

电力系统防污闪技术

李景禄 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

电力系统防污闪技术

李景禄 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书系统地介绍了大气污染,电气设备外绝缘及沿面放电,污秽放电的机理及发展过程,污秽测量和试验,污区划分和污秽图绘制,电气设备防污闪技术措施,防污涂料和合成绝缘子应用等。

本书可作为电力系统中高电压技术人员的技术参考书,亦可作为高等院校相关专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统防污闪技术 / 李景禄编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010.4
ISBN 978-7-5084-7463-2

I. ①电… II. ①李… III. ①电力系统—污闪—防治
IV. ①TM852

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第077363号

书 名	电力系统防污闪技术
作 者	李景禄 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16开本 10.5印张 249千字
版 次	2010年4月第1版 2010年4月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	35.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

环境污染对电力系统的影响是非常大的，污秽物积聚在电气设备的外绝缘表面，在一定的气候条件下，就会破坏电气设备的绝缘状态而发生污秽闪络，可造成电网解列等事故。在电力系统中，从输变电工程设计建设，到电气设备的制造；从线路绝缘子的选型应用，到外绝缘爬距的确定；从输变电设备的大修、小修，到技术改造；从输变电设备的运行管理，到安全管理，甚至电力系统状态检修都围绕能否成功防止污闪展开工作。电力系统为了防止电气设备的污闪事故投入了大量的人力、物力和财力，污闪也成为影响电力系统安全稳定运行的一大主要因素，因而系统地、深入地研究电气设备外绝缘发生污秽闪络的机理，掌握防止污秽闪络的相关技术是非常必要的。

作者曾在电力系统中从事过 20 多年的高电压技术监督和技术管理工作，其中防污闪是其主要的工作内容，可以说从污秽的测量、污秽试验，到污秽图绘制，制定防污闪技术措施；从防污闪改造、大修、技改、电气设备的运行管理，到污闪事故发生时的原因分析；从研究防污闪方案，到开展防污闪技术攻关，这其中既有成功的经验，也有失败的教训。有必要把电力系统防污闪方面的专业知识进行系统地总结，以便能为电力系统的防污闪工作尽自己的一点绵薄之力，这就是写这本书的目的。

本书在总结了作者防污闪工作经验的基础上，结合近年来的科研，收入了国内外的防污闪科研成果和技术文献资料，并得到了许多同仁的参与和支持。在此表示衷心的感谢。本书共分十章，全面论述了大气污染，电气设备外绝缘及沿面放电，污秽放电的机理和相关的防污闪措施，目的是系统地、全面地介绍电力系统防污闪知识。

全书由长沙理工大学李景禄教授编著，并指导研究生马福、陈国盛、秦晶晶、何娜、李李、仇炜、高新智、崔林、李德超、李宏搏、宋萍、敬亮兵、甘凌霞进行了资料收集、编写和校对工作。由于作者水平有限，书中不足之处，请读者批评指正。

作者

2010.1

目录

前言

第一章 绪论	1
第一节 大气的组成与大气污染	1
第二节 污染对电力系统的影响	4
第三节 电力系统防污闪技术及其发展	7
第二章 电气设备外绝缘及其沿面放电	10
第一节 大气条件对空气间隙放电的影响	10
第二节 高压外绝缘及高压绝缘子	13
第三节 电气设备外绝缘的沿面放电	21
第四节 表面污秽对沿面放电的影响	25
第三章 高压绝缘子污秽放电的机理及发展过程	32
第一节 绝缘子表面的积污过程 and 影响因素	32
第二节 绝缘子表面几种典型的污闪	36
第三节 污秽的导电机理	41
第四节 绝缘子污闪的发生及发展	43
第五节 污闪放电模型及放电电压计算	44
第四章 几种特殊条件下绝缘子沿面放电	47
第一节 酸性湿沉降气候条件下绝缘子的沿面放电	47
第二节 凝露状态下的绝缘子的沿面放电	53
第三节 覆雪状态下的绝缘子的沿面放电	54
第四节 覆冰状态下的绝缘子的沿面放电	59
第五章 污秽测量	70
第一节 等值盐密法	70
第二节 电导率法	74
第三节 泄漏电流测量	76
第四节 绝缘子污秽度的在线检测	78
第六章 污秽试验	82
第一节 人工污秽试验	82
第二节 自然污秽试验	91
第三节 各种不同电压下的人工污秽试验	95

第七章 污秽图绘制和电气设备外绝缘要求	102
第一节 污秽等级划分	102
第二节 污区分布图绘制	105
第三节 不同污秽条件下电气设备外绝缘要求	107
第八章 运行中电气设备防止污闪的措施	112
第一节 调整爬电比距	112
第二节 清扫绝缘子表面污秽	114
第三节 涂防污涂料	116
第四节 安装增爬裙	120
第五节 带电水冲洗	122
第六节 检测和更换劣质绝缘子	125
第七节 采用防污型绝缘子	131
第九章 复合绝缘子及其应用	133
第一节 复合绝缘子的发展	133
第二节 复合绝缘子的结构和材料	134
第三节 复合绝缘子的防污闪机理和耐污性能	136
第四节 复合绝缘子的表面场强分布	140
第五节 复合绝缘子的机械性能	142
第六节 与瓷和玻璃绝缘子的等效互换	144
第七节 复合绝缘子的应用及存在问题分析	145
第十章 防污闪涂料及其应用	148
第一节 防污闪涂料的防污机理	148
第二节 防污闪涂料的发展	150
第三节 防污闪涂料的应用	154
第四节 PRTV 防污闪涂料	158
参考文献	161

第一章 绪 论

第一节 大气的组成与大气污染

一、大气的组成

大气是由多种气体混合而成的，其组成可以分为三部分：干燥清洁（以下简称干洁）的空气、水蒸气和各种杂质。干洁空气的主要成分是氮、氧、氩和二氧化碳气体，其含量占全部干洁空气的 99.996%（体积）；氦、氖、氪、甲烷等次要成分占 0.004% 左右。

由于大气的垂直运动、水平运动、湍流运动及分子扩散，使不同高度、不同地区的大气得以交换和混合。因而从地面到 90km 的高度，干洁空气的组成基本保持不变，也就是说，在人类经常活动的范围内，地球上任何地方干洁空气的物理性质是基本相同的。

大气中的水蒸气含量平均不到 0.5%，而且随着时间、地点和气象条件等不同而有较大变化，其变化范围为 0.01%~4%。大气中的水蒸气含量虽然很少，却导致了各种复杂的天气现象，如云、雾、雨、雪、霜、露等。这些现象不仅引起大气中湿度的变化，而且还导致大气中热能的输送和交换。此外，水蒸气吸收太阳辐射的能力较弱，但吸收地面长波辐射的能力较强，所以对地面的保温起着重要的作用。大气中的各种杂质是由于自然过程和人类活动排到大气中的各种悬浮微粒和气态物质形成的。大气中的悬浮微粒，除了由水蒸气凝结成的水滴和冰晶外，主要是各种有机的或无机的固体微粒。有机微粒数量较少，主要是植物花粉、微生物、细菌、病毒等。无机微粒数量较多，主要有岩石或土壤风化后的尘粒、流星在大气层中燃烧后产生的灰烬、火山喷发后留在空中的火山灰、海洋中浪花溅起在空中蒸发留下的盐粒，以及地面上燃料燃烧和人类活动产生的烟尘等。

大气中的各种气态物质，也是由于自然过程和人类活动产生的，主要有硫氧化物、氮氧化物、一氧化碳、二氧化碳、硫化氢、氨、甲烷、甲醛、烃蒸气、恶臭气体等。

在大气中的各种悬浮微粒和气态物质中，有许多是引起大气污染的物质。它们的分布是随时间、地点和气象条件变化而变化的，通常是陆地多于海上，城市多于乡村，冬季多于夏季。它们的存在，对辐射的吸收和散射，对云、雾和降水的形成，对大气中的各种光学现象，皆具有重要影响，因而对大气污染也具有重要影响。

二、大气污染

大气污染是指由于人类活动或自然过程使得某些物质进入大气中，呈现出足够的浓度，达到了足够的时间，并因此而影响人体的舒适，危害人体健康以及人们的福利，甚至危害了生态环境。所谓人类活动不仅包括生产活动，而且也包括生活活动，如做饭、取暖、交通等。自然过程包括火山活动、山林火灾、海啸、土壤和岩石的风化及大气圈中空气运动等。一般说来，由于自然环境所具有的物理、化学和生物机能（即自然环境的自净

作用), 会使自然过程造成的大气污染, 经过一定时间后自动消除 (即使生态平衡自动恢复)。因此大气污染主要是人类活动造成的。

大气污染对人体的舒适、健康的危害, 包括对人体的正常生活环境和生理机能的影响, 引起急性病、慢性病以致死亡等; 而所谓福利, 是指与人类协调共存的生物、自然资源以及财产、器物等给人们带来的福利。

按照大气污染的范围来分, 大致可分为四类: ①局部地区污染, 局限于小范围的大气污染, 如受到某些烟囱排气的直接影响; ②地区性污染, 涉及到一个地区的大气污染, 如工业区及其附近地区或整个城市大气受到污染; ③广域污染, 涉及到比一个地区或大城市更广泛地区的大气污染; ④全球性污染, 涉及到全球范围 (或国际性) 的大气污染, 以下讨论全球性污染问题。

全球性大气污染问题包括温室效应、臭氧层破坏和酸雨等三大问题。

1. 温室效应

大气中的二氧化碳和其他微量气体如甲烷、一氧化二氮、臭氧、氟氯碳化物 (CFCs)、水蒸气等, 可以使太阳短波辐射几乎无衰减地通过, 但却可以吸收地表的长波辐射, 由此引起全球气温升高的现象, 称为“温室效应”。上述微量气体, 则称为“温室气体”, 其中二氧化碳是最重要的温室气体。

2. 臭氧层破坏

大气中臭氧含量仅占一亿分之一, 主要集中在离地面 20~25km 的平流层中, 并称为臭氧层。臭氧层具有强烈吸收太阳紫外线的功能, 从而保护地球上各种生命的存在、繁衍和发展, 氟氯碳、一氧化氮等物质向大气排放逐渐增多, 是导致臭氧层破坏的主要原因。据估计, 南极上空臭氧层“空洞”面积已达 2400km², 约占总面积的 60%, 北半球上空臭氧层比以往任何时候都薄, 欧洲和北美上空臭氧层平均减少了 10%~15%, 西伯利亚上空甚至减少了 35%。臭氧层的破坏将导致皮肤癌和角膜炎患者增加, 破坏地球上的生态系统等严重问题。

3. 酸雨

pH 小于 5.6 的雨、雪或其他形式的大气降水 (如雾、露、霜) 称为酸雨。酸雨的形成主要是因化石燃料燃烧和汽车尾气排放的硫氧化物和一氧化氮, 在大气中形成硫酸和硝酸, 又以雨、雪、雾等形式返回地面, 形成“酸沉降”。酸雨的危害是破坏森林生态系统和水生生态系统, 改变土壤性质和结构, 损坏人体呼吸道和皮肤等。中国的西南、华南和东南地区的酸雨危害相当严重。

三、大气污染物

大气污染物系指由于人类活动或自然过程排入大气的并对人和环境产生有害影响的物质。

大气污染物的种类很多, 按其存在状态可概括为两大类: 气溶胶状态污染物和气体状态污染物。

1. 气溶胶状态污染物

在大气污染中, 气溶胶是指沉降速度可以忽略的小固体粒子、液体粒子或它们在气体

介质中的悬浮体系。从大气污染控制的角度，按照气溶胶的来源和物理性质，可将其分为如下几种：

(1) 粉尘。粉尘是指悬浮于气体介质中的小固体颗粒，受重力作用能发生沉降，但在一段时间内能保持悬浮状态。它通常是由于固体物质的破碎、研磨、分级、输送等机械过程，或土壤、岩石的风化等自然过程形成的。颗粒的形状往往是不规则的。颗粒的尺寸范围，一般为 $1\sim 200\mu\text{m}$ 。属于粉尘类的大气污染物的种类很多，如粘土粉尘、石英粉尘、煤粉、水泥粉尘、各种金属粉尘等。

(2) 烟。烟一般是指由冶金过程形成的固体颗粒的气溶胶。它是由熔融物质挥发后生成的气态物质的冷凝物，在生成过程中总是伴有诸如氧化之类的化学反应。烟颗粒的尺寸很小，一般为 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ 。产生烟是一种较为普遍的现象，如有色金属冶炼过程中产生的氧化铅烟、氧化锌烟，在核燃料后处理厂中的氧化钙烟等。

(3) 飞灰。飞灰是指随燃料燃烧产生的烟气排出的分散得较细的灰。

(4) 黑烟。黑烟是指由燃料燃烧产生的能见气溶胶。在某些情况下，粉尘、烟、飞灰、黑烟等小固体颗粒气溶胶的界限，很难明显区分开，在各种文献特别是工程中，使用得较混乱。根据我国的习惯，一般可将冶金过程和化学过程形成的固体颗粒气溶胶称为烟尘；将燃料燃烧过程产生的飞灰和黑烟，在不需仔细区分时，也称为烟尘。在其他情况下，或泛指小固体颗粒的气溶胶时，则通称粉尘。

(5) 雾。雾是气体中液滴悬浮体的总称。在气象中指造成能见度小于 1km 的小水滴悬浮体。

2. 气体状态污染物

气体状态污染物是以分子状态存在的污染物，简称气态污染物。气态污染物的种类很多，总体上可以分为五大类：①以二氧化硫为主的含硫化合物；②以氧化氮和二氧化氮为主的含氮化合物；③碳氧化物；④有机化合物；⑤卤素化合物。气态污染物，又可分为一次污染物和二次污染物。一次污染物是指直接从污染源排到大气中的原始污染物质；二次污染物是指由一次污染物与大气中已有组分或几种一次污染物之间经过一系列化学或光化学反应而生成的与一次污染物性质不同的新污染物质。在大气污染控制中，受到普遍重视的一次污染物主要有硫氧化物 (SO_x)、氮氧化物 (NO_x)、碳氧化物及有机化合物等；二次污染物主要有硫酸烟雾和光化学烟雾。

对上述主要气态污染物的特征、来源等简单介绍如下：

(1) 硫氧化物。硫氧化物中主要有 SO_2 ，它是目前大气污染物中数量较大、影响范围广的一种气态污染物。大气中的 SO_2 主要来自化石燃料的燃烧过程，以及硫化物矿石的焙烧、冶炼等热过程。

(2) 氮氧化物。氮和氧的化合物有很多种，可用 NO_x 表示。其中污染大气的主要是 NO 和 NO_2 。 NO 毒性不太大，但进入大气后可被缓慢地氧化成 NO_2 ，当大气中有 O_3 等强氧化剂存在时，或在催化剂作用下，其氧化速度会加快。 NO_2 的毒性约为 NO 的 5 倍。人类活动产生的 NO_2 ，主要来自各种炉窑、机动车和柴油机的排气；其次是硝酸生产、硝化过程、炸药生产及金属表面处理等过程。其中由燃料燃烧产生的 NO ，约占 83%。

(3) 碳氧化物。 CO 和 CO_2 是各种污染物中发生量最大的一类污染物，主要来自于原

料燃烧和汽车尾气排放。CO 是一种窒息性气体，进入大气后，由于大气的扩散，一般对人体没有伤害作用。

(4) 硫酸烟雾。硫酸烟雾是大气中的 SO_2 等硫氧化物，在有水雾、含有重金属的悬浮颗粒物或氮氧化物存在时，发生一系列化学或光化学反应而生成的硫酸雾或硫酸盐气溶胶。硫酸烟雾引起的刺激作用和生理反应等危害，要比 SO_2 气体大得多。

(5) 光化学烟雾。光化学烟雾是在阳光照射下，大气中的氮氧化物、碳氢化合物和氧化剂之间发生一系列光化学反应而生成的蓝色烟雾（有时带些紫色或黄褐色）。其主要成分有臭氧、过氧乙酰硝酸酯、酮类和醛类等。光化学烟雾的刺激性和危害要比一次污染物强烈得多。

四、大气污染物的来源

大气污染物的来源可分为自然污染源和人为污染源两类。自然污染源是指自然原因向环境释放的污染物，如火山喷发、森林火灾、飓风、海啸、土壤和岩石的风化及生物腐烂等自然现象形成的污染源。人为污染源是指由人类生活活动和生产活动而形成的。人为污染源有各种分类方法，按污染源的空间分布可分为：①点源，即污染物集中于一点或相当于一点的小范围排放源，如工厂的烟囱排放源；②面源，即在相当大的面积范围内有许多个污染物排放源，如一个居住区或商业区内许多大小不同的污染物排放源。按照人们的社会活动功能不同，可将人为污染源分为生活污染源、工业污染源和交通运输污染源三类。

根据对主要大气污染物的分类统计分析，大气污染源又可概括为三大方面：燃料燃烧、工业生产和交通运输。前两类污染源统称为固定源，交通运输工具（机动车、火车、轮船、飞机等）则称为流动源。

第二节 污染对电力系统的影响

一、工业污染对电力系统的影响

工业污染是指在工业生产过程中由烟囱排出的气体、液体和固体污秽物质。它主要分布在工业城市及近郊和工业集中的地区，包括化工厂、冶炼厂及火电厂的排烟，水泥厂、煤矿及矿场的粉尘，循环水冷却塔或喷水池的酸化水雾等。这些弥漫在空气中的污染物日积月累沉积在外绝缘表面，形成污秽层，极大地提升了绝缘子表面的盐密值，在有水分存在的条件下，一些可溶性的导电物质在微溶解后，将使表面污秽层的电导急剧增大，致使外绝缘的电气强度显具下降。近 10 年来，我国 110kV 及以上线路地处城市、工业区直接受到工业污染源影响（不包括乡镇工业源）而发生闪络的杆塔占全国污闪总数的 42.4%。因此，空气污染是导致电力设备发生闪络事故的重要原因之一。在各类工业污染中，化工对绝缘子电气强度的影响最重，其次是水泥、冶金等污秽。

1. 化工污秽

化工污秽是由开采化工原料和制造化工产品的工矿企业在生产过程中或烟囱排出的废气、脏物及化工粉尘，其主要成分是具有导电性能的酸、碱、盐类。这些污秽物不仅可以直接降落在绝缘子表面，而且在降水过程中将使降水酸化，从而使雨、雾、露的电导率增

大。一般来说当粉尘浓度偏小时，电导率随浓度的增大而增加，当浓度增大到一定值后，电导率却随浓度增加反而下降；强酸和强碱的电导率在不同浓度下都比其他电解质高，因含有强电解质的化工污秽对绝缘子电气特性的影响比弱电解质要严重得多。

2. 水泥污秽

水泥污秽的主要成分是硅酸钙和铝酸、铝铁酸钙。它虽是一种较难溶解的弱电解质，但易于吸潮并结壳，因此其雨洗效果小且清扫十分困难，附着在绝缘子表面的沉积量将与日俱增。当以水泥污秽为主，兼有其他强电解质污秽时，水泥起保水作用，使污秽层的强电解质可以充分溶解，导致绝缘子表面污层的电导率增大。

3. 冶金污秽

冶金污秽主要是由炼钢厂、铝厂及其他有色金属的冶炼厂烟囱所排出的污秽物。钢铁企业的金属粉尘沉积在绝缘子表面上，在其受潮后与烟囱排出的高浓度 SO_2 黄烟起化学反应，产生 Fe_2O_3 使绝缘子表面污层呈橙色；如果水塔水雾中的碳酸钙、碳酸镁和硅酸盐与金属粉尘一起附着于绝缘子表面上，将形成灰白色污垢。因此，位于钢铁企业附近的绝缘子，不仅在湿润时污层电导率显著增大，而且污垢又给定期清扫造成困难。炼铝厂附近空气中含有大量的铝矾土、 SiO_2 、氟化物等强电解质，对用电量很大的铝厂供电系统是十分有害的。凡是冶金污秽一般都属强电解质，对电力系统的外绝缘均有严重威胁。

4. 煤烟粉尘污秽

煤烟粉尘污秽的主要成分是 SiO_2 ，其次是 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 及其他金属氧化物，含盐量约占 4%；烟气中以 SiO_2 为主，它与含有金属氧化物的烟灰相结合，在粉尘表面被氧化为 SO_2 ，一旦遇水气则生成硫酸。因此，煤烟污秽属强电解质，它不仅是一种重要的污染源，而且火电厂冷却水塔周围空气中的漂滴容易使厂升压站绝缘子上的煤烟污层湿润，加之水滴中含有酸根离子和其他金属离子，从而使污层电导率增大，有时会导致升压站发生污闪。

因此工业中由各种不同类型的污染源所产生的弥漫在大气中的固体和液体微粒即“大气飘尘”是危害最大的大气污染来源，严重时，它可改变大气的性质，使生态和户外输变电设备受到伤害。在工业地区运行的绝缘子，当受到工业污秽的污染，在输变电设备周围空气中的漂浮污染物质，当遇到适宜的条件时就会在空气中产生放电，使外绝缘伞裙间空气间隙的绝缘水平下降，从而对电气设备的运行构成威胁。

二、自然污秽对电力系统的影响

在自然条件下产生的污染可分为尘土、盐碱污秽、海水盐雾和鸟粪等污秽。尘土污秽主要成分是从地面扬起的尘土，农作物施加的化肥和农药，农村燃烧柴、草、农作物茎叶、牛粪等排出的炊烟等。在尘土污秽区，绝缘子的污染程度主要取决于土壤的性质，特别是土壤的含盐量、可溶性与生成电解质的能力；风对土壤的侵蚀以及尘土在绝缘子表面上的粘附能力。在大多数尘土污秽区，尘土污秽几乎不含盐类等强电解质，溶解度也小，可溶性导电物质的平均含盐量为 0.3%~1.5%；污层与绝缘子表面不易粘结，污秽沿表面分布也不均匀，很容易被雨水冲洗掉。由此可见，尘土污秽自身电导率并不大，但近年来化肥和农药的大量施放、乡镇企业的发展和运输车辆的剧增，不仅导致尘土污秽中可溶

性导电物质含量增大,而且导致湿沉降水酸度增高,加之城市地区污秽的飘移,使轻度污染的尘土污区也频繁发生污闪事故。在盐碱地区,不仅尘埃中含有大量能溶于水而生成电解质的微粒,而且大多数盐碱地区还存在含有可溶矿物质的水域,风自盐湖水面吹起含导电物质的水气蒸发后在空气中留下电离物质。因此,盐碱地区(特别是半沙漠地带)属于重污区。按土壤盐渍化的程度可将盐碱土分为含盐量弱、中、强或很强的土壤,其可溶性盐的含量分别为小于0.5%、0.5%~1.5%、1.5%~3.0%、大于3.0%。在含盐量很强的土壤地区,污秽中的可溶成分达20%~30%,其电导率接近NaCl的物质约为50%,甚至达100%。由于细小的盐粒更易被风扬起,因此,绝缘子污层中的含盐量比土壤中的含盐量可高出几倍。这类地区绝缘子污染的特点是:因风雨的净化作用,上表面积污比下表面小好几倍,特别是下表面有棱的绝缘子污染更严重。

海水污秽主要发生在海洋沿岸,但顺着流入海洋的江河也可以扩展到离海岸较远的地区。由于海浪冲击海岸和风力的作用,海边空气中含有大量的海水微粒。海风的风速能达5~6m/s,高度可达1000~1500m,深入陆地的距离一般为20~50km。因此,海水的水滴被风吹到陆地的干燥空气中,水分蒸发而形成小颗粒的盐沉积在绝缘子表面上;在紧靠海边几百米以内的绝缘子常常被海水飞沫直接湿润;在不利的气象条件下,海水水滴或盐粒可以构成雾的凝聚核心而形成海雾或称盐雾,使绝缘子表面受到湿润。由于海雾中含有盐混合物微粒,其导电性比陆地雾要大得多。它不仅对绝缘子的污层起湿润作用,而且加强了污层的导电性,因此海雾对绝缘子的运行危害最大。

在田野、森林、草原和盐碱地区,野鸟繁多,鸟粪污秽往往也会造成污闪事故。研究表明:不仅绝缘子上堆积的干鸟粪因受潮而使绝缘性能下降,而且几率最大的污闪原因是鸟停留在杆塔横担上排粪,粪便污染绝缘子而导致沿粪流路径放电。

结合上述所说的两类污秽污染可知,工业污秽大多属于城区或郊区,以及工矿附近,基本上属“局地污染”;自然污秽虽是轻度污染,但多属于“地区污染”。实际上,工业污染与自然污秽共存的混合污秽对电力系统的危害更大。

三、污闪对电力系统的危害

输电线路绝缘子要求在大气过电压、内部过电压和长期运行电压下均能可靠运行。但沉积在绝缘子表面上的污秽在雾、露、毛毛雨、融冰、融雪等恶劣气象条件的作用下,将使绝缘子的电气强度大大降低,从而使得输电线路在运行电压下发生污秽闪络事故。

我国电力系统的污闪事故多集中在工业比较发达的地区,从20世纪80年代开始,跨地区、跨省市的大面积污闪也开始出现,给国民经济带来较大的损失。

据不完全统计,1971~1980年我国输电线路发生污闪事故1126次,变电设备发生污闪事故761次;1981~1990年,输电线路发生污闪事故达1907次,变电设备污闪事故695次。20世纪90年代后大面积污闪事故更为突出,1990年华北地区的大面积污闪事故,1996~1997年华东地区的大面积污闪事故,以及2001年辽宁、华北、河南等地的大面积污闪事故,都具有事故影响范围大、持续时间长、经济损失严重等特点。

1989年12月底至1990年2月,南方暖湿气流与南下冷空气在华北南部上空相遇,使整个华北地区气候从干冷、干暖转为湿冷、温暖。河南北网、河北南网、山西南部和中

部、京津唐电网及辽宁的西部和南部相继出现大雾加雨或雪天气。污闪逐渐由南向北，由东向西发展。污闪进入高峰期时，京津唐电网与河北南网、山西网完全解列。北京220kV双环网也面临崩溃的边缘，电量损失高达12GW·h。在这次大面积污闪事故中，京津唐有50条110~500kV线路跳闸，其中23条线路停运，共发现96基故障塔119串绝缘子闪络；河北南网仅220kV线路就有25条跳闸145次（110kV线路跳闸170次），其中15条重合不成功，共发现62基故障塔75串绝缘子闪络；晋中、晋南有19条110kV和220kV线路跳闸，其中12条停运，共发现24基故障塔34串绝缘子闪络。河南北部与西部7个地区有71条110kV和220kV线路跳闸，其中仅220kV线路就发现84基故障塔和95串绝缘子闪络。辽宁西部与南部有3条500kV线路跳闸7次，4条220kV线路跳闸10次，且多次重合或强送不成，共发现11基故障塔16串绝缘子闪络。华北各地区共有7座220kV变电站、8座110kV变电站均发生全部、部分或瞬时停电，不完全统计故障点约36处；河南电网共有5座220kV变电站、7座110kV变电站均发生全部、部分停电。此次事故面积之广，威胁之大在我国电力系统是前所未有的。

1996年底至1997年初长江中下游6省1市持续大雾。久旱无雨后的华东污闪从安徽向江苏、上海、浙江蔓延，同时污闪波及华中的江西、湖南、湖北。华东主网12条500kV线路跳闸62次、4条线路绝缘子断串，3条导线落地；24条220kV线路跳闸60多次，9条线路绝缘子断串导线落地；安徽500kV系统一度与华东主网脱离。华中电网2条500kV线路、22条220kV线路及2座220kV变电站和九江电厂污闪跳闸48次，其中4条线路5串绝缘子断串。这是1990年后又一次电网大面积污闪事故。该年度华北、山东、西北等电网内部也相继发生了较大面积的污闪事故。污闪共涉及330~500kV线路18条、220kV线路51条，23起导线落地或落于塔窗的事故；涉及500kV变电站1座、330kV变电站（厂）3座、220kV变电站（厂）5座、110kV变电站11座，330kV主变压器损坏2台，支柱绝缘子断裂。山东、上海、安徽、湖北、江西、陕西和新疆等省、直辖市、自治区电网都因变电站失压或电厂联变退出而发生（供电）区域性停电事故。

2001年1月、2月，华北大部地区和东北辽宁相继几次出现雪雨交加、大雾迷漫的天气。污闪首先由河南电网发生，并逐渐北移，经河北南网、京津唐电网直至辽宁南部和中部。此次污闪总计66~500kV线路238条、变电站34座跳闸972次。其中500kV线路故障塔30基，闪络绝缘子35串（组）；220kV线路故障塔293基，闪络绝缘子332串（组）；66~110kV线路故障塔110基，闪络绝缘子137串（组）。500kV变电站3座，闪络设备18台；220kV变电站15座，闪络设备37台；110kV变电站16座，闪络设备26台。此次污闪与1990年的大面积发生的时间和发展过程、覆盖区域及面积、社会影响大体相同；但重灾区转移到了辽沈地区。

第三节 电力系统防污闪技术及其发展

一、防污工作的回顾

20世纪50年代初，沿海及工业较多的辽宁、上海、天津及青岛等地区10、35、

66kV 电压等级电网先后出现污闪事故。1954 年以后辽宁地区的 154~220kV 系统相继发生污闪；20 世纪 50 年代末及 20 世纪 60 年代初，上海、天津、青岛等地 110~220kV 系统污闪开始出现并逐渐增多。20 世纪 60 年代，甘肃、陕西、吉林等省电力系统因工业及盐碱地污秽也出现了一些事故。在这段时间中，人们对污闪的规律开始有了一定的认识，并采取了一些防污闪措施，除清扫、冲洗、增加绝缘子片数、应用耐污型绝缘子外，也开始使用硅油、地蜡等涂料。

20 世纪 70 年代，污闪事故波及到全国大部分省区并日益增多，我国的防污闪工作自此进入一个新的阶段。1975 年防污闪研究课题列入重点科研项目中；1977 年起开始进行污秽等值盐密的测量工作；1978 年东北电力系统首先制定了“送电线路及变电设备污秽等级划分暂行办法”；1979 年 1 月水利电力部在山东潍坊召开了全国第 1 次防污闪工作会议，对各地防污闪工作经验进行了总结与交流，制定出“发电厂、变电所和架空线路电瓷绝缘污秽分级暂行规定”；1983 年在北京召开全国性会议，制订了“高压架空线路和发、变电所电瓷外绝缘污秽分级标准”。

1983 年在江苏省无锡市召开的全国第二次防污闪工作会议及 1987 年 1 月召开的全国高电压专业工作会议，总结防污闪经验，制定了反事故措施。20 世纪 80 年代相继投运的 500kV 线路由于设计的外绝缘耐污秽水平普遍不足。1987 年 2 月到 1990 年 3 月，华北、东北、华东及山东的 500kV 线路相继发生污闪。同期，330kV、220kV 及以下的电网，因绝缘水平不足的原因，也多次发生污闪。为了更详细分析这段时间内污闪事故剧增的原因，以便采取对策，能源部先后组织了工作组进行多次调查，并在 1990、1991、1992 年连续召开了 3 次全国防污闪工作会议，制订了有关的措施和对策。在这段时间内，各地进行了主干及重要线路爬距调整工作，使在运的线路外绝缘水平有了一定的提高；进行了全国范围的污区分布图绘制工作，为今后设计及运行维护奠定了一定基础；各种防污闪新技术及新措施的研制与应用，也上了一个新台阶；各地相继举行了学习班，使专业人员的水平得到了提高。为了适应在污秽较重和严重地区外绝缘耐污水平的要求，在 20 世纪 50 年代中期，电力部门就向电瓷制造部门提出了研制耐污型绝缘子的要求，再次强调防污闪专业工作的重要性。20 世纪 60 年代末，着重发展高度为 146mm 及 160mm、爬距在 400mm 左右的双伞形耐污绝缘子。20 世纪 70 年代末及 20 世纪 80 年代初，500kV 电压等级出现后，R60~300kN 级耐污型及大爬距绝缘子也相继出现，其中双伞形等耐污型绝缘子使污秽地区线路耐污能力得到了提高。变电设备用的耐污型绝缘子直到 20 世纪 70 年代中期才开始进行研制。在 20 世纪 70 年代末 80 年代初，中等污区用棒形支柱绝缘子及其他变电设备瓷件投入了批量生产。20 世纪 80 年代重污区棒形支柱绝缘子及瓷件的研制与生产也取得了一定的进展。自进入 20 世纪 90 年代以来，我国的防污工作取得了很大的进步，制定了一系列防污闪技术政策和管理规定，各地不同程度的调整了输变电设备的爬距，相继完成了电力系统污区分布图的绘制并得到执行，有关防污闪科研课题取得了很大的进展。

二、我国防污工作的展望

数十年来，我国在污秽绝缘的试验研究工作方面做了大量工作，并得到了一定的发展与提高，取得了一些成果。但此项工作目前仍不能适应实际的需要，特别是 330~500kV

系统的设备试验开展得较少,还不能满足系统运行与设计部门的要求。对于各种绝缘子,尤其是大吨位绝缘子在不同污秽条件下的污闪特性,在自然污秽环境下的积污特性尚缺乏系统的试验数据,对变电瓷件如支柱绝缘子、各种电器瓷套管的污闪特性试验数据也很少,这些问题应力求在短期内加以研究解决。

在电网的防污闪工作方面,各地对污秽区等级的划分、防污闪措施的应用、新措施的研究与推广、防污闪工作的技术管理等方面也还有大量的工作需要切实着手进行。

复合绝缘子的应用已有近 40 年的历史,已在世界上 27 个国家和地区使用,使用量最多的是北美地区。早期复合绝缘子材质包括环氧树脂、乙丙橡胶、室温硫化硅橡胶等,直至 20 世纪 70 年代高温硫化硅橡胶复合绝缘子首先在德国问世。与瓷绝缘子和玻璃绝缘子相比,复合绝缘子具有重量轻、强度高、耐污闪能力强、制造维护方便等优点,国外使用它主要是缩小线路走廊、防止枪击及运输方便,而我国主要是用于防止输变电设备的污闪。尽管我们起步较晚,但在吸取国外经验教训的基础上,起点高,一开始就研制生产出高温硫化硅橡胶绝缘子(以下简称复合绝缘子)。近年来,复合绝缘子受到了电力系统的认可和好评,发展十分迅猛。到 2007 年底,复合绝缘子在我国电网运行已达 200 多万支,居世界使用第二位。

总之,有机外绝缘的许多电瓷外绝缘无可比拟的优点已逐步为电力系统所认识和接受,并正利用这些优点、特点去制造瓷绝缘子各种已有甚至没有的产品,百年来瓷绝缘子在高压外绝缘领域一统天下的局面将不复存在,电力系统外绝缘正走向传统电瓷外绝缘与新型有机外绝缘优势互补的新时代。

已经使用的高压复合绝缘子只是利用硅橡胶复合绝缘的起步,其他瓷外绝缘都可以逐步用复合绝缘替代,而且结构和性能都将优于瓷绝缘。复合绝缘作为新一代外绝缘在高压输变电设备上具有广泛的发展。

目前,另一种新型材料绝缘子——聚合物混凝土绝缘子正在德国电瓷业得到深入地研究开发,该种绝缘子采用专门的注塑机制造,工艺更加简单,已有试验表明其性能远优于美国 ANS 标准中的瓷绝缘子的标准,被认为是继有机硅绝缘子之后又一个拥有发展前途的新产品。

第二章 电气设备外绝缘 及其沿面放电

第一节 大气条件对空气间隙放电的影响

污闪事故往往发生在潮湿天气里,例如大雾、毛毛雨、雨夹雪等。在大雨或大暴雨天气条件下,绝缘子发生闪络的情况并不多,这是因为雨水能将绝缘子表面积聚的污秽物冲洗掉,从每年绝缘子污闪发生的时间来看,污闪的发生有一定的季节性。经统计,90%以上的污闪事故发生在每年秋季的后期和冬春季节。造成这个现象的原因主要有两个方面:一方面是在秋季和冬季降水偏少,此外,冬季还是浓雾、融冰发生的主要时间段;另一方面由于冬季供暖的增加,造成污源增加,特别在我国北方地区这一现象更为严重。污闪具有以下特征:①持续浓雾气候,能见度低,温度在 $-3\sim 7^{\circ}\text{C}$ 之间,湿度为90%~100%;②空气环境质量差。经统计,有70%以上的污闪事故发生在后半夜和清晨,因为此时负荷轻,运行电压较高,而气温较低且湿度较大,是浓雾、露或雪的多发时段;在白天中午时段,线路发生污闪跳闸相对较少。

大气条件对空气间隙放电的影响主要是指大气的压力、温度、湿度等条件对空气间隙击穿电压或放电电压的影响。海拔对空气间隙也有类似的影响,因为海拔的增加会使空气的压力和密度减小,所以在不同大气条件下测得的击穿电压必须换算到统一的参考大气条件下才能进行比较;反之,也可将标准参考大气条件下规定的试验电压换算到试验时的大气条件下,以便进行试验。

GB/T16927.1—1997《高电压试验技术》和 GB775.2—1987《绝缘子试验方法》中规定了不同条件下绝缘放电电压相互间的换算关系。标准大气条件为:温度 $t_0=20^{\circ}\text{C}$ 或 $T_0=293\text{K}$,压力 $p_0=101.3\text{kPa}$,绝对湿度 $h_0=11\text{g/m}^3$ 。

一、空气相对密度的影响

气压和温度的变化都可以反映为空气相对密度的变化,因此气压和温度的影响就可归结为空气相对密度的影响。

电子从电场中获得的能量为

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = Eq\bar{\lambda} \quad (2-1)$$

式中: m 为电子的质量; v 为电子的速度; E 为电场强度; q 为电子的电量; $\bar{\lambda}$ 为电子的平均自由行程。

当电子的动能大于或等于气体分子的电离能时,就有可能因碰撞引起电离,产生电离的条件为

$$Eq\bar{\lambda} \geq W_i \quad (2-2)$$

式中： W_i 为气体分子的电离能。

气压 P 增大时，空气相对密度 δ 增大，带电粒子在气体中运动的平均自由行程 $\bar{\lambda}$ 减小，运动中所积累的动能 $Eq\bar{\lambda}$ 就较小，电离能力就较小，因此间隙的击穿电压就高；反之则有相反的结果。温度 t 升高，空气相对密度 δ 减小，带电粒子在气体中运动的平均自由行程 $\bar{\lambda}$ 增大，运动中所积累的动能 $Eq\bar{\lambda}$ 就增大，电离能力也就较大，因此间隙的击穿电压就较低；反之则相反。

空气相对密度与气压成正比、与温度成反比，其关系可用下式表示

$$\delta = \frac{2.89P}{273+t} \quad (2-3)$$

式中： P 为气压，kPa； t 为温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

在大气条件下，空气间隙的击穿电压随 δ 的增大而升高。实验表明，当空气相对密度 δ 在 0.95~1.05 范围内变动时，间隙的击穿电压与相对密度成正比，则试验或运行条件下的击穿电压 U 和标准大气条件下的击穿电压 U_0 的关系可用下式表示

$$U \approx \delta U_0 \quad (2-4)$$

当 δ 与 1 相差较大时，必须使用空气密度校正系数 K_d 对击穿电压进行校正，如果大气压力 p 用 kPa 表示，温度 t 为摄氏温度，空气密度校正系数可按下式计算

$$K_d = \left(\frac{p}{p_0}\right)^m \left(\frac{273+t_0}{273+t}\right)^n \quad (2-5)$$

式中，指数 m 、 n 与电极形状、电压的形式、极性以及闪络距离 d 有关，其值在 0.4~1.0 的范围内。假定 m 和 n 相等，空气密度校正用的指数 m 和 n 值与放电距离（以 m 为单位）的关系曲线如图 2-1 所示。

此时，试验或运行条件下的击穿电压 U 和标准大气条件下的击穿电压 U_0 的关系为

$$U = K_d U_0 \quad (2-6)$$

二、湿度的影响

湿度增加，空气中所含的水分子增加，水分子能捕获自由电子而形成负离子，使电离能力下降，对气体中的放电过程起到抑制作用，因此空气的湿度越大，间隙的击穿电压也会越高。所以湿度对极不均匀电场的放电过程有显著影响，需要进行湿度校正，湿度校正因数为

$$K = k^{\omega} \quad (2-7)$$

湿度校正因数 K 是绝对湿度的函数，指数 ω 的值取决于电极形状、间隙距离、电压种类及其极性，根据电压形式分别采用曲线 a 或 b ，如图 2-2 所示。

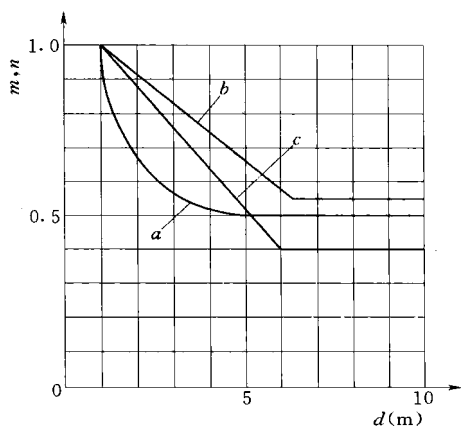


图 2-1 空气密度校正用的指数 m 和 n 值与放电距离（以 m 为单位）的关系曲线