

雾霾对输变电设备外绝缘特性影响机理综述

胡长猛, 谢从珍, 袁超, 李立涅

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 为深入分析雾霾对外绝缘特性的影响机理, 调研了国内外关于雾霾对输变电设备外绝缘特性的相关研究。从雾霾的形成与沉降、雾霾的模拟、其对输变电外绝缘特性的影响几个方面进行探讨。结果表明: 雾霾主要是由人类活动产生大量的污染物质在一定相对湿度的气象条件下形成的, 雾霾天气下绝缘子放电主要以沿面闪络为主, 雾霾沉积在绝缘子表面或漂浮在绝缘子片间空气间隙中会降低绝缘子的污闪电压。建议在绝缘子分布密集的雾霾天频繁区域加强环保工作, 采取有效措施防止雾霾对输变电设备外绝缘特性的影响, 保证绝缘子安全、可靠、稳定的运行。

关键词: 输变电设备; 雾霾; 外绝缘特性; 沿面闪络; 污闪电压

A review on influence mechanism of haze on external insulation characteristics of transmission and transformation equipment

HU Changmeng, XIE Congzhen, YUAN Chao, LI Licheng

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: To research the effect of haze on external insulation performance in depth, this paper investigates the related results at home and abroad. The formation and sedimentation of haze, the simulation and its influence on power transmission devices external insulation performance are discussed and analyzed. The results show that haze is formed by human activities that produce a large sum of pollutants in a certain wet weather condition, the main discharge sort of insulator is surface flashover, the pollution flashover voltage is well decreased if haze sets onto the insulator surface or floats into the air gap between insulators. So in the area where haze appears frequently and insulators distribute dense, green jobs should be reinforced, and effective measures should be taken to prevent the influence of haze on power transmission devices external insulation performance to ensure insulators run safely, reliably and stably.

Key words: power transmission devices; haze; external insulation performance; surface flashover; pollution flashover voltage

中图分类号: TM85 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0147-08

0 引言

近年来, 由于空气污染造成的雾霾天气在我国频繁出现, 引起人们广泛注意。尤其是在工业发达、人口密集的华北和中东部地区, 雾霾天气出现的频率高, 覆盖的面积广, 不仅危害人们的身体健康, 也严重影响着与人们生活和生产密切相关的输变电设备的外绝缘特性。雾霾沉积在绝缘子表面, 一方面润湿绝缘子表面污秽, 并导致绝缘子表面污秽量增多。另一方面悬浮在绝缘子间空气间隙中畸变绝缘子周围电场。使得绝缘子容易发生污闪放电现象

而引起跳闸事故。自上世纪90年代以来, 我国因雾霾天气引起的输变电设备污闪事故在全国范围内频频发生, 给电网的安全稳定运行带来了严重威胁。如1990年发生在我国持续很久的大雾天气, 导致我国电网中发电厂、变电站和输配电线路累计跳闸次数高达1 049次, 损失电量达31 360 MWh; 1996年发生在华东地区的大雾天气总共导致500 kV和220 kV线路闪络跳闸135次; 2001年大雾导致辽宁电网中线路跳闸总计322次; 2005年珠三角地区出现的雾霾天气, 导致500 kV增莞甲、乙线跳闸7次。全国多处输变电设备因受雾霾天气影响而发生污闪放电现象, 引起跳闸事故, 给电能的输送, 国民的生活与生产造成重大损失^[1-8]。因此, 研究雾霾

对输变电设备外绝缘影响机理,制定高效可行的防污措施,确保电网连续稳定的供电,任重而道远。

本文针对我国部分地区因雾霾天气造成的输变电设备污闪放电现象,深入分析了雾霾对输变电设备外绝缘影响机理,包含雾霾的形成及沉降过程、雾霾的模拟试验以及雾霾对绝缘子污闪电压的影响这三个方面。

1 雾霾的形成与沉降

1.1 雾霾的形成

雾霾是一种融合液态雾和固态灰尘颗粒的多成分混合物。雾是由大量微小水滴浮游在近地面空中形成的一种天气现象;而霾则是指大量极细微的干尘颗粒均匀地悬浮在近地面空中,造成空气普遍混浊的一种天气现象。

雾主要在低空湿度大的地区形成,当低空大气层比较稳定时,空气不易发生对流。低空水汽就会漂浮在近地面区域,不向四周扩散。在一定低温条件下,湿空气就会凝结在低空而形成雾。然而,在通常情况下,影响输变电设备外绝缘特性的自然雾并非是清洁雾,其中既含有吸收了大气中的 SO_2 、 NO_x 等酸性气体形成的“酸雾”,又含有吸收了空气中悬浮的可溶性微粒后形成的“污雾”。

霾的形成渠道广泛,既有来自于自然环境的,如地面扬尘、海洋蒸发以及突发性的自然活动等。又有人为因素造成的,如工业废气排放、汽车尾气排放以及化石燃料燃烧等。而随着经济社会的发展,人类活动对雾霾天气的影响占主导地位^[9]。不仅导致雾霾天气的频繁发生,而且还影响雾霾的组成成分。

雾霾的形成与空气中的气溶胶有直接关系,主要与人类活动密切相关。由工业废气排放、汽车尾气排放以及燃料燃烧所产生的烟尘粒子,通常被称为“一次气溶胶颗粒”,这些颗粒的粒径大,质量浓度高,对霾的形成贡献很大。而排入大气中的废气在自然条件下经一系列化学反应后所产生的“二次气溶胶颗粒”,包括直接由气体形成的气溶胶颗粒、新粒子通过碰撞聚集形成的粒径更大的颗粒以及通过凝结等方式形成的粒径更大的颗粒。这些气溶胶颗粒在一定相对湿度的气象条件下就会积累在低空中形成雾霾^[10-12]。

1.2 雾霾的沉降

雾霾的沉降包括雾的湿沉降和霾的干沉降。雾霾的沉降与大气温度的变化密切相关,在一般情况下,大气温度的垂直于地面的方向上下分层,随着离地面高度的增加而下降,因而使得低空大气温度

较高,高空大气温度较低。但是在秋冬季节,太阳对地面的辐射较弱,气温比较低。尤其是在夜间,大气层的空间分布会越来越稳定而容易出现静稳现象,使得地面辐射强度减弱加剧,近地面低空大气温度下降。而此时,高空大气中冷空气活动还不频繁,温度始终保持在一定水平,这样以来就会在近地面形成逆温层,导致大气层空间分布更加稳定。此时,近地面的空气温度就会降低,大气容易冷凝而形成雾。大气中雾发生在近地层,正好是各种电气外绝缘设备的工作高程。雾在重力的作用下全方位均匀沉积在输变电设备的表面,且附着力远远大于粉尘^[13-14]。

逆温层的形成,使得低空中的霾在垂直方向上的扩散受到影响而被阻滞在低空近地面,逐渐堆积在绝缘设备表面。雾霾一方面沉降在输变电设备表面,不仅使绝缘子表面污秽层被润湿,而且会增加绝缘子表面的污秽含量。另一方面漂浮在绝缘子片间空气间隙中,充当空气间隙放电介质。

2 雾霾的模拟

由于不同地区空气的污染程度不一致,雾霾的组成成分复杂多样,进行真实雾霾环境的模拟难度很大。目前,国内外研究者做了大量的雾霾模拟试验,均以等值盐密为基准,来配置模拟雾霾溶液,使其尽可能接近于真实的雾霾环境。

在我国雾霾天气比较严重的华北地区,以全模拟雾配合盐雾(NaCl)、清洁雾(蒸馏水)以及清水雾进行全方位的比较^[15],全模拟雾以实测雾霾中主要离子(SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 NH_4^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+})及其浓度和比例进行模拟,离子的浓度按雾水的电导率进行分级模拟。而在工业发达、污染严重的华东地区,以影响电导率的主要离子浓度按一定的配比进行模拟,并配合清水雾进行比较。

重庆大学的余德芬等人^[16]按给定 PH 值配置好含有硫酸和硝酸的酸性水溶液模拟酸雾,以相等电导率的氯化钠水溶液模拟盐雾,通过空气压缩机使安装于雾室四角不同高度的 4 只喷枪同时产生冷雾,通过适当调节喷枪安装高度、进气量以及枪口压力来控制改变雾的浓度。

华中科技大学的邓鹤鸣等人^[17]利用不同粒径的水雾、粉煤灰、氧化铁来模拟雾霾天气,为了防止雾霾的弥散,采用由上到下的快速喷入法,并尽量保证模拟雾霾和空气的流量流速保持一致。

总之,雾霾是一种兼液态水和固态颗粒组成的两相混合物。其组分复杂,不同地区的污染程度不一样,雾霾的组分也不尽相同。然而受环境污染的

影响, 液态雾已不再是自然清洁雾, 雾中既有吸收了大气中的 SO_2 和 NO_2 等酸性气体而形成的酸雾, 又有溶入了大气中可溶性烟尘和有机碳氢化合物等细小霾粒子而形成的污雾。而霾则是由悬浮在空气中的灰尘、硫酸以及有机碳氢化合物组成的相对湿度较小的微粒。当雾霾作为一种污秽物进行研究模拟时, 考虑到雾霾中有不溶性颗粒成分, 在以盐密为基准配置雾霾模拟溶液时, 也应该定量评估灰密的影响, 以尽可能接近于真实的雾霾环境。

3 雾霾对输变电设备外绝缘特性的影响

3.1 雾霾天气下绝缘子串放电类型的探讨

发生雾霾天气时, 雾霾可能均匀沉降在绝缘子表面, 润湿绝缘子表面污秽, 增大其表面污秽量, 使其容易发生沿面闪络。也可能漂浮在绝缘子间空气间隙中, 畸变绝缘子空间电场分布, 使其发生空气间隙放电。为了研究雾霾对输变电设备外绝缘特性的影响, 首先需探讨雾霾天气下绝缘子串放电类型。

文献[18]介绍了有关探讨雾霾天气下绝缘子串放电类型的模拟试验, 首先在全模拟雾下对 3 片 XP 型绝缘子串进行染污绝缘子串带并联间隙的放电试验, 经过多次放电试验, 观察到绝缘子串闪络, 而并联间隙未闪络。然而, 在同等条件下将间隙单独置于雾中进行放电试验时, 测得的放电电压大约为绝缘子串闪络放电电压的 2 倍。其次在高电导率盐雾下对间隙单独置于湿雾中进行放电试验, 试验观察到的放电途径为沿着间隙极板的表面。只有当间隙距离调至很小时才会发生空气间隙放电。由此表明, 污秽绝缘子在雾霾天气中的放电是以绝缘子表面的沿面闪络为主, 只有当所加电压很高时, 才可能发生空气间隙的放电。因为污秽绝缘子在严重雾霾天气下极易受潮, 使其表面电导增大, 放电容易发展, 而空气间隙中的放电相对来说不易发展, 放电通道较难形成。

3.2 雾霾对绝缘子表面污秽度的影响

目前, 国内外公认的绝缘子表面污秽成分中, 可溶性污秽成分主要有 CaSO_4 、 CaCO_3 、 NaCl 、 NaNO_3 、 KNO_3 等, 不可溶性污秽成分主要有 SiO_2 、 C 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 等, 其中 CaSO_4 是绝缘子表面污秽成分中占比重最大的成分^[19-24]。

文献[15]介绍了雾霾天气下, 户外绝缘子表面等值盐密的实测实验。由于雾滴重力沉降影响, 绝缘子上表面受雾水的影响程度明显要高于下表面。且其表面染污程度随采样点雾水电导率的不同而各异, 雾水电导率越大, 绝缘子等值盐密增加的幅度就越大。

为模拟高电导率雾霾在绝缘子表面的沉积过程及其对运行中绝缘子污秽度的影响, 文献[15]同时介绍了中国电科院和华北电科院这两个人工污秽试验室的模拟试验。将 XP 型绝缘子置于喷射高电导率 NaCl 盐雾的雾室中施压, 然后测其表面盐密。结果表明, 绝缘子在盐雾中的耐受时间越长, 其表面盐密越大。然而, 在试验初期, 绝缘子上表面盐密高于下表面, 随着试验的进行, 绝缘子上下表面盐密逐渐趋于接近。

文献[25]介绍了采用等值盐密法分析雾霾对现场运行过的复合绝缘子表面积污的影响, 通过测量绝缘子表面盐密和灰密值, 发现在雾霾天气下, 绝缘子表面污秽度会在短时间内显著增加, 其等值盐密、灰密值均随雾霾的脏污程度和雾霾日数的增加而增大。

发生雾霾天气时, 大气中常见的酸性气体 SO_2 和 NO_2 溶入雾水中, 生成 H_2SO_4 、 HNO_3 等物质, 使雾的酸性变强, PH 值减小。进而使雾水中离子含量增多, 雾水电导率增大。高电导率的酸雾沉降在绝缘子表面, 使其表面污秽受潮。当酸雾积累到一定量时, 几乎能够溶解绝缘子表面污秽中的所有成分, 使污秽均匀受潮, 绝缘子表面等值盐密增大。而霾作为一种干粉尘颗粒沉降在绝缘子表面无疑会造成污秽的不断堆积, 使其含量逐渐增加。雾滴在沉降过程中, 逐渐溶解霾中的可溶性成分, 使霾不仅没有得到清除, 反而在绝缘子表面造成了更严重的雾霾污染。总之, 雾霾天气会使绝缘子表面污秽度有所增加。

3.3 雾霾对绝缘子污闪电压的影响

发生雾霾天气时, 雾对绝缘子表面污秽起到润湿的作用, 是污闪的催化剂。而霾沉积在绝缘子表面使绝缘子表面积污加重, 在通常情况下, 纯粹的干污秽对绝缘子沿面闪络电压的影响不大, 因污秽中含有高电导率的溶质, 当与雾作用时, 能使沿面闪络电压降低很多。

雾的主要组成成分是水, 沉积在绝缘子表面会使绝缘子表面污秽均匀缓慢受潮, 当污层被润湿饱和后, 其电导率达到最大值, 此时外绝缘特性下降至最低点。在人工污秽闪络试验中, 使用绝缘子表面污秽物的化学成分实测结果和理论分析的方法进行模拟, 用 NaCl 和 CaSO_4 以不同配比作为污层, 采用升压法对 3 片 XP 型绝缘子串进行加压。分别研究雾水组分、浓度、大气温度以及绝缘子表面污秽层等因素对绝缘子污闪电压的影响。

3.3.1 雾的组分对绝缘子污闪电压的影响

按照雾的组成成分来说, 可以把雾分为清洁雾、

酸雾和污雾。清洁雾是纯天然形成的自然雾，以纯净小水滴的形式降落在绝缘子的上、下表面，类似于凝露的过程，使绝缘子表面污层受潮均匀，其电导率剧增，导致污闪电压急剧下降。

酸雾是雾吸收了大气中的酸性气体(碳氧化物、氮氧化物以及硫氧化物等)后形成的，通常用 pH 值表征酸度^[26]。在人工污秽闪络试验中，以自来水混合一定量的 H₂SO₄ 模拟酸雾。不同盐密下，绝缘子闪络电压随着酸度的增大而降低，用 ΔU_f 表示不同酸度下闪络电压与 pH=7 时的闪络电压相比降低的程度，即：

$$\Delta U_f = \frac{U_{pH=7} - U_{pH=N}}{U_{pH=7}} \times 100\% \quad (1)$$

测得不同盐密下，绝缘子闪络电压随酸度增大而降低的程度如图 1 所示^[27]。

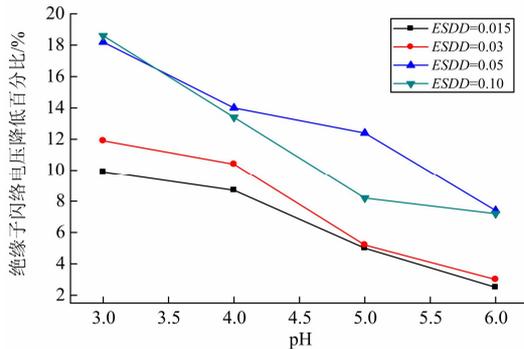


图 1 不同盐密下绝缘子闪络电压随雾水酸度增大而降低的百分比

Fig. 1 Degree of decline of the flashover voltage of insulator with the increase of mist acidity under different ESDD value

绝缘子表面污秽度不同时，其污闪电压随雾水酸度的增大而下降。在轻度酸雾 (pH ≥ 5) 区，污闪电压随酸度的增大而降低的程度较小。在重度酸雾 (pH ≤ 4) 区，污闪电压随酸度的增大而急剧降低。说明了当大气中雾水的 pH 值降到 3~4 时，相当于提高了该地区的污秽等级，酸雾将会使绝缘子的污闪电压急剧下降，更容易导致绝缘子闪络，危害电力系统的安全稳定运行。

污雾就是指现在所谓的雾霾天气，其主要离子成分有 SO₄²⁻、NO₃⁻、NH₄⁺、Ca²⁺、Cl⁻、K⁺、Na⁺、Mg²⁺ 等，以此成分模拟污雾。绝缘子表面盐密取值为 0.043~0.10 mg/cm² 模拟污秽度不同的区域，盐的配比取纯 NaCl 以及 NaCl 和 CaSO₄ 的组合这两种形式。由于污雾中可溶离子的含量是影响输变电设备外绝缘特性的主要因素，而雾水电导率正好反映了雾水中离子的含量^[28]，因此取不同等级电导率的

雾水模拟脏污的程度。测得不同脏污程度下绝缘子闪络电压如图 2 所示^[15]。

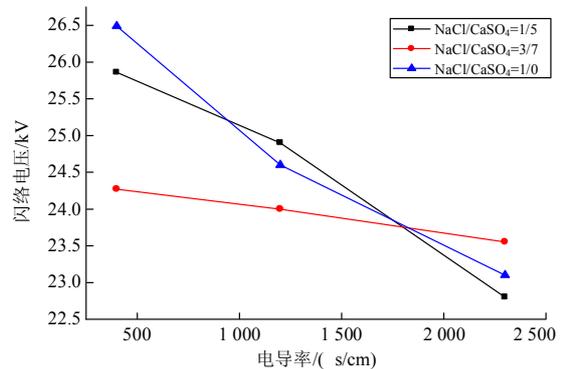


图 2 不同电导率下绝缘子闪络电压值

Fig. 2 Flashover voltage value of insulators in different electrical conductivity

无论绝缘子表面可溶盐组分多大，绝缘子闪络电压随雾水脏污程度的增大而降低得非常明显。当绝缘子表面盐密值较大即可溶盐含量较高时，闪络电压随雾水电导率增加而急剧下降。含高电导率的污雾降至绝缘设备表面，会润湿绝缘子表面可溶性盐，增大绝缘子表面污秽电导率。从而增大了绝缘子的表面电导和泄漏电流，容易引起绝缘子发生沿面闪络^[29-30]。

3.3.2 雾的浓度对绝缘子污闪电压的影响

实测的北京和上海地区变电站周围雾的形成过程表明，自凌晨开始起雾，雾的浓度随时间推移而不断增大，直至清晨六点左右，雾的浓度达到最大值，随后逐渐变小，雾逐渐消散。在雾的形成至消散的过程中，雾水电导率和雾水中可溶性离子的浓度却持续增大^[27]。雾的浓度大时，水汽充沛，能见度低，相对湿度大^[28]，给绝缘子表面污秽提供了润湿的条件，从而会降低污闪电压。

3.3.3 雾霾天大气温度对绝缘子污闪电压的影响

大雾主要发生在秋冬两季，温度较低的清晨。此时，气温最低，雾最浓，是雾水沉降在绝缘子表面的高峰期。随着时间的推移，大气温度在逐渐升高。大雾天常伴随其他气象的发生，在我国北方较寒冷地区，大雾持续常伴随着绝缘子串覆冰，导致绝缘子串发生放电现象。特别是雨后大雾，此时的相对湿度超过 90%，更易造成绝缘子表面大面积覆冰^[31-32]。

3.3.4 雾霾天气下绝缘子表面积污程度对污闪电压的影响

在输变电设备外绝缘表面污秽的评估方案中，通常用等值盐沉积密度作为反映绝缘子表面污秽程

度的特征参数。其具体方法是测量污秽溶解于蒸馏水中的电导率, 换算为相同电导率时溶解于等量蒸馏水中的 NaCl 的质量。

在全模拟雾下进行了绝缘子表面污秽度对污闪特性影响的试验研究, 取 NaCl 和 CaSO₄ 作为污层组分, 试验测得同组分不同盐密的绝缘子在全模拟雾条件下闪络电压值如表 1 所示^[33]。

表 1 同组分不同盐密的绝缘子在全模拟雾条件下的闪络电压值

Table 1 Flashover voltage value of insulator with the same component but different ESDD in full simulation mist	
盐密/灰密/(mg/m ²)	闪络电压值/kV
0.042/0.3	50.80
0.077/0.6	37.60
0.15/1.2	29.58

试验结果表明, 在雾霾天气条件下绝缘子污闪电压随其表面污秽度的增加而降低。而在全模拟雾条件下, 自然污秽绝缘子的闪络试验结果与人工污秽绝缘子的闪络试验的结果基本上一致^[33]。

3.4 雾霾对绝缘子间空气间隙放电的影响

严重的雾霾天气不仅会使绝缘子表面发生沿面闪络现象, 还会造成绝缘子间空气间隙发生放电。雾霾漂流到绝缘子间空气间隙中会畸变空间电场分布, 甚至起到缩短间隙距离的作用, 导致间隙放电电压降低而容易发生放电。

为了研究雾霾对绝缘子放电发展的影响, 华中科技大学的邓鹤鸣等人^[17,34-35]利用水蒸汽、超声水雾以及空气和盐雾的两相混合体对空气间隙进行喷射来模拟雾霾天气, 采用雷电冲击电压分别研究了雾霾粒径、数量、介电常数以及所加电压的极性对击穿电压和放电路径的影响。结果表明:

(1) 当雾霾的粒径<0.01 mm 时, 无论施加电压的极性如何, 雾霾间隙的击穿电压始终比空气间隙的高, 而放电路径选择雾霾的概率<50%。当雾霾的粒径范围为 0.01~0.1 mm 时, 在正雷电冲击电压的作用下, 雾霾间隙的击穿电压比空气间隙的要高, 放电选择雾霾的概率<50%; 在负雷电冲击电压的作用下, 雾霾间隙的击穿电压比空气间隙的要低, 放电选择雾霾的概率>50%。

(2) 无论所加电压极性如何, 在喷射空气和盐雾两相混合体时, 空气间隙的击穿电压比喷射其他类型的雾水时降低得最小, 而喷射雾水时的击穿电压都要明显低于空气间隙的击穿电压。

(3) 当模拟雾霾颗粒的粒径和体积分数一定时, 放电路径选择两相混合体的概率随着雾霾颗粒的介

电常数的增大而增大, 而在负极性雷电冲击电压作用下相对较高。在同等条件下, 放电路径选择雾霾的概率随雾霾颗粒含量的增加而增大。

由此可见, 雾霾会增大绝缘子片间气隙发生击穿的概率。在雾霾天气下, 大气中含有的大量微粒(如 PM2.5、PM10 等)会严重畸变绝缘子片间气隙的电场, 使得空气间隙的击穿场强大大降低, 就增大了绝缘子片间空气间隙击穿的可能性, 从而降低了其放电电压。

雾霾对绝缘子间空气间隙放电的影响源于雾霾颗粒对流注发展的影响, 绝缘子在工作电压下运行时, 雾霾颗粒飘散到绝缘子间空气间隙中不仅会俘获空间中的电子和离子影响碰撞电离的发展, 而且会吸收电离区域内的高能光子, 影响空间的光电离。因此, 当雾霾的粒径较小时, 有雾霾时间隙的击穿电压始终比空气间隙下的高。当雾霾的粒径较大时, 在正雷电冲击电压下, 形成电子崩的电子易于被雾霾颗粒俘获, 不利于电子崩的形成, 从而影响了放电发展。然而在负雷电冲击电压作用下, 电极提供大量电子促进电子崩的形成, 而雾霾颗粒周围的电场畸变也会加快电子崩的形成, 为放电发展提供了良好的条件^[36-37]。

一般情况下, 雾霾初发时间内鲜有出现雾闪事件, 但伴随连续数日的雾霾天气易发生雾闪和湿闪放电事件。雾霾开始形成时, 雾霾颗粒极小, 这将提高雾霾间隙的击穿电压, 不易发生雾闪; 随着雾霾的发展, 后期雾霾与污染物颗粒较长时间共存, 雾霾以污染物微粒为凝结核, 互相碰撞使雾霾微粒直径增大, 而雾霾微粒直径的增大易降低其击穿电压, 这时容易发生雾闪现象。

4 结论

(1) 雾霾主要是由人类活动产生大量的污染物在一定相对湿度的气象条件下形成的, 发生雾霾天气时, 雾沉降在绝缘子表面润湿绝缘子表面污秽, 是污闪的催化剂。而霾沉降在绝缘子表面会造成污秽的不断堆积, 因污秽中含有大量可溶性离子, 与雾结合后, 能使绝缘子沿面闪络电压降低很多。另一方面, 雾霾漂流到绝缘子间空气间隙中会畸变空间电场分布, 甚至起到缩短间隙距离的作用, 导致间隙放电电压降低而容易发生放电。

(2) 国内外的研究工作者进行雾霾的模拟试验, 均结合实测雾霾的组成成分, 以等值盐密为基准配置雾霾的模拟溶液, 并定量考虑灰密的影响, 适当加入不可溶盐, 以尽可能接近于真实的雾霾环境。

(3) 输变电设备外绝缘特性受雾霾的组分、浓

度、大气温度以及绝缘子表面积污程度的影响。其中雾霾中可溶性离子含量对外绝缘特性的影响最为显著, 直接决定雾水电导率和 pH 值, 从而影响绝缘子的污闪电压。无论绝缘子表面盐密和灰密的比例如何, 绝缘子串的污闪电压随雾水电导率的增大而减小。清洁绝缘子和染污绝缘子的闪络电压均随酸雾 PH 值的减小而下降。但清洁绝缘子的闪络电压随 PH 值的减小而下降的幅度更大。因此在输变电设备分布密集的区域, 建议加强环保工作, 从根本上防止雾霾对输变电设备外绝缘特性的影响。

(4) 雾霾对绝缘子间空气间隙放电的影响源于雾霾颗粒对流注发展的影响, 主要与雾霾粒径、浓度和介电常数等因素有关。当雾霾颗粒较小时, 绝缘子片间间隙的击穿电压会增大, 随着雾霾的发展, 雾霾的粒径会增大, 从而降低间隙的击穿电压, 容易发生放电现象。因此, 在雾霾发生的初期, 抓住时机, 采取有效措施(如适当增大绝缘子间距、加装屏蔽层等)可减少雾霾引起绝缘子间空气间隙放电现象的发生, 保证绝缘子安全、稳定运行, 确保电网连续、安全供电。

参考文献

- [1] 吴兑. 大城市区域霾与雾的区别和灰霾天气预警信号发布[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(9): 1-7.
WU Dui. Distinction between haze and fog in urban metropolitans and hazy weather warnings[J]. Environmental Science & Technology, 2008, 31(9): 1-7.
- [2] 熊兰, 刘钰, 姚树友, 等. 污秽绝缘子紫外在线监测系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 186-191.
XIONG Lan, LIU Yu, YAO Shuyou, et al. Ultraviolet on-line monitoring system for contaminated insulators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 186-191.
- [3] 宿志一. 防止大面积污闪的根本出路是提高电网的基本外绝缘水平—对我国电网大面积污闪事故的反思[J]. 中国电力, 2003, 36(12): 57-61.
SU Zhiyi. To intensify basic external insulation level of power system-fundamental way for prevention of large-scale pollution flashover[J]. Electric Power, 2003, 36(12): 57-61.
- [4] 刘兆林. 1996 年末华东电网雾闪故障分析及对策[J]. 电网技术, 1997, 21(8): 63-66.
LIU Zhaolin. Analysis of fog flashover faults in east china power system at the end of 1996 and its counter measures[J]. Power System Technology, 1997, 21(8): 63-66.
- [5] 范莉, 夏非, 苏浩益, 等. 基于云理论的高压绝缘子污秽状态风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 57-62.
FAN Li, XIA Fei, SU Haoyi, et al. Risk assessment of high voltage insulator contamination condition by cloud theory[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 57-62.
- [6] 蚁泽沛. 高压输电线路空气放电机理及其对策[J]. 广东电力, 2005, 18(6): 15-18, 27.
YI Zepei. Mechanism and solution of air discharge on HV transmission lines[J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18(6): 15-18, 27.
- [7] 段涛, 罗毅, 施琳, 等. 计及气象因素的输电线路故障概率的实时评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 59-67.
DUAN Tao, LUO Yi, SHI Lin, et al. A real-time fault probability evaluation model of transmission line considering meteorological factors[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 59-67.
- [8] 周兴韬, 王伟, 倪平浩, 等. 高压绝缘子污秽泄漏电流采集装置的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 100-104.
ZHOU Xingtao, WANG Wei, NI Pinghao, et al. Design and implementation of a device for acquiring leakage current on polluted high voltage insulator[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 100-104.
- [9] 周广强, 陈敏, 彭丽. 雾霾科学监测及其健康影响[J]. 科学, 2013, 65(4): 56-59.
ZHOU Guangqiang, CHEN Min, PENG Li. Haze monitoring and its influence on health[J]. Science, 2013, 65(4): 56-59.
- [10] ZHANG X Y, WANG Y Q, LIN W L, et al. Changes of atmospheric composition and optical properties over Beijing 2008 Olympic Monitoring Campaign[C] // BAMS, 2009: 1634-1651.
- [11] 李晓颖, 姬丽芬, 李宁. 大气中 PM2.5 来源、危害及防治对策[C] // 中国环境科学学会学术年会论文集, 2013: 4378-4380.
LI Xiaoying, JI Lifen, LI Ling. The source, harm and preventive countermeasures of PM2.5 in the air[C] // Monograph of Academic Annual Conference Held by Chinese Society for Environmental Science, 2013: 4378-4380.
- [12] 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 我国雾霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
ZHANG Xiaoye, SUN Junying, WANG Yaqiang, et al. Factors contributing to haze and fog in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [13] YANG Weifen, YAN Yin, KUI Chen, et al. The

- characteristics and source of elemental composition in fine particles during haze days in autumn in Nanjing[C] // IEEE International Conference on Environmental Science and Information Application Technology, Wuhan: IEEE, 2009: 128-131.
- [14] 魏嘉, 吕阳, 付柏淋. 我国雾霾成因及防控策略研究[J]. 环境保护科学, 2014(5): 51-56.
WEI Jia, LÜ Yang, FU Bailin. Research on cause of fog-haze and prevention strategies[J]. Environmental Protection Science, 2014(5): 51-56.
- [15] 张开贤, 俞燮根, 宿志一. 湿沉降对输变电设备染污及放电的影响[J]. 中国电力, 1997, 30(11): 3-7.
ZHANG Kaixian, YU Xiegen, SU Zhiyi. The effect of wet precipitation on the pollution and discharge of transmission and substation equipment[J]. Electric Power, 1997, 30(11): 3-7.
- [16] 余德芬, 孙才新, 顾乐观, 等. 酸性湿沉降对绝缘子闪络特性影响的表征量研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 15-19.
YU Defen, SUN Caixin, GU Leguan, et al. The research to token on flashover characteristics of insulator in the acid wet precipitation[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 15-19.
- [17] 邓鹤鸣, 何正浩, 许宇航, 等. 雾霾对冲击放电路径影响特性的分析[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2669-2673.
DENG Heming, HE Zhenghao, XU Yuhang, et al. Effects of haze environment on discharge path under lightning impulses[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11): 2669-2673.
- [18] 王天君, 张开贤, 尚春. 盐雾下瓷绝缘子放电试验研究[J]. 华北电力技术, 2000(1): 17-19.
WANG Tianjun, ZHANG Kaixian, SHANG Chun. Test and approach on ceramic insulators discharging in salt spray[J]. North China Electric Power, 2001(1): 17-19.
- [19] 宿志一, 刘燕生. 我国北方内陆地区线路与变电站用绝缘子的直、交流自然积污试验结果的比较[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 13-17.
SU Zhiyi, LIU Yansheng. Comparison of natural contaminants accumulated on surfaces of suspension and post insulators with DC and AC stress in northern China's inland areas[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 13-17.
- [20] 关志成, 张仁豫, 薛家麒. 自然污秽可溶盐构成及其对污闪电压值的影响[J]. 电瓷避雷器, 1989(6): 13-18.
GUAN Zhicheng, ZHANG Renyu, XUE Jialin. Study on the influence of soluble natural contamination on the voltage of contamination flashover[J]. Insulators and Surge Arresters, 1989(6): 13-18.
- [21] 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.
ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, SUN Caixin. Present situation and prospect of research on flashover characteristics of polluted insulators[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 35-40.
- [22] 刘焜, 王少俊, 范立群. 硫酸钙对ESDD贡献的定量分析与验证[J]. 高电压技术, 2005, 31(2): 9-12.
LIU Yu, WANG Shaojun, FAN Liqun. Quantitative analysis and verification on the contribution of CaSO₄ to equivalent salt deposit density[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(2): 9-12.
- [23] 宿志一. 换流站直流绝缘子自然积污特性与直交积污比[C] // 中国电机工程学会高压专委会 2007 年学术年会论文集, 深圳: 中国电机工程学会, 2007: 281-290.
SU Zhiyi. Natural pollution characteristics and pollution ratio between DC and AC of DC insulators in convert station[C] // Monograph of academic annual conference held by Chinese Society for Electrical Engineering in 2007, Shenzhen: Chinese Society for Electrical Engineering, 2007: 281-290.
- [24] 阎东, 卢明, 张亚鹏. 500 kV 获仓线污闪故障分析[J]. 高电压技术, 2006, 32(10): 138-140.
YAN Dong, LU Ming, ZHANG Yapeng. Analysis of pollution flashover fault on 500 kV Huocang transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(10): 138-140.
- [25] 李永刚, 黄成才, 汪佛池, 等. 雾霾天气对复合绝缘子运行性能的影响[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1792-1797.
LI Yonggang, HUANG Chengcai, WANG Fochi, et al. Influences of haze weather on operating performance of composite insulators[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1792-1797.
- [26] 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]. 电磁避雷器, 2010(6): 1-6.
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): 1-6.
- [27] 舒立春, 孙才新, 毛国志, 等. 酸雾中染污绝缘子的交流闪络特性[J]. 高电压技术, 1995, 21(3): 18-21.
SHU Lichun, SUN Caixin, MAO Guozhi, et al. AC flashover performance of polluted insulators under acid fog condition[J]. High Voltage Engineering, 1995, 21(3): 18-21.
- [28] JIANG Xingliang, ZHAO Shihua, XIE Yanbin, et al. Study on fog flashover performance and fog-water

- conductivity correction coefficient for polluted insulators [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(2): 145-153.
- [29] WILLIAMS L J, KIM J H, KIM Y B. Contaminated insulators-chemical dependence of flashover voltages and salt migration[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, 93(5): 1572-1580.
- [30] 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.
ZHANG Zhijing, ZHANG Dongdong, LIU Xiaohuan, et al. Effect of pollution compositions on the AC flashover performance of LXY₄-160 suspension glass insulator string[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 298-305.
- [31] 周国华, 杨志勇, 米康民. 影响输变电设备污闪的气象条件分析[J]. 山西电力技术, 2001(1): 17-19.
ZHOU Guohua, YANG Zhiyong, MI Kangmin. Analysis on atmosphere conditions influencing lightning caused by pollution of transmission and substation equipment[J]. Shanxi Electric Power, 2001(1): 17-19.
- [32] 刘毓, 蒋兴良, 舒立春, 等. 复合绝缘子伞裙结构特征参数对其冰闪特性的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29(8): 319-326.
LIU Yu, JIANG Xingliang, SHU Lichun, et al. Influence of characterizing shed configuration parameters of composite insulators on icing flashover performance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(8): 319-326.
- [33] 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.
- [34] 邓鹤鸣, 何正浩, 王蕾. 混合两相体对放电路径选择的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(12): 2681-2686.
DENG Heming, HE Zhenghao, WANG Lei. Effect of two phase mixtures on the selection of the discharge path[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(12): 2681-2686.
- [35] 马军. 模拟雾霾对输电线外绝缘的影响及监测装置的设计[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
MA Jun. Effects of simulated haze environment on external overhead line insulation and design of monitoring system[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012.
- [36] ABRAHAM A P, PRABHAKAR B R. Effect of humidity and temperature on the DC breakdown of rod-rod and rod-plane gaps[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(2): 207-213.
- [37] 张军, 何宏舟, 郑捷庆. 静电雾化过程中雾滴空间电荷密度的实验测试[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(12): 2064-2067.
ZHANG Jun, HE Hongzhou, ZHENG Jieqing. Measurement of spatial charge density of droplets for an electrostatic spray[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(12): 2064-2067.

收稿日期: 2014-10-09; 修回日期: 2015-04-09

作者简介:

胡长猛(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为输电线路在线监测。E-mail: hu.cm@mail.scut.edu.cn

(编辑 葛艳娜)