

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

殷琼¹, 陈原²

- (1. 华北电网有限公司, 北京市 宣武区 100053;
2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京市 西城区 100045)

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

YIN Qiong¹, CHEN Yuan²

- (1. North China Electric Power Grid Co., Ltd., Xuanwu District, Beijing 100053, China;
2. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Xicheng District, Beijing 100045, China)

ABSTRACT: There are two basic and conventional contamination accumulation modes, one is the common slow contamination accumulation and the other is a sea fog type of rapid contamination accumulation with high conductivity that naturally takes place in coastal areas. Besides, in inland areas there is a kind of rapid contamination accumulation mode related to human activity that possesses high conductivity and is attended by the polluted rainfall or snowfall processes. In this paper the rapid contamination accumulation is researched systemically and it is pointed out that in the current pollution flashover standards and measures mainly based on the concept of slow contamination accumulation the hydrophobicity of external insulation products which are made of silicon rubber is emphasized, however, the effect of insulator shape, especially the effect of insulator shape in the prevention of pollution flashover caused by rapid contamination accumulation, is disregarded in a certain extent. Meanwhile, it is also pointed out that on the basis of the structure of existing post insulators for substation equipments, each of them consists of sheds with two different diameters as well as the sheds with larger diameter and those with smaller diameter are alternatively arranged, it will be an effective measure for the prevention of the pollution flashover caused by rapid contamination accumulation to further reasonably increase the diameter of the sheds with larger diameter; as a temporary and remedial product, the specification of auxiliary anti-pollution-flashover shed should be established to provide a means with extensive versatility to prevent pollution-flashover caused by rapid contamination accumulation and enhance the comprehensive

anti-pollution-flashover ability of power equipments.

KEY WORDS: rapid contamination accumulation; slow contamination accumulation; insulator; hydrophobicity; auxiliary anti-pollution-flashover shed

摘要: 在常规的缓慢积污和沿海的、自然的、高导电性的海雾型快速积污 2 种基本积污形式之外, 内陆地区出现与人类活动相关的、高导电性的降水降雪型快速积污。文章系统地研究了上述快速积污, 指出主要基于缓慢积污概念提出的现行防污闪标准和措施强调硅橡胶外绝缘产品的憎水性, 但在一定程度上忽视了绝缘子外形的作用、特别是外形对于快速积污型污闪的防治作用; 在现有支柱绝缘子和套管的大小伞结构基础上进一步合理增加大直径伞裙是防治快速积污型污闪的有效措施; 应全面规范临时性、补救性产品——防污闪辅助伞裙, 为防治快速积污型污闪、提高设备综合抗污闪能力提供一种具有广泛通用性的手段。

关键词: 快速积污; 缓慢积污; 绝缘子; 憎水性; 防污闪辅助伞裙

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, 这类污秽一般对应于沿海区域的快速积污。

输变电设备污闪须具备污秽条件和潮湿条件 2 大要素。中国电力系统广泛采用的防污闪标准主要

是基于缓慢积污的概念制订的，相应的防污闪措施也是主要针对缓慢积污形式设计的^[1-3]。缓慢积污指绝缘子表面的污秽是经过一个相对较长的积累过程逐渐形成的，如文献[4]规定的一年积污期和文献[5]规定的三年积污期；绝缘子污闪所需的潮湿条件由降水(雾、雨、露、冰、雪等)提供，通常认为降水由地面水蒸发形成，因此其污秽含量较低。缓慢积污型污闪的污秽条件和潮湿条件是分先后具备的，防治缓慢积污闪络的最有效措施是采用硅橡胶类外绝缘产品(包括复合绝缘子、防污闪涂料等)。由于污秽是缓慢积累形成的，因此硅橡胶材料可在潮湿条件到来之前使污秽具备憎水性，即通过改变表面性能使绝缘子具备优良的抵御缓慢积污型污闪的能力。

与缓慢积污相对应的快速积污通常指沿海的、自然的、海雾型污秽，但近年来内陆重污区频繁发生快速积污、特别是快速积污伴随快速受潮导致的严重污闪掉闸，如2005年4月大同二电厂500 kV升压站2台设备污闪、2006年3月500 kV霸州变电站6台设备(避雷器和CVT)污闪。在长时间无降水条件下，大气中的污染物逐渐增多，随后的第一场降水降雪将空气中的污染物大量带落，使原本洁净的雨雪尚未落地已成为夹带大量污秽的脏雨脏雪，如北京曾在长时间无降水后出现的泥雨。尽管上述绝缘子配置(3级的基本爬距喷涂防污闪涂料)能够轻松耐受4级以上的缓慢积污型污秽条件，但脏雨脏雪落下导致绝缘子表面在短时间内快速积污且严重受潮，并在风力作用下沿绝缘子迎风侧形成连续积雪，最终引发污闪。上述可出现在内陆地区的、与人类活动相关的降水降雪型快速积污虽然与海雾型快速积污具有相似的特征——均为高导电性液体，但这种快速积污却是环境污染严重国家和地区的特有现象，该现象暴露了现行防污闪标准

和措施的局限性，且一定程度上比海雾型快速积污更具危害性。在环境不能有效改善的较长一段时期内，这种快速积污型污闪将有增长趋势。

1 试验研究

1.1 覆雪快速积污闪络模拟试验

以常规的大小伞支柱瓷绝缘子、由支柱瓷绝缘子与大盘径硅橡胶伞裙构成的硅橡胶伞裙绝缘子、由支柱瓷绝缘子与防污闪涂料相结合构成的防污闪涂料绝缘子为试品，模拟下述最严酷的快速积污伴随快速受潮状态，试验研究不同形式绝缘子和外绝缘产品承受快速积污闪络的能力：①以重污区且长时间干燥天气之后的第一场降雪为研究对象。降雪直接带落大气中的污染物，尚未落地已成为高导电性脏雪(1 000~2 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$)，且降雪比降水难流失，大量积累于绝缘子表面，导致绝缘子快速积污同时严重受潮。②取一定风速条件下的降雪为研究对象，风力使绝缘子迎风侧更快更多地积累水分与污秽。③取支柱绝缘子或套管作为研究对象，站用绝缘子伞间距和伞伸出相对较小且平均直径大，积雪易形成连续状态。图1为支柱瓷绝缘子和硅橡胶伞裙绝缘子试品示意图，其中 L 为间距。图2为支

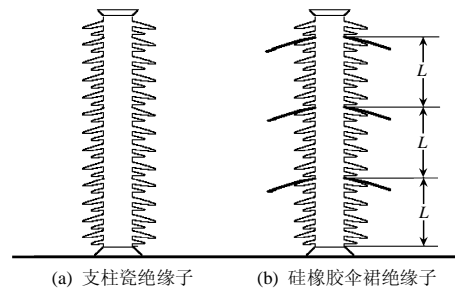


图1 支柱瓷绝缘子和硅橡胶伞裙绝缘子试品示意图
Fig. 1 Configuration of porcelain post insulator and silicone rubber shed insulator

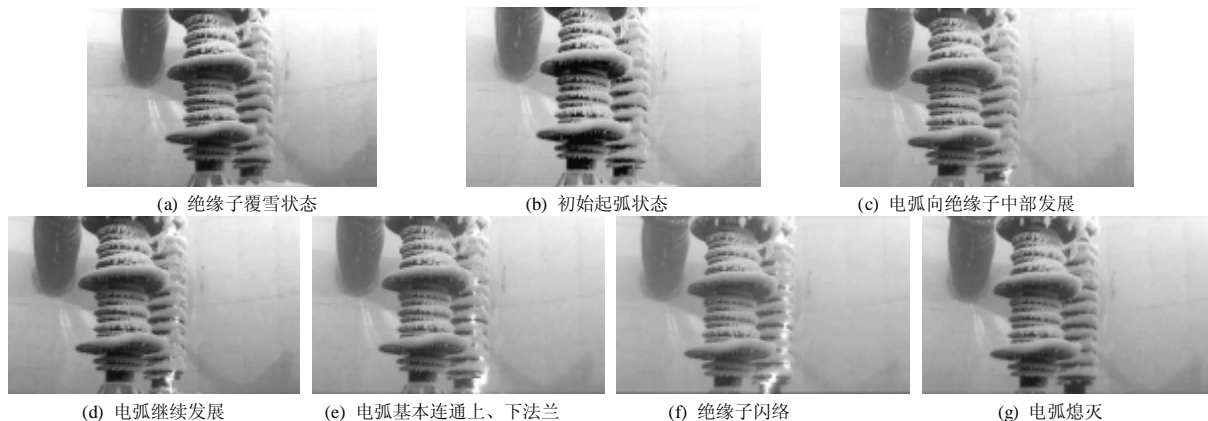


图2 覆雪快速积污闪络试验过程
Fig. 2 The process of fast-pollutant-accumulation flashover test

柱瓷绝缘子和硅橡胶伞裙绝缘子试品在相同覆雪条件下的覆雪效果以及积雪融化、绝缘子闪络过程。图 2(a)为支柱瓷绝缘子和硅橡胶伞裙绝缘子在相同覆雪条件下的覆雪效果,其中支柱瓷绝缘子迎风侧积雪形成连续状态,硅橡胶伞裙绝缘子上的积雪被伞裙有效隔断。图 2(b):温度升高,积雪开始融化,支柱瓷绝缘子下法兰出现电弧且伴随明显放电;硅橡胶伞裙绝缘子无明显放电。图 2(c):电弧由支柱瓷绝缘子上、下法兰向绝缘子中部发展;硅橡胶伞裙绝缘子无明显放电。图 2(d):支柱瓷绝缘子的电弧继续发展;硅橡胶伞裙绝缘子无明显放电。图 2(e):支柱瓷绝缘子的电弧基本连通上、下法兰;硅橡胶伞裙绝缘子无明显放电。图 2(f):支柱瓷绝缘子闪络;硅橡胶伞裙绝缘子无明显放电。图 2(g):支柱瓷绝缘子闪络后电弧熄灭。

试验表明:防污闪涂料等硅橡胶类外绝缘产品通过将绝缘子表面的亲水性变为憎水性,可有效抑制常规的缓慢积污型污闪,但对于快速积污、特别是快速积污伴随快速受潮型污闪则作用有限,这是由于硅橡胶材料的憎水性难以在短时间内迁移至快速积累的污秽,即对于快速积污型污闪,硅橡胶表面与瓷表面已无显著区别。事实上,外形相同的支柱瓷绝缘子和防污闪涂料绝缘子的脏雪积累过程无明显差异,均在迎风侧形成连续覆雪状态,且在融雪过程中经历了相似的放电过程并最终发生闪络。与常规缓慢积污型污闪不同的是:①常规污闪中电弧主要沿绝缘子表面发展,即污闪所需污秽条件主要来自绝缘子表面;而覆雪快速积污型污闪的电弧主要沿积雪发展,即污秽条件主要来自脏雪。②合理改善绝缘子外形是防治快速积污型污闪的最佳途径,但现有标准^[6]规定的采用大小伞、控制伞伸出、伞间距等参数获得的绝缘子外形仍以抑制缓慢积污型污闪为主要目的,在快速积污伴随快速受潮条件下仍具有一定的污闪概率。③在常规大小伞结构基础上进一步合理增加大盘径伞裙是防治快速积污闪络的有效措施。大盘径硅橡胶伞裙与绝缘子的瓷伞裙尺寸相差悬殊,能够有效隔断积雪和电弧,防止发生快速积污型污闪。

一段时期以来,京津唐、华北以至全国电网将外绝缘防污闪工作的重点较多地放在以硅橡胶外绝缘产品防治常规的缓慢积污型污闪上,更多地强调憎水性的作用,在一定程度上忽略或放松了绝缘子外形的防污闪作用^[7-9],忽略了常规污闪以外的污闪形式。上述覆雪快速积污闪络试验较真实地再现了

2005年4月大同二电厂升压站及2006年3月霸州变电站的污闪过程,验证了高导电性降水降雪型快速积污闪络形式的存在及其对电网安全运行的危害。虽然试验中采用了完全的快速积污型污秽条件,而在实际运行中往往是缓慢积污与快速积污条件并存,但由于频繁出现以快速积污型条件占主导地位的污闪实例,且今后较长一段时期内国内环境污染难以彻底改善,因此快速积污型污闪已不可忽视。

1.2 缓慢积污型污闪试验和湿闪试验

1.1节提出以大盘径伞裙合理改善绝缘子外形,可有效提高绝缘子耐受快速积污型污闪的能力。本节将进一步研究以硅橡胶材质的大盘径伞裙和防污闪涂料耐受常规的缓慢积污型污闪及湿闪(雨闪)的能力,以全面掌握不同产品对不同闪络形式的防治效果,以期为针对不同污秽类型合理选择外绝缘产品、设计防污闪措施奠定基础。

试验表明,不同外绝缘产品对不同闪络形式的抑制效果差异显著:①防污闪涂料对于常规污闪的抑制作用明显高于大盘径伞裙。在某相同试验条件下,涂料提高瓷绝缘子污闪电压的幅度为104%~125%,伞裙仅提高28%~41%,采用伞裙与涂料的组合方式提高127%~183%。②大盘径伞裙对于湿闪的抑制作用明显高于防污闪涂料。在某相同试验条件下,伞裙提高瓷绝缘子湿闪电压的幅度约为20%,而涂料基本不具有提高湿闪电压的作用。

综合1.1和1.2节的内容,可得出如下结论:①常规的缓慢积污型污闪与绝缘子表面状态关系密切,因此防污闪涂料通过将绝缘子表面的亲水性变为憎水性,能大大提高绝缘子耐受缓慢积污型污闪的能力。②快速积污型污闪、大雨和暴雨闪络与绝缘子表面状态的关系相对较弱,而与绝缘子外形的关系相对密切,因此以大盘径伞裙合理改善绝缘子外形,使相邻大盘径伞裙的间距足够大且大盘径伞裙与常规伞裙的伞伸出之差足够大,能够显著提高绝缘子耐受快速积污型污闪、大雨和暴雨闪络的能力。③在支柱绝缘子、套管等电站设备绝缘子上合理安装大盘径伞裙并同时使用防污闪涂料,能够大幅度提高设备防止缓慢积污型污闪、快速积污型污闪、大雨和暴雨闪络的综合能力。

1.3 防污闪辅助伞裙的规范化

1.3.1 概述

合理采用大盘径伞裙是抑制快速积污型污闪的有效措施。对于运行中的大量电站设备绝缘子(包

括支柱绝缘子、套管等), 必须在后期补装大盘径伞裙; 对于尚未出厂或尚未制作完成的绝缘子, 可以考虑在出厂前制成大盘径伞裙, 但事实上由于大盘径伞裙与常规伞裙尺寸相差悬殊, 即使在工厂也难以直接制成带大盘径伞裙的瓷质支柱绝缘子或套管。而若在后期安装大盘径伞裙, 最佳选择应是硅橡胶防污闪辅助伞裙, 该产品一方面已具有一定的运行经验, 另一方面具有较好的通用性。但要使防污闪辅助伞裙成为一种广泛应用的防治快速积污闪络的产品, 必须对其进行全面规范, 具体应解决 3 个问题: 防污闪辅助伞裙导致的绝缘子电位分布畸变; 防污闪辅助伞裙的机械支持性能; 防污闪辅助伞裙作为临时性、补救性产品的定位。

1.3.2 绝缘子电位分布的畸变

防污闪辅助伞裙的使用长期以来存在争议, 原因之一是硅橡胶伞裙可导致瓷绝缘子轴向电位分布严重畸变, 而电位分布畸变可导致避雷器放电电压降低、测量设备 CVT、CT 精度下降等不良后果。

部分研究单位的试验表明: 瓷质支柱绝缘子及套管安装硅橡胶伞裙前后, 电位分布无明显变化。这是因为该结论均为绝缘子干燥状态下的试验结果, 而干燥状态下绝缘子表面的电阻整体上较高, 因此电位分布主要由绝缘子各部分的本体电容和绝缘子各部分的对地电容决定。由于硅橡胶伞裙电容很小, 安装后对绝缘子的整体电容影响不大, 因此干燥状态下硅橡胶伞裙不会造成绝缘子电位分布的显著变化。

事实上, 在瓷绝缘子表面严重污染且湿润条件下, 硅橡胶伞裙是能够导致绝缘子电位分布畸变的。图 3、4 分别为安装硅橡胶伞裙前后的 110 kV 支柱瓷绝缘子的轴向电位分布曲线, 其中图 3 为表面干燥条件下的曲线(即正常状态曲线), 图 4 为表面严重污染且湿润条件下的曲线。图 3、4 横坐标右侧为高压侧。由图 3、4 可知, 安装硅橡胶伞裙且表面湿润条件下电位分布发生畸变。这是因为在

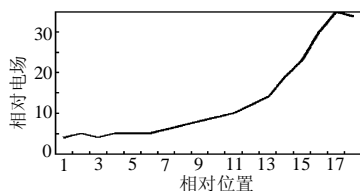


图 3 110 kV 支柱瓷绝缘子表面干燥条件下的轴向电位分布

Fig. 3 Electric strength distribution of 110 kV porcelain post insulator in dry condition

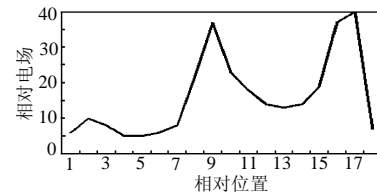


图 4 安装 3 片硅橡胶伞裙的 110 kV 支柱瓷绝缘子表面湿润条件下的轴向电位分布

Fig. 4 Electric strength distribution of 110 kV porcelain post insulator with three silicone rubber sheds in moist condition

污秽且湿润状态下, 瓷表面电阻大幅度下降, 因此绝缘子的电位分布主要由绝缘子各部分的表面电阻决定。无硅橡胶伞裙的绝缘子表面均为瓷质, 湿润条件下表面电阻整体下降, 因此电位分布仍能保持相对均匀; 安装硅橡胶伞裙的绝缘子大部分表面仍为瓷质, 但少数部位已成为硅橡胶表面, 潮湿条件下瓷表面部分的电阻大幅度下降, 而憎水性的硅橡胶表面仍保持良好的绝缘性能, 因此干燥条件下由整支绝缘子承受的电压在潮湿条件下将主要集中在少数的硅橡胶伞裙上, 致使电位分布严重畸变。

综上所述, 在瓷质电站设备绝缘子上加装硅橡胶伞裙, 将导致绝缘子电位分布畸变。如果在瓷绝缘子上安装硅橡胶伞裙的同时涂敷防污闪涂料, 使瓷表面整体变为硅橡胶表面, 则在受潮条件下绝缘子表面能够整体保持较好的绝缘状态, 确保电位分布相对均匀, 即防污闪辅助伞裙与防污闪涂料配合使用能够大幅度提高设备防止缓慢积污型污闪、快速积污型污闪、大雨或暴雨闪络的综合能力, 同时能够解决电位畸变问题。

1.3.3 硅橡胶伞裙的机械支持性能

因材质偏低、尺寸不吻合或安装不当等原因, 硅橡胶伞裙曾出现变形和开裂现象。针对快速积污提出的大盘径硅橡胶伞裙在伸出尺寸上要大于现有硅橡胶伞裙, 因此除要求该伞裙承受更大的自重外, 还要求其承受大雪或暴雪在伞裙上形成的积雪重量。在上述最大机械负荷作用下, 一方面不允许伞裙从粘接处开裂、脱落, 另一方面伞裙自身不能发生严重形变(包括暂态形变和永久形变)。

检验伞裙形变的基本思路是以合理的砝码组合模拟大雪、暴雪堆积于硅橡胶伞裙上的状态, 以测试积雪对硅橡胶伞裙施加压力的效果, 确保硅橡胶伞裙的机械支持性能满足实际运行的需要。硅橡胶伞裙形变位移测量示意图如图 5 所示。

对安装在电站设备绝缘子(含支柱瓷绝缘子、瓷

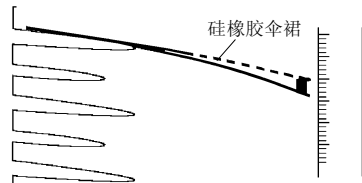


图5 硅橡胶伞裙形变位移测量示意图

Fig. 5 Distortion measurement of silicone rubber shed

套管)上的硅橡胶防污闪辅助伞裙的尺寸及机械支持性能规定如下:①平均直径小于300 mm的绝缘子,硅橡胶伞裙伸出量(超出瓷伞裙的部分)为80~100 mm;在硅橡胶伞裙边缘的任意一点放置50 g砝码,该点的形变位移量不大于10 mm。②平均直径大于300 mm的绝缘子,硅橡胶伞裙伸出量为120~150 mm;在硅橡胶伞裙边缘的任意一点放置50 g砝码,该点的形变位移量不大于15 mm。

1.3.4 临时性、补救性产品的定位

关于防污闪辅助伞裙的另一主要争议是该产品长期以来作为临时性、补救性产品使用,而这种产品定位的最致命弱点就是缺少完善的技术标准,产品质量良莠不齐。

中国电力系统防污闪工作的主要防治对象是缓慢积污型污闪,因此同样作为临时性、补救性产品的防污闪涂料因对缓慢积污闪络形式具有最佳防治效果而获得了快速发展,近年来颁布了一系列日益成熟的标准、文件^[10-12],并出现了综合性能达到复合绝缘子所用高温硫化硅橡胶要求的PRTV产品;而防止缓慢积污闪络能力略逊一筹的防污闪辅助伞裙则基本止步不前,且在实际应用中形成了一些模糊的、甚至错误的观念,长期以来缺少完善的技术标准和文件,仅于1997年颁布了唯一的《防污闪辅助伞裙使用指导性意见》^[9]。尽管与复合绝缘子同属于高温硫化硅橡胶材质,但作为没有标准的临时性、补救性产品,防污闪辅助伞裙基本没有入网门槛,电网难以确保选用优质产品,部分防污闪辅助伞裙在运行中很快老化,出现硬化、开裂、憎水性丧失等问题,见图6。此外,防污闪辅助伞裙现场安装的诸多问题也成为难以保证其产品质量和应用效果的原因之一。

制订完善的技术标准已成为全面规范防污闪辅助伞裙的首要任务。制定该标准时,应重点解决3个问题:

(1)明确产品的适用范围。防污闪辅助伞裙主要通过改善绝缘子外形来提高绝缘子的抗闪络能力,即该产品应重点用于防治与绝缘子外形关系相对密切的闪络形式,包括快速积污型污闪、大雨



图6 老化的防污闪辅助伞裙

Fig. 6 Aged auxiliary anti-pollution-flashover shed

和暴雨闪络;但长期以来防污闪辅助伞裙往往被用于防治常规的缓慢积污型污闪,而在该领域伞裙显然难敌防污闪涂料。

(2)产品性能应全面向正式性产品看齐。防污闪辅助伞裙^[13]包括高温硫化硅橡胶伞裙和常温硫化硅橡胶粘接胶2部分,其中硅橡胶伞裙的性能指标应与正式性产品——线路复合绝缘子接轨,具体可参考文献[14-15]。粘接胶的性能指标应与高质量常温硫化硅橡胶防污闪涂料接轨,具体可参考文献[11-12]。

(3)规范产品的施工与验收。防污闪辅助伞裙必须经过现场施工环节才能成为完整的产品,因此现场施工的重要性在一定程度上不低于对材料性能的要求。具体应解决的问题包括硅橡胶伞裙的安装数量和安装位置、硅橡胶伞裙与瓷伞裙的尺寸配合、硅橡胶伞裙与防污闪涂料的施工配合、现场电气和机械性能检测要求等。

目前,华北电网有限公司企业标准《电站设备外绝缘用防污闪辅助伞裙技术条件及使用导则》^[16]已形成报批稿,符合该标准的伞裙已于2006~2007年初试用于国电电力大同第二发电厂500 kV升压站及华北电网有限公司500 kV霸州变电站,并于2007年12月正式应用在华北电网有限公司500 kV天马变电站和顺义变电站,如图7所示。



图7 试运行的防污闪辅助伞裙

Fig. 7 Auxiliary anti-pollution-flashover shed in service

2 结论

(1) 在常规的缓慢积污和沿海的、自然的、高导电性的海雾型快速积污 2 种基本积污形式之外, 内陆地区出现了与人类活动相关的、高导电性的降水降雪型快速积污, 这是污染严重的国家和地区的特有现象。在国内环境不能得到有效改善的较长一段时期内, 这类快速积污型污闪呈增长趋势, 应予以重视。

(2) 防污闪涂料等硅橡胶类外绝缘产品将绝缘子表面的亲水性改变为憎水性, 可有效抑制常规的缓慢积污型污闪, 但对快速积污型污闪、特别是快速积污伴随快速受潮型污闪的作用有限; 而主要基于缓慢积污概念的现行防污闪标准和措施重点强调硅橡胶产品的憎水性, 在一定程度上忽视了绝缘子外形的作用、特别是外形对于快速积污型污闪的防治作用。

(3) 在电站设备绝缘子的大小伞结构基础上进一步合理增加大盘径伞裙是防治快速积污型污闪的有效措施。大盘径伞裙与绝缘子的常规伞裙尺寸悬殊, 能够有效隔断积雪和电弧、防止快速积污闪络。

(4) 全面规范临时性、补救性产品——防污闪辅助伞裙, 为防治快速积污型污闪、提高设备综合抗污闪能力提供一种具有广泛通用性的手段: ①明确产品的适用范围, 防污闪辅助伞裙主要通过改善绝缘子外形以提高抗闪络能力, 应重点用于防治与绝缘子外形关系相对密切的闪络形式, 包括快速积污型污闪、大雨和暴雨闪络。②制订完善的产品技术标准, 规范防污闪辅助伞裙的材质要求(与线路复合绝缘子等正式性产品接轨)、施工要求(如硅橡胶伞裙与瓷伞裙的尺寸配合)、检验要求(如以单点砧码法测试硅橡胶伞裙的机械支持性能), 确保产品的长期应用效果。③强调防污闪辅助伞裙与防污闪涂料的配合使用, 以解决绝缘子电位分布畸变问题, 同时有效提高设备抵御缓慢积污型污闪、快速积污型污闪及大雨和暴雨闪络的综合能力。

参考文献

- [1] 范建斌, 黄志秋, 谢荣坤, 等. 直流输电线路 Y 型绝缘子串污闪特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(18): 28-31,36.
Fan Jianbin, Huang Zhiqiu, Xie Rongkun, et al. Research on pollution flashover performance of Y-type of insulator strings used in HVDC transmission line[J]. Power System Technology, 2007, 31(18):

- 28-31,36(in Chinese).
[2] 李震宇, 崔吉峰, 周远翔, 等. 绝缘子安装结构对污闪电压的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 52-55,80.
Li Zhenyu, Cui Jifeng, Zhou Yuanxiang, et al. Influence of insulator installation form on its pollution flashover voltage[J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 52-55,80(in Chinese).
[3] 刘有为. 应用新型人工气候室研究长串绝缘子的工频污闪特性[J]. 电网技术, 2002, 26(3): 46-48.
Liu Youwei. A research on power frequency ac pollution flashover of long insulator strings under high altitude by new type of artificial climate chamber[J]. Power System Technology, 2002, 26(3): 46-48(in Chinese).
[4] GB/T16434-1996, 高压架空线路和发电厂、变电所环境污区分级及外绝缘选择标准[S].
[5] Q/GDW152-2006, 高压架空线路和变电站污区分级与外绝缘选择标准[S].
[6] JB/T5895-1991, 污秽地区绝缘子使用导则[S].
[7] 刘琰, 王俊轲. 陕西电网“12·18”大面积污闪事故的分析及其防治对策[J]. 电网技术, 2002, 26(1): 82-85.
Liu Yan, Wang Junkai. Analysis of large area pollution flash over occurred in shaanxi power network on dec.18, 2000 and preventative measures for similar accidents[J]. Power System Technology, 2002, 26(1): 82-85(in Chinese).
[8] 高航. 2001 年初河南电网发生污闪事故的原因与防范措施[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 76-79.
Gao Hang. Cause and countermeasure of pollution flashover in Henan electric power network at the beginning of 2001[J]. Power System Technology, 2002, 25(1): 76-79(in Chinese).
[9] 李晓峰, 李正瀛, 陈俊武, 等. 提高线路绝缘子防污闪及抗泄漏性能的新方法[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 69-72.
Li Xiaofeng, Li Zhengying, Chen Junwu, et al. A new method for improving flashover and leakage characteristics of line insulators [J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 69-72(in Chinese).
[10] DL/T627-2004, 绝缘子用常温固化硅橡胶防污闪涂料[S].
[11] 国家电网公司, 国家电网公司跨区电网输变电设备外绝缘用防污闪涂料使用指导原则[Z]. 北京: 国家电网公司, 2006.
[12] 华北电网有限公司, 电力设备外绝缘用持久性就地成型防污闪复合涂料技术条件及使用导则[Z]. 北京: 华北电网有限公司, 2007.
[13] 原国家电力公司, 防污闪辅助伞裙使用指导性意见[Z]. 北京: 原国家电力公司, 1997.
[14] GB/T19519-2004, 标称电压高于 1 000 V 的交流架空线路用复合绝缘子——定义、试验方法及验收准则[S].
[15] DL/T864-2004, 标称电压高于 1 000 V 的交流架空线路用复合绝缘子使用导则[S].
[16] 华北电网有限公司, 电站设备外绝缘用防污闪辅助伞裙技术条件及使用导则(报批稿)[Z]. 北京: 华北电网有限公司, 2008.

收稿日期: 2008-01-22.

作者简介:

殷 琼(1954—), 女, 原华北电网有限公司副总经理, 现任中国电力科学研究院副院长;

陈 原(1969—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电网防污闪及架空输电线路运行。

(编辑 杜宁)