

接触网绝缘子抗污闪性能提升技术研究

刘西仓

中铁电气化铁路运营管理有限公司上海维管处杭州维管段, 中国·浙江 杭州 310021

摘要: 接触网绝缘子作为电气化铁路牵引供电系统的关键组件, 其抗污闪性能直接影响铁路运输的安全性和可靠性。本文对接触网绝缘子污闪的原理及其影响因素进行了深入分析, 系统地剖析了当下主要的抗污闪技术手段, 涵盖材料改进、结构革新和表面处理等途径, 借助对比审视不同技术方案的长处与短处, 给出了综合性增进抗污闪性能的策略。结合工程实际案例, 验证了相关技术措施的有效性, 为接触网绝缘子的设计改进和运维管理提供了理论依据和实践指导。研究表明, 通过合理的材料选择、结构设计和维护策略, 可以显著提高接触网绝缘子的抗污闪性能, 确保电气化铁路系统的稳定运行。

关键词: 接触网; 绝缘子; 抗污闪性能; 结构优化

Research on Improving the Anti pollution Flash Performance of Contact Line Insulators

Liu Xicang

China Railway Electrification Railway Operation Management Co., Ltd. Shanghai Maintenance Department Hangzhou Maintenance Section, China Zhejiang Hangzhou 310021

Abstract: As a key component of the electrified railway traction power supply system, the anti pollution flashover performance of the contact wire insulator directly affects the safety and reliability of railway transportation. This article provides an in-depth analysis of the principles and influencing factors of pollution flashover in contact network insulators. It systematically examines the main anti pollution flashover technologies currently available, including material improvement, structural innovation, and surface treatment. By comparing and examining the strengths and weaknesses of different technical solutions, comprehensive strategies are proposed to enhance the anti pollution flashover performance. By combining practical engineering cases, the effectiveness of relevant technical measures has been verified, providing theoretical basis and practical guidance for the design improvement and operation and maintenance management of contact network insulators. Research has shown that through reasonable material selection, structural design, and maintenance strategies, the anti pollution flashover performance of contact network insulators can be significantly improved, ensuring the stable operation of electrified railway systems.

Keywords: Contact network; Insulator; Anti pollution flashover performance; Structural optimization

0 引言

随着我国高速铁路建设的快速发展, 电气化铁路网络规模不断扩大, 对牵引供电系统的可靠性提出了更高要求。接触网作为向电力机车提供电能的重要设施, 其安全稳定运行至关重要。绝缘子作为接触网系统中承担绝缘和机械支撑双重功能的核心部件, 其性能状态直接关系到整个供电系统的运行安全。在实际运行环境中, 接触网绝缘子长期暴露在户外恶劣环境下, 容易受到各种污染物的侵蚀。当绝缘子表面积累一定厚度的污秽层后, 在湿润条件下会形成导电通道, 导致绝缘性能急剧下降, 进而引发污闪事故。污闪不仅会造成供电中断, 影响列车正常运行, 严重时还可能损坏设备, 威胁人身安全。目前, 污闪已成为影

响接触网系统可靠性的主要因素之一。据统计, 由绝缘子污闪引起的故障约占接触网故障总数的 30% 以上。深度剖析接触网绝缘子的抗污闪机理, 探求有效的性能提升手段, 对于保障电气化铁路安全运行具备重要的理论及现实意义, 国内外学者在绝缘子抗污闪技术范畴开展了大量研究工作, 在材料科学、结构设计、表面改性等领域实现了诸多进步, 本文以总结现有研究成果为基础, 结合工程实际操作的经验, 全面剖析了接触网绝缘子增强抗污闪性能的关键技术, 为相关工程应用给出借鉴。

1 接触网绝缘子污闪机理分析

接触网绝缘子污闪是一个复杂的物理化学过程, 涉及污秽积累、湿润、局部放电及最终击穿等多个阶段。在正

常运行状态下,绝缘子表面具有良好的绝缘性能,能够承受额定电压而不发生闪络。然而,当绝缘子表面积累污秽物质后,情况发生根本性改变。污秽层主要由工业粉尘、盐分、有机物质等组成,这些物质在干燥状态下虽然导电性较差,但在雾、露、毛毛雨等湿润条件下会溶解或吸湿,形成具有一定电导率的薄膜。此时绝缘子表面的电场分布发生畸变,在污秽层电阻较高的区域会产生较高的电场强度,当局部电场超过空气击穿强度时,就会产生局部电弧。电弧的产生会进一步加热周围的污秽层,增强其导电性,使电弧得以维持和发展。随着电弧长度的增加和电流的增大,当电弧跨越整个绝缘距离时,就发生了完全闪络,即污闪事故。影响污闪发生的主要因素包括污秽等级、湿度条件、绝缘子结构参数、运行电压等。其中,污秽等级是决定性因素,通常用等值附盐密度来表征。各个地区的污秽特性差异十分明显,沿海地区盐雾污秽占主导,工业区里的污秽以工业粉尘占大头,而农业区说不定含有较多的有机污秽,湿度状况是引发污闪的触发条件,若相对湿度在 80% 以上,污闪的危险程度显著提高,绝缘子的结构组成参数,诸如爬电距离、伞裙式样等,直接关乎其抗污闪能力,运行电压的幅值跟波形同样会影响污闪的发生概率和严重程度。

2 绝缘子材料改进技术

2.1 复合材料绝缘子的优势

复合材料绝缘子相比传统的瓷质和玻璃绝缘子,在抗污闪性能方面表现出明显优势。复合材料绝缘子主要由芯棒、硅橡胶护套和端部金具组成,其中硅橡胶护套是决定抗污闪性能的关键部分。硅橡胶材料具有优异的憎水性,这种特性使得绝缘子表面不易形成连续的水膜,即使在潮湿环境下也能保持相对较高的表面电阻。硅橡胶的憎水性主要源于其分子结构中的甲基基团,这些基团使得材料表面呈现低表面能特征,水滴在其表面呈珠状分布而不是形成连续薄膜。硅橡胶材料还体现出良好的憎水迁移性,当表面因沾染污染物而暂时没了憎水性时,材料里边的低分子硅氧烷会迁移到表层,再度恢复憎水特点,这种自我恢复能力让复合绝缘子在长期运行时依然能保持良好的抗污性能。复合材料绝缘子的另一个优势是重量轻,便于安装和维护,同时其抗冲击性能优于脆性材料,在恶劣环境下具有更好的可靠性。

2.2 纳米改性技术应用

纳米技术在绝缘材料改性方面展现出巨大潜力,通过在基体材料中添加纳米粒子可以显著改善材料的电气性能

和抗老化性能。常用的纳米改性剂包括纳米二氧化硅、纳米氧化铝、纳米二氧化钛等。纳米二氧化硅因其良好的分散性和与硅橡胶基体的相容性而被广泛应用。当纳米粒子均匀分散在硅橡胶基体中时,会在界面处形成双电层结构,这种结构能够有效阻止载流子的迁移,提高材料的体积电阻率。纳米粒子的掺入将影响材料的表面微观结构,引起表面粗糙度增加,这利于提升憎水性,同时延长水滴在表面的留存时间,纳米改性同样可显著增强材料的耐电晕性能,纳米粒子可分散电场应力,弱化局部电场的集中情形,由此降低电晕侵蚀的程度。在抗紫外老化方面,纳米二氧化钛等具有光催化活性的粒子能够吸收紫外线并将其转化为热能,保护基体材料免受紫外线损伤。然而,纳米改性技术的关键在于实现纳米粒子在基体中的均匀分散,避免团聚现象的发生,这需要通过表面改性、分散工艺优化等手段来实现。

2.3 抗污涂层技术

抗污涂层技术是通过在绝缘子表面涂覆特殊功能涂层来提高其抗污闪性能的方法。目前主要的抗污涂层类型包括憎水性涂层、自清洁涂层和导电涂层等。憎水性涂层通常以有机硅材料为主体,通过化学键合或物理吸附的方式在绝缘子表面形成稳定的憎水层。该涂层能够明显降低表面能,使污秽物质不易黏附上去,同时阻拦水分在表面形成连续薄膜,自清洁涂层乃是受荷叶表面微观结构启迪而开发的仿生涂层,依靠构建微纳米复合结构实现超疏水性,该涂层表面接触角一般是大于 150° ,水滴在其表面差不多呈球形进行分布,能在重力的作用下滚动,同时带走表面的污垢,达成自我去污功能。导电涂层的原理与前两种不同,它是在绝缘子表面均匀涂覆一层电阻率适中的导电材料,使表面电场分布更加均匀,消除局部电场集中现象,从而抑制局部放电的产生。涂层技术的优势在于可以在现有绝缘子基础上实施改造,成本相对较低,但涂层的耐久性和长期稳定性仍需进一步验证和改进。

3 绝缘子结构优化设计

3.1 伞裙结构参数优化

绝缘子的伞裙结构是影响其抗污闪性能的重要因素,通过优化伞裙的几何参数可以有效提高抗污性能。伞裙结构的主要参数包括伞裙直径、间距、倾斜角度、厚度等。增大伞裙直径能够延长爬电距离,提高绝缘强度,但同时会增加污秽的积累面积,尤其在多尘、高温等恶劣环境中,过大的直径可能导致污秽快速堆积,反而影响绝缘效果。故而需在保证爬电距离足够的前提下,结合具体应用环境

的污秽级别,恰当地把控伞裙尺寸,设计伞裙间距时需要把自清洁效果考虑进去,间距过小会妨碍雨水冲刷的效果,引发污秽在间隙内留存;过大则有概率造成电场分布不均一,增添局部放电的潜在危险。要是伞裙间距与伞裙直径的比值处于 0.3-0.5 这个范围,可收获不错的自清洁效果,在多雨区域可适当往比值上限方向靠,促进雨水的流动效果,伞裙倾斜角度对雨水的流向以及污秽的沉积特性造成影响,恰当的倾斜角度对雨水冲刷和污秽自然脱落有利。一般情况下,上表面倾斜角度宜控制在 15° - 25° 范围内,下表面倾斜角度宜控制在 10° - 20° 范围内,在强风地区可微调角度以减少风荷载对伞裙的冲击。伞裙厚度的增加有利于提高机械强度,抵御外力冲击和温度变化带来的应力,但会增加材料用量和成本,同时可能影响散热性能。在满足机械性能要求的前提下,应尽量减小伞裙厚度,可通过采用高强度复合材料来实现厚度与性能的平衡。

3.2 爬电距离设计准则

爬电距离是绝缘子抗污闪性能的重要指标,合理确定爬电距离对保证绝缘子在污秽环境下的可靠运行至关重要。爬电距离的设计需要考虑运行电压等级、污秽等级、绝缘子材料类型等多种因素,同时还需结合当地的气象特征,如降水量、湿度、风速等,这些因素会直接影响污秽在绝缘子表面的积累速度和电气性能衰减规律。依照 IEC 相关标准,有明确规定表明不同污秽等级对应的最小公称爬电距离,但在实际的工程应用里还得把当地具体环境条件考虑进去,譬如工业区的粉尘成分特点、沿海区域的盐雾浓度状况、山区的雾凇现象特征等特殊污染因素,这些都会造成实际污秽强度远远超出标准所划分的等级界限,针对接触网绝缘子,鉴于其运行环境相对繁杂,污秽来源呈现多样性,诸如列车尾气、沿线飘散的扬尘、农业生产粉尘等,建议在标准要求的基础上,恰当增加 10%-20% 的设计裕度,以应对突然降临的污染负荷。爬电距离的增加主要通过增加伞裙数量或优化伞裙形状来实现。增加伞裙数量是最直接的方法,但会增加绝缘子的整体高度和重量,对安装结构的承重能力提出更高要求,同时可能加大风阻系数,影响在强风环境下的稳定性。优化伞裙形状,如采用波浪形、锯齿形等异形伞裙,可以在不显著增加绝缘子尺寸的情况下增加爬电距离,其中锯齿形伞裙还能通过改变气流方向增强自清洁效果,但需注意边缘曲率对电场分布的影响。

3.3 电场分布优化技术

电场分布的均匀性直接影响绝缘子的抗污闪性能,电

场集中区域容易产生局部放电,成为污闪的起始点。因此,通过结构设计优化电场分布是提高抗污闪性能的重要途径。电场分布优化主要从几何形状和材料配置两个方面入手。在几何形状方面,可以通过调整绝缘子的轮廓曲线、伞裙的形状和布置来改善电场分布。采用流线型设计能有效防止尖角和突变的出现,缓和电场集中现象,在紧要的部位,若如金具和绝缘体的连接位置,可以安装电场均化环,也能采用渐变过渡设计以改善电场分布,从材料配置角度,能采用分层与梯度设计方案,在不同的部位采用不同介电常数的材料,实现电场的重新铺排。数值仿真技术在电场分布优化中发挥重要作用,通过建立精确的三维模型,可以定量分析不同设计方案下的电场分布特性,识别电场集中区域,为结构优化提供科学依据。在仿真分析基础上,还需要通过试验验证来确认设计效果,常用的试验方法包括电场测量、局部放电测试、污闪试验等。

3.4 自清洁结构设计

自清洁结构设计是近年来绝缘子技术发展的新方向,通过巧妙的结构设计使绝缘子具备自主清除污秽的能力,从根本上减少污秽的积累。自清洁结构的设计理念主要包括重力清洁、风力清洁和雨水冲刷等机制。重力清洁是利用污秽物质的重力作用实现自然脱落,这要求绝缘子表面具有适当的倾斜角度和光滑度,避免形成污秽积累的死角。风力清洁则是利用自然风力对污秽物质的吹扫作用,通过优化绝缘子的外形设计,在关键部位形成有利的气流场,增强风力清洁效果。雨水冲刷是最主要的自清洁机制,通过合理设计水流路径,使雨水能够有效冲刷绝缘子表面的污秽物质。在具体的设计工作里,可采用像导流槽、排水孔之类的结构,让雨水顺着预先定好的路径流动,加大冲刷效率,伞裙的设计应杜绝形成积水区域,防止污秽物在停滞的水中沉淀积累,另外能在绝缘子表面设置微观架构,诸如微沟槽、微凸起等样,这些结构能让水滴的形态与流动特性得到改变,增进自清洁效果。自清洁结构设计需要综合考虑当地的气候条件、污秽特性等因素,通过风洞试验、水流试验等手段验证设计效果。

4 抗污闪性能测试与案例分析

以某东部沿海高铁线路的绝缘子改造为例,其充分体现了科学测试与工程实践的结合。该线路地处海洋性气候区域,盐雾污染严重,原有瓷质绝缘子频繁发生污闪故障。现场调研发现绝缘子表面盐密度普遍超过 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$,属于重污秽区域,而原有绝缘子爬电距离仅为 $25\text{mm}/\text{kV}$,无法满足使用要求。改造方案采用复合材料绝缘子,将爬电

距离提高到 31mm/kV, 采用交替大小伞设计增强自清洁能力, 硅橡胶护套经纳米改性处理, 添加 3% 纳米二氧化硅显著提高憎水性和耐老化性能。改造后运行监测表明, 新型绝缘子表面始终保持良好憎水状态, 泄漏电流峰值比改造前降低 70% 以上, 线路可用率从 97.2% 提升到 99.8%, 两年内未再发生污闪故障。为实现对绝缘子设计制造与运维方面的指导, 建立科学健全的性能评价体系意义重大, 该体系应包含材料性能、结构设计、电气特性、环境适应性等多维度的相关指标, 材料性能重点考量憎水性、憎水自主恢复性、耐老化性能情况等; 结构设计审视伞裙参数的合理状态、爬电距离的充裕状态、电场分布的均匀状态; 电气特性关键评价各种闪络电压及泄漏电流; 环境适应性需考虑不同气候、污秽类型、海拔高度等因素影响。通过建立权重分配和综合评分方法, 形成量化评价结果, 并利用数据库和专家系统实现评价的自动化和标准化, 为绝缘子选型和优化提供科学依据。这种将标准化测试、工程实践和系统评价相结合的方法, 为解决接触网绝缘子污闪问题提供了有效途径。

5 结语

本文系统研究接触网绝缘子抗污闪性能提升关键技术, 分析污闪机理与影响因素, 阐述材料改进、结构优化、测试评价等技术现状与趋势。研究显示, 采用复合材料、纳米改性及抗污涂层可提升憎水性与耐老化性; 优化伞裙

结构、设计爬电距离及改善电场分布能增强抗污闪能力; 科学测试方法与评价体系为选型应用提供依据。工程案例验证了技术措施的有效性, 综合运用多种手段可根本解决污闪问题。随着新材料跟制造工艺的发展, 绝缘子的抗污闪能力会进一步增强, 未来应当聚焦在智能化监测、自适应清洁、多功能一体化设计上, 为满足高铁在可靠性及智能化上的更高需求, 持续开展技术创新与实践能完善抗污闪技术, 维护电气化铁路的安全运转, 对应成果还可拓展到输电线路等领域, 收获广泛效益。

参考文献:

- [1] 秦永超. 新建电气化铁路负荷预测及其有效性评估[D]. 成都: 西南交通大学, 2023:2-4.
- [2] 沉钧. 中国高铁创多个世界第一[J]. 交通与运输, 2024,33(02):44.
- [3] 余巧凤, 梁栋. 中长期高速铁路网规划相关问题研究[J]. 铁道经济研究, 2023,35(01):5-9.
- [4] 梁曦东, 高岩峰, 王家福等. 中国硅橡胶复合绝缘子快速发展历程[J]. 高电压技术, 2024,42(09):288-289.
- [5] 张智涛, 景小兵, 陈唐龙等. 高湿度环境下接触网腕臂复合绝缘子泄漏电流频谱分析[J]. 铁道学报, 2024,37(03):35-41.

作者简介: 刘西仓 (1992.10-), 男, 汉族, 山东省菏泽市人, 助理工程师, 研究方向: 铁路牵引供电接触网。