumulation under simulated haze for 10-20 days. However, from the perspective of leakage current parameters, composite insulators under the two haze environments are not equivalent, so the conclusion of leakage current under the simulated haze cannot be directly used to guide the actual work.

Keywords: fog-haze; equivalence; pollution accumulation; insulator; surface resistance; leakage current

(编辑 刘晓燕)

(上接第 243 页)

The preparation and performance of silicone rubber clean-repairing agent for power external insulation

GAO Song¹, GAO Chao², SI Nan³, SHI Jinbiao⁴, ZHAO Yueju⁴, WANG Liming⁵

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

3. State Grid Hegang Power Supply Company of Heilongjiang Electric Power Co., Ltd., Hegang 154100, China;

4. Beijing Guodian Futong Science and Development Co., Ltd., Beijing 100070, China;

5. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518000, China)

Abstract: Silicone rubber is widely used in composite insulators and anti-pollution flashover coatings in the power industry. However, after long-term operation, it is prone to aging chalking and dirt deposition, which reduces the surface hydrophobicity. Hundreds of millions of silicone rubber insulators are in service for many years in the power grid, and it is urgent to study a new type of cleaning agent that can remove surface contamination and repair the aging layer of silicone rubber. The effects of different non-ionic surfactant content and repair agent content on cleaning efficiency and hydrophobicity were investigated. Experiments show that when the content of non-ionic surfactant is 3%, the cleaning efficiency is up to 95%. When the content of the repairing agent is 11%, the hydrophobicity is the best, and its hydrophobic migration can reach the HC1 level. Through scanning electron microscopy analysis, it is found that the micropores and cracks on the surface of the silicone rubber disappear after cleaning, and the surface is smooth, indicating that the cleaning agent has the ability of removing the aging layer and contamination, and repairing the aging insulators. This provides a theoretical and practical basis for continuing to develop silicone rubber clean-repairing agents and extending the service life of insulators.

Keywords: silicone rubber composite insulator; anti-pollution flashover; non-ionic surfactant; clean-repairing agent; hydrophobicity; silicone rubber aging

(编辑 刘晓燕)