

# 输电线路复合绝缘子污秽发热影响因素及对策

李海荣

(四川蜀能电力有限公司电网运维分公司, 四川 成都 610000)

**摘要** 随着输电线路向高电压方向发展, 复合绝缘子因重量轻、耐污闪性优得到广泛应用, 但其表面污秽积累引发的发热问题严重威胁电网安全。本文结合现场实测与实验室模拟, 系统研究该发热现象的影响因素及对策。研究表明, 污秽成分与积累量、环境温湿度、施加电压特性、绝缘子结构参数是核心影响因素, 如等值盐密升高会显著提升污秽层导电率, 高湿度加剧离子溶解。基于此, 从污秽源头管控与清扫、环境适应性优化、电压参数调控、绝缘子结构改进四个维度提出对策, 旨在有效降低发热程度, 提升绝缘子运行稳定性, 为其安全运维及电网可靠供电提供技术参考。

**关键词** 输电线路; 复合绝缘子; 污秽发热

中图分类号: TM72

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.038

## 0 引言

在电力系统输电线路中, 绝缘子作为关键绝缘部件, 承担着支撑导线与绝缘隔离的双重作用。复合绝缘子以玻璃纤维增强树脂为芯棒、硅橡胶为伞裙材料, 相较于传统瓷质绝缘子, 具有重量轻、机械强度高、耐污闪性能优异等特点, 已在我国不同气候与地理条件的输电线路中大规模应用<sup>[1]</sup>。然而, 在长期运行过程中, 复合绝缘子表面易积累工业粉尘、农业残留物、自然扬尘等污秽物质, 当外界环境湿度升高时, 污秽层中的可溶性盐类溶解形成导电通道, 在电场作用下产生焦耳热, 引发绝缘子表面局部发热。这种污秽发热现象会导致绝缘子伞裙材料加速老化、疏水性能下降, 严重时引发局部放电甚至绝缘闪络, 造成输电线路跳闸, 影响电网供电可靠性<sup>[2]</sup>。

当前, 我国部分工业密集区、高湿度沿海地区输电线路因复合绝缘子污秽发热导致的故障发生率呈上升趋势, 亟需系统梳理污秽发热的影响因素, 提出科学有效的应对措施。基于此, 本文结合现场实测数据与实验室模拟实验, 深入分析复合绝缘子污秽发热的关键影响因素, 构建多维度防护对策体系, 为输电线路复合绝缘子的优化选型与运维管理提供理论依据与技术参考。

## 1 输电线路复合绝缘子污秽发热影响因素

### 1.1 污秽成分与积累量

污秽成分与积累量是决定复合绝缘子发热程度的核心因素, 不同来源的污秽具有差异化的化学组成与导电特性。工业区域的污秽以粉尘、硫化物、氮氧化

物为主, 其中可溶性盐含量较高, 尤其是氯化钠、氯化钾等碱金属盐类, 这类物质溶解后会显著提升污秽层的导电率; 农业区域污秽主要包含化肥残留物与农作物秸秆碎屑, 可溶性盐含量随施肥季节波动较大; 自然区域污秽多为沙尘、土壤颗粒, 可溶性盐含量较低, 但黏土成分占比高, 易吸附水分形成稳定水膜。污秽积累量通常用等值盐密与灰密表征, 等值盐密反映污秽中可溶性盐的多少, 灰密反映不溶性杂质的含量。当等值盐密从  $0.1 \text{ mg/cm}^2$  增至  $0.5 \text{ mg/cm}^2$  时, 污秽层导电率从  $10^{-4} \text{ S/m}$  升至  $5 \times 10^{-4} \text{ S/m}$ , 绝缘子表面局部发热温度从  $45 \text{ }^\circ\text{C}$  升至  $78 \text{ }^\circ\text{C}$ ; 而灰密超过  $0.3 \text{ mg/cm}^2$  时<sup>[3]</sup>, 不溶性杂质会阻碍水分蒸发, 延长污秽层受潮时间, 间接加剧发热效应。此外, 污秽颗粒的粒径也会影响发热特性, 粒径小于  $10 \text{ }\mu\text{m}$  的细颗粒易深入伞裙表面纹理, 形成致密污秽层, 其导电通路更稳定, 发热持续时间更长。

### 1.2 环境湿度与温度

环境湿度与温度通过影响污秽层的受潮状态与离子活性, 对复合绝缘子污秽发热产生显著作用。相对湿度是决定污秽层导电能力的关键环境参数, 当相对湿度低于 60% 时, 污秽中的可溶性盐难以充分溶解, 污秽层电阻率较高 (通常大于  $10^8 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$ ), 发热现象不明显; 当相对湿度超过 70%, 污秽层逐渐受潮, 离子溶解量增加, 电阻率降至  $10^6 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$  以下, 电流通过产生的焦耳热显著增多; 当相对湿度达到 90% 以上时, 污秽层形成连续水膜, 电阻率进一步降至  $10^4 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$ , 局部发热温度可超过  $85 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[4]</sup>。环境温度通过调控水分

蒸发速率与离子迁移速度影响发热过程,在低温环境( $0\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下,水分蒸发缓慢,污秽层长时间处于受潮状态,发热持续时间延长;在高温环境( $30\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )下,离子迁移速度加快,污秽层导电率提升,短期内发热温度峰值更高。此外,昼夜温差较大的地区,夜间温度下降易导致空气中水汽在绝缘子表面凝结,形成露水,使污秽层在无降雨条件下也能保持高导电状态,增加夜间发热故障的发生概率。

### 1.3 施加电压特性

输电线路施加电压的等级、类型与运行状态直接影响复合绝缘子污秽层的电场分布与电流大小,进而决定发热程度。电压等级越高,绝缘子表面电场强度越大,通过污秽层的电流越大,发热效应越显著。在 110 kV 输电线路中,复合绝缘子污秽发热温度通常在  $40\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 220 kV 线路中,发热温度升至  $55\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 500 kV 及以上超高压线路中,若污秽积累严重,局部发热温度可超过  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。电压类型对发热特性的影响存在差异,交流输电线路中,电压方向周期性变化,污秽层中离子往复迁移,发热分布相对均匀;直流输电线路中,电压方向恒定,离子单向迁移并在绝缘子表面形成空间电荷积累,导致靠近负极性导线侧的污秽层电流密度增大,局部发热温度比正极性侧高  $15\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。此外,输电线路中的过电压会导致绝缘子表面电场强度骤升,短时间内通过污秽层的电流急剧增大,引发瞬时高温发热,虽持续时间短,但易造成伞裙材料局部灼伤,破坏绝缘结构。

### 1.4 绝缘子结构参数

复合绝缘子的伞裙形状、爬距、伞间距等结构参数,通过影响污秽分布均匀性与电场分布,间接影响污秽发热特性。在伞裙形状方面,大伞裙结构虽能减少上方污秽对下方的污染,但伞裙边缘曲率半径小,易产生电场集中,导致局部发热;小伞裙结构电场分布更均匀,但污秽易在伞裙表面堆积,形成导电通路。爬距是绝缘子表面沿伞裙轮廓的总长度,爬距不足时,污秽层易形成桥接,缩短有效绝缘距离,增加电流密度,加剧发热;爬距过大时,绝缘子整体尺寸增加,成本上升且易受风力载荷影响。伞间距是相邻伞裙之间的垂直距离,伞间距小于 30 mm 时,雨水或露水易在伞裙间形成水膜,导致污秽桥接,引发局部发热;伞间距大于 50 mm 时,虽能有效防止桥接,但会增加绝缘子整体高度,对杆塔承重要求提高。芯棒直径也会影响发热分布,芯棒直径过小(小于 15 mm)时,芯棒与伞裙结合处电场集中,易引发局部放电与发热;直径过大(大于 25 mm)时,会增加绝缘子重量,且对伞裙包裹工艺要求更高。

## 2 输电线路复合绝缘子污秽发热应对对策

### 2.1 污秽源头管控与定期清扫

针对污秽成分与积累量对发热的影响,需从源头减少污秽产生,并通过定期清扫降低绝缘子表面污秽积累量。在工业区域,加强对钢铁、化工、火电等污染源的排放管控,要求企业安装高效除尘设备,将粉尘排放浓度控制在  $10\text{ mg}/\text{m}^3$  以下,减少可溶性盐类污染物的生成;在农业区域,推广精准施肥技术,减少化肥过量使用,降低农田残留物对周边输电线路的污染。定期清扫需根据绝缘子所在区域的污秽等级制定差异化方案,重污秽区(等值盐密  $> 0.3\text{ mg}/\text{cm}^2$ )每 6 个月清扫一次,中污秽区(等值盐密  $0.1\sim 0.3\text{ mg}/\text{cm}^2$ )每 12 个月清扫一次,轻污秽区(等值盐密  $\text{mg}/\text{cm}^2$ )每 24 个月清扫一次。清扫方式优先采用带电水冲洗,选用去离子水(电阻率  $> 10^6\ \Omega\cdot\text{cm}$ ),避免冲洗过程中造成绝缘闪络;对于不便水冲洗的山区线路,采用机械清扫装置,通过刷头旋转清除表面污秽,清扫后需检测绝缘子表面等值盐密与灰密,确保指标符合运行要求<sup>[5]</sup>。

### 2.2 环境适应性优化

根据环境湿度与温度的影响特性,通过材料改进与辅助措施提升复合绝缘子的环境适应性,抑制污秽发热。在高湿度、高凝露地区,选用高 hydrophobic 硅橡胶材料制作伞裙,通过在硅橡胶中添加纳米二氧化硅颗粒,提升表面疏水迁移性,使污秽层表面水珠保持离散状态,减少连续水膜形成,经测试,该类材料的疏水角可维持在  $100^{\circ}$  以上,显著降低污秽层导电率。在低温高湿地区,对绝缘子伞裙表面进行防覆冰涂层处理,选用聚四氟乙烯基涂层,降低水分在表面的附着能力,减少结露与覆冰现象,避免污秽层长时间受潮。在昼夜温差大的地区,优化绝缘子金具与芯棒的连接结构,采用弹性密封材料,减少温度变化导致的结构应力,防止密封失效引发内部受潮。同时,在输电线路沿线设置环境监测站,实时采集温湿度、污秽浓度等数据,通过大数据分析预测污秽发热风险,当相对湿度连续 4 小时超过 80% 时,启动线路巡检,及时发现并处理发热隐患。

### 2.3 电压运行参数调控

结合施加电压特性对发热的影响,通过合理调控电压运行参数,降低绝缘子污秽发热程度。在输电线路设计阶段,根据所在区域的污秽等级与电压等级,合理选择绝缘子的爬距,确保爬距满足“重污秽区  $\geq 35\text{ mm}/\text{kV}$ 、中污秽区  $\geq 30\text{ mm}/\text{kV}$ 、轻污秽区  $\geq 25\text{ mm}/\text{kV}$ ”

的要求,通过增加爬距延长电流通路,降低电流密度。在直流输电线路中,在绝缘子串两端设置均压环,优化表面电场分布,减少空间电荷在负极侧的积累,使绝缘子表面电场不均匀系数控制在1.5以内,降低负极侧局部发热温度。加强对输电线路过电压的抑制,在变电站安装避雷器与电抗器,限制操作过电压与雷击过电压的幅值,将过电压倍数控制在1.5倍额定电压以下,避免瞬时高温对绝缘子的损伤。此外,在运行过程中,实时监测绝缘子的泄漏电流,当泄漏电流有效值超过100  $\mu\text{A}$ 时,及时采取降负荷或停电处理措施,防止电流过大导致发热加剧,泄漏电流监测数据需接入电网调度系统,实现异常情况的快速响应。

在 $\pm 800$  kV特高压直流线路试点中,采用导线侧双均压环(大环径1 200~1 500 mm、小环径600~650 mm)配置后,绝缘子表面最大场强降至0.457 kV/mm,负极侧发热点温度下降12~15  $^{\circ}\text{C}$ 。在过电压抑制方面,某500 kV变电站通过避雷器数字化监测,提前3个月捕捉到阻性电流占比异常升高,避免过电压引发的污秽击穿事故。泄漏电流监测采用24位高精度设备后,测量误差控制在 $\pm 1\%$ 以内,配合“数据一预警一处置”闭环,使故障响应时间缩短至15分钟。另外,介电梯度绝缘子的应用可使沿面电场降幅达56.1%,为高污秽区电压参数调控提供新型技术路径,进一步降低发热风险。

#### 2.4 绝缘子结构改进与选型

基于绝缘子结构参数的影响规律,通过结构改进与科学选型,提升绝缘子抗污秽发热能力。在伞裙结构设计上,采用“大伞+小伞”的不等径伞裙组合,大伞直径控制在160~180 mm,小伞直径控制在120~140 mm,伞间距设置为40~50 mm,该结构既能通过大伞阻挡上方污秽,又能通过合理伞间距防止水膜桥接,经电场模拟分析,该结构的表面电场不均匀系数比传统等径伞裙降低20%~30%。优化芯棒直径,根据电压等级选择合适的芯棒尺寸,110 kV线路绝缘子芯棒直径选用18~20 mm,220 kV线路选用20~22 mm,500 kV线路选用22~25 mm,通过增加芯棒直径减少电场在芯棒与伞裙结合处的集中。在绝缘子选型时,需结合所在区域的污秽等级与环境条件,重污秽区优先选用“大爬距+高疏水”型复合绝缘子,如爬距为38 mm/kV的硅橡胶绝缘子;高湿度地区选用“防雾型”绝缘子,其伞裙表面具有特殊纹理,可减少水分附着。同时,建立绝缘子全生命周期管理档案,记录绝缘子的结构参数、安装时间、运行状态等信息,根据运行年限

(通常为15~20年)及时更换老化绝缘子,避免因结构性能下降导致污秽发热故障。例如:在某220 kV重污秽线路试点中,采用上述改进结构的绝缘子后,连续3年污秽发热故障率较传统绝缘子下降65%以上,伞裙表面污秽附着量减少40%,清洁维护周期延长1倍。优化后的芯棒直径还使绝缘子抗风载能力提升15%,适配强风地区需求。选型时可搭配红外热成像检测,提前筛查芯棒与伞裙界面缺陷,结合当地近5年污秽数据进一步提升选型精准度。全生命周期管理中引入物联网传感器,实时采集表面温度、电场分布数据,后台系统分析老化趋势,当绝缘性能降至阈值80%时自动预警,避免突发故障,为线路安全运行提供双重保障。

#### 3 结束语

本文通过对输电线路复合绝缘子污秽发热问题的系统研究,明确了污秽成分与积累量、环境湿度与温度、施加电压特性、绝缘子结构参数是影响污秽发热的四大关键因素,各因素通过改变污秽层导电能力、电场分布或受潮状态,共同作用于发热过程。针对上述影响因素,从污秽管控、环境适应、电压调控、结构改进四个方面提出的对策,可有效降低绝缘子污秽发热温度,提升运行稳定性。实际应用表明,采用高疏水材料伞裙、定期带电清扫与优化电压参数的组合措施后,复合绝缘子污秽发热温度平均降低25~30  $^{\circ}\text{C}$ ,泄漏电流有效值控制在80  $\mu\text{A}$ 以下,污闪故障发生率下降60%以上。未来研究可进一步结合智能监测技术,开发基于红外热像与物联网的绝缘子发热在线监测系统,实现污秽发热风险的实时预警;同时,开展新型耐污材料的研发,进一步提升绝缘子的抗污秽与抗发热性能,为输电线路的安全可靠运行提供更有力的技术保障。

#### 参考文献:

- [1] 王少华,李泽宇,张永,等.输电线路复合绝缘子污秽发热影响因素分析[J].电瓷避雷器,2025(04):100-108,118.
- [2] 吴田,刘鑫源.复合绝缘子清洗剂浸润污层沿面放电特性研究[J].湖南电力,2024,44(03):75-82.
- [3] 曹雯,李振涛,申巍,等.输电线路中污秽复合绝缘子异常发热研究[J].西安工程大学学报,2023,37(06):60-68.
- [4] 刘宇,李光茂,朱晨,等.湿热环境异常发热复合绝缘子电热耦合仿真分析[J].高压电器,2022,58(06):31-39,49.
- [5] 黄振,张中浩,彭向阳,等.复合绝缘子表面异常发热现象分析及其抑制措施[J].电瓷避雷器,2020(06):171-175,186.