

# 特高压输电线路覆冰监测与融冰技术应用及效果分析

王 拓

中电建新疆勘测设计研究院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830063

**摘 要:** 特高压输电线路是能源跨区域输送的关键载体,其安全稳定运行对能源供应保障意义重大。覆冰灾害是威胁其安全的主要风险,易造成杆塔断裂、线路短路等严重故障。本文深入探究特高压输电线路覆冰的形成机理与核心危害,全面梳理传统和智能覆冰监测技术的特性。同时,详细分析热力、机械、化学等融冰技术的原理及适用场景,经技术对比明确不同场景下的选型依据。结合实际案例总结技术应用成效,最终给出技术优化与管理完善的双重策略,并展望未来发展趋势,为提升覆冰防控能力提供理论与实践参考。

**关键词:** 特高压输电线路;覆冰监测;融冰技术;应用

引言:随着特高压输电工程的大规模建设,线路覆盖范围不断扩大,部分线路途经高寒、高海拔及雨雪多发区域,覆冰灾害频发。覆冰会导致线路机械荷载激增、绝缘性能下降,严重时引发大面积停电事故,造成巨大经济损失与社会影响。基于此,本文聚焦特高压输电线路覆冰监测与融冰技术,系统分析其应用现状与效果,提出优化策略,为提升电网抗冰灾能力、保障能源安全输送提供切实可行的解决方案。

## 1 特高压输电线路覆冰机理与危害分析

### 1.1 覆冰形成机理

特高压输电线路覆冰是特定气象条件与线路特性共同作用的结果,核心形成条件包括低温、过冷水滴、适宜风速及充足的水汽供应。当环境温度降至 $0^{\circ}\text{C}$ 以下,含有过冷水滴的云雾、雨雪遇到输电线路时,会迅速在导线表面冻结形成覆冰。覆冰生长速度与过冷水滴浓度、风速及线路温度密切相关:风速在 $2\sim 10\text{m/s}$ 时,过冷水滴与导线碰撞概率最高,覆冰生长最快;线路表面温度越低,水滴冻结速度越快,覆冰密度越大。根据覆冰成分与形成环境,可分为雨淞、雾淞、混合冰或者glaze冰(雨淞)、rime冰(雾淞)、mixed冰(混合冰),其中glaze冰(雨淞)冰密度大、附着力强,对线路破坏性最强。此外,特高压线路导线截面大、跨度长,易形成局部微气候,进一步加剧覆冰累积,给线路安全带来严重隐患。

### 1.2 覆冰对线路的危害

#### 1.2.1 机械荷载增加导致的杆塔变形与断裂

覆冰会显著增加输电线路的机械荷载,当覆冰厚度超过线路设计承载极限时,会引发一系列机械故障。导线覆冰后重量激增,对杆塔产生巨大的垂直拉力,导致杆塔出现倾斜、变形,严重时发生杆塔根部断裂、倒塌。同时,覆冰导线的风荷载也会大幅增加,形成“覆冰+风

荷载”的叠加作用,进一步加剧杆塔的受力负担。另外,覆冰不均匀分布会导致导线张力失衡,引发杆塔单侧受力过大,出现杆塔横担弯曲、绝缘子串断裂等问题。历史数据显示,当导线覆冰厚度达到 $20\text{mm}$ 以上时,杆塔损坏率显著上升,单次严重覆冰灾害可能造成数十座杆塔损毁,导致线路长时间停运<sup>[1]</sup>。

#### 1.2.2 绝缘子冰闪引发的短路故障

绝缘子覆冰及表面污秽物混合会大幅降低其绝缘性能,极易引发冰闪故障,导致线路短路。覆冰过程中,绝缘子表面会形成一层冰膜,冰膜中夹杂的污秽物会溶解形成导电通道,使绝缘子泄漏电流增大。当环境温度变化导致冰膜融化时,绝缘子表面会形成水膜,进一步降低绝缘电阻,最终引发闪络放电。冰闪故障具有突发性强、影响范围广的特点,一旦发生会导致线路跳闸,若多个绝缘子同时闪络,可能引发大面积电网故障。此外,冰闪还会损坏绝缘子表面,降低其使用寿命,增加线路维护成本与安全风险。

#### 1.2.3 舞动现象对线路动态稳定性的破坏

覆冰导线在风力作用下易产生低频、大振幅的舞动现象,严重破坏线路动态稳定性。覆冰导线表面形成非对称的气动外形,在一定风速作用下会产生周期性的空气动力,引发导线横向舞动,舞动振幅可达数米。舞动过程中,导线会与相邻导线、杆塔发生碰撞,导致导线磨损、断股,甚至引发线路短路;同时,舞动产生的周期性冲击力会作用于杆塔、绝缘子串及金具,加剧其疲劳损伤,缩短使用寿命。极端情况下,舞动可能导致导线断裂、杆塔倒塌,造成严重的输电事故,对电网安全稳定运行构成致命威胁。

## 2 特高压输电线路覆冰监测技术

### 2.1 传统监测方法

传统覆冰监测方法以人工监测为主, 辅以简易仪器测量, 具有操作简单、成本低的特点, 但存在监测范围有限、精准度低、实时性差等弊端。人工监测通过运维人员定期巡检, 采用目测或简易工具测量导线覆冰厚度, 适用于短距离、低风险线路。该方法受天气条件、人员经验影响较大, 在极端天气下巡检人员难以抵达现场, 无法及时获取覆冰数据。简易仪器监测包括称重法、测厚法等, 通过在导线上安装机械式传感器间接获取覆冰数据, 但此类仪器易受环境干扰, 测量误差较大, 且无法实现数据远程传输, 需人工现场读取, 难以满足特高压线路大范围、实时监测的需求。

## 2.2 智能监测技术

### 2.2.1 在线监测系统

在线监测系统是当前特高压线路覆冰监测的主流技术, 通过在现场部署传感器、数据采集终端及通信设备, 实现覆冰数据的实时采集、传输与分析。系统核心包括覆冰厚度传感器、张力传感器、环境传感器等, 可同步采集导线覆冰厚度、张力、环境温度、湿度、风速等数据。数据通过4G/5G、北斗等通信技术传输至后台监控中心, 工作人员通过平台实时掌握线路覆冰状态, 当数据超过预警阈值时, 系统自动发出警报<sup>[2]</sup>。该技术具有监测精准、实时性强、覆盖范围广的特点, 可实现24小时不间断监测, 为覆冰防控提供精准数据支撑。

### 2.2.2 遥感监测技术

遥感监测技术适用于大范围、偏远区域的特高压线路覆冰监测, 主要包括卫星遥感、无人机遥感两种类型。卫星遥感通过搭载微波传感器的卫星获取线路区域的覆冰信息, 利用微波对冰、雪、水的不同反射特性, 实现覆冰范围与厚度的大面积监测, 适用于跨区域特高压线路的宏观监测。无人机遥感结合高清摄像头、红外热像仪等设备, 可近距离获取线路覆冰细节数据, 精准测量覆冰厚度, 适用于重点区域的精细化监测。该技术具有监测范围广、灵活性强的优势, 可有效弥补在线监测系统在偏远区域的覆盖不足问题。

### 2.2.3 AI辅助分析

AI辅助分析技术通过融合大数据、机器学习等技术, 提升覆冰监测的智能化水平。基于历史覆冰数据、气象数据构建机器学习模型, 可实现覆冰厚度的精准预测, 为融冰决策提供提前量; 利用计算机视觉技术对无人机、在线监测系统采集的图像进行分析, 自动识别覆冰状态, 替代人工判读, 提升监测效率与准确性。此外, AI技术可实现监测数据的深度挖掘, 分析覆冰生长规律与气象条件的关联关系, 为线路抗冰设计与运维优化提供数据支

撑。该技术的应用的大幅提升了覆冰监测的自动化与智能化程度, 推动监测模式从“被动响应”向“主动预测”转变。

## 2.3 监测技术对比与选型建议

不同覆冰监测技术在精准度、监测范围、成本等方面存在显著差异: 传统监测方法成本低但精准度与实时性差, 仅适用于小规模线路的辅助监测; 在线监测系统精准度高、实时性强, 但建设与维护成本较高, 适用于核心区域、高风险线路的常态化监测; 遥感监测技术覆盖范围广, 适用于偏远、大范围线路的宏观监测, 但受天气条件影响较大; AI辅助分析技术可提升监测智能化水平, 需与其他监测技术结合使用。选型时需结合线路所处区域环境、风险等级及预算情况, 构建“在线监测+遥感监测+AI分析”的多元监测体系, 核心区域部署在线监测系统, 偏远区域结合无人机与卫星遥感, 通过AI技术实现数据融合分析, 提升整体监测效能<sup>[3]</sup>。

## 3 特高压输电线路融冰技术及应用

### 3.1 热力融冰技术

热力融冰技术通过产生热量使导线覆冰融化, 是当前特高压线路应用最广泛的融冰技术, 主要包括交流短路融冰、直流融冰及自愈式融冰三种类型。交流短路融冰通过将线路分段短路, 利用导线自身电阻产生热量融冰, 设备简单、成本低, 但融冰过程中会影响局部供电。直流融冰通过专用直流融冰装置向线路输出直流电流, 控制电流大小调节发热量, 融冰效率高、对电网影响小, 适用于特高压线路大规模融冰。自愈式融冰通过在导线表面涂抹特殊发热材料, 通电后产生热量融冰, 适用于局部关键线路。该技术融冰效果稳定, 可快速消除覆冰, 但能耗较高, 需结合覆冰监测数据精准控制融冰时机。

### 3.2 机械除冰技术

机械除冰技术通过机械力破坏覆冰与导线的结合, 实现覆冰清除, 具有能耗低、适用范围广的特点, 主要包括人工机械除冰、无人机除冰及机器人除冰。人工机械除冰通过运维人员使用除冰工具敲击导线清除覆冰, 适用于短距离、小范围覆冰, 但效率低、安全风险高。无人机除冰通过搭载除冰装置(如高压气流喷射器、破冰锤)远程清除覆冰, 适用于偏远、高风险区域。机器人除冰通过智能机器人沿导线行走, 利用机械臂清除覆冰, 可实现自动化、精准除冰, 适用于核心线路的常态化除冰。该技术虽能耗低, 但受导线结构、覆冰类型影响较大, 对严重覆冰的清除效果有限。

### 3.3 化学融冰技术

化学融冰技术通过在导线表面喷洒化学融冰剂降低

冰水凝固点,阻止覆冰形成或加速覆冰融化,主要适用于轻度覆冰及覆冰预防。常用融冰剂包括氯化钠、氯化钙等无机融雪剂及环保型有机融冰剂,无机融冰剂融冰效果好、成本低,但会对导线、杆塔造成腐蚀,污染环境;环保型有机融冰剂腐蚀性低、环保性好,但成本较高。该技术操作简单、见效快,可通过人工或自动喷洒装置实施,适用于线路绝缘子、金具等关键部位的覆冰预防与清除。但由于融冰剂作用时效有限,且需定期补充,不适用于长时间、大范围的严重覆冰治理。

#### 3.4 技术对比与适用场景

各类融冰技术的特点与适用场景存在明显差异:热力融冰技术融冰效率高、效果稳定,但能耗与成本较高,适用于核心线路、严重覆冰的紧急治理;机械除冰技术能耗低、环保性好,但效率有限,适用于轻度至中度覆冰及偏远区域线路;化学融冰技术操作简单、成本低,但腐蚀性强、作用时效短,适用于轻度覆冰预防与关键部位除冰。实际应用中需结合覆冰厚度、线路重要程度、环境要求等因素合理选型:核心骨干线路优先采用直流融冰技术;偏远区域线路结合无人机与机械除冰;绝缘子等关键部位采用环保型化学融冰剂预防覆冰,构建多技术协同的融冰体系,提升覆冰治理效果。

### 4 优化策略与未来展望

#### 4.1 技术优化方向

覆冰监测与融冰技术需向精准化、高效化、智能化方向优化。监测技术方面,提升传感器在极端环境下的稳定性与精准度,开发多源数据融合算法,强化AI预测模型的泛化能力,实现覆冰厚度与生长趋势的精准预测。融冰技术方面,优化直流融冰装置的能耗与体积,开发低能耗、高效率的新型热力融冰技术;提升机器人除冰的适应性,研发可应对复杂覆冰类型的机械除冰装置;开发无腐蚀、长效型环保融冰剂,降低对环境与设备的影响<sup>[4]</sup>。另外,推动监测与融冰技术的联动融合,实现“监测-预测-融冰-反馈”的闭环管控,提升覆冰治理的自动化水平。

#### 4.2 管理优化建议

强化管理体系建设是提升覆冰防控能力的关键。建立健全覆冰灾害应急预案,明确各部门职责,定期开展应急演练,提升灾害应对能力;构建统一的覆冰监测与

融冰管理平台,整合各区域监测数据,实现资源共享与协同调度;加强线路运维人员培训,提升其对监测设备、融冰装置的操作能力与故障处置能力;建立覆冰灾害数据库,总结治理经验,为技术优化与线路设计提供支撑。此外,加强跨区域、跨部门协作,建立气象、电力等部门的联动机制,提前获取气象预警信息,为覆冰防控争取时间。

#### 4.3 未来趋势展望

未来,特高压输电线路覆冰防控将向“智能化、一体化、绿色化”方向发展。智能化方面,结合数字孪生技术构建线路虚拟模型,实现覆冰状态的可视化仿真与精准预测;开发全自主除冰机器人,实现覆冰监测与清除的全流程自动化。一体化方面,推动监测、预测、融冰、运维技术的深度融合,构建全链条覆冰防控体系;将覆冰防控技术与线路设计相结合,研发抗冰型输电线路设备,从源头提升线路抗冰能力。绿色化方面,大力推广低能耗融冰技术,开发太阳能、风能辅助融冰系统,降低融冰过程的能耗与碳排放;研发环保型材料与技术,实现覆冰治理与生态保护的协同发展。

#### 结束语

特高压输电线路覆冰监测与融冰技术是保障电网安全稳定运行的核心支撑,其应用效果直接关乎能源输送的可靠性。本文系统分析了覆冰形成机理与危害,梳理了各类监测与融冰技术的特点、应用场景及优劣,提出了技术与管理双重优化策略。未来,需持续推动技术创新与管理升级,强化监测与融冰技术的联动融合,向智能化、一体化、绿色化方向发展。相信随着技术的不断突破与应用不断深化,特高压输电线路覆冰防控水平将大幅提升,为能源互联网的安全稳定运行提供坚实保障。

#### 参考文献

- [1]金瑜,马三龙,冯靖凯.基于机器视觉技术的高压输电线路覆冰在线监测方法[J].无线互联科技,2023,20(15):97-99.
- [2]王拓,张霖,唐伟晔,王凯,张淑敏,李欣宇,唐德东.极端条件下高压输电线路覆冰识别检测技术[J].电子技术应用,2023,49(07):67-71.
- [3]王燕峰,杨田.输电线路覆冰机理及防治技术研究进展[J].电力系统保护与控制,2021,49(12):45-52.
- [4]刘涛,赵敏.基于传感器的输电线路覆冰监测技术综述[J].电工技术学报,2022,37(8):2105-2114.