

高压输电线路的覆冰防治技术研究

呼德尔 王普赞 陈龙飞

内蒙古电力集团薛家湾供电公司 内蒙古 鄂尔多斯 010300

摘要：高压输电线路是电力能量输送核心，其安全关乎能源供应。覆冰灾害是寒区及高海拔地区主要威胁，会引发导线舞动、杆塔坍塌等故障，致大面积停电。本文系统剖析高压输电线路覆冰的形成机理、增长规律与关键影响因素，梳理传统及新型智能监测技术应用特点，优化预警模型精准度。构建“主动-被动-协同”的防治技术体系，明确技术适用场景与要点。探讨人工智能、新型材料研发及与新能源消纳协同等方向，为提升线路覆冰防御能力提供理论与实践参考，助力电力系统安全韧性提升。

关键词：高压输电线路；覆冰机理；防治技术；融冰策略

引言：全球气候变暖使极端雨雪冰冻天气频发，高压输电线路覆冰灾害发生频率和破坏程度大幅上升。历史上重大覆冰事故不仅造成电力中断，还引发交通瘫痪、民生受阻等连锁问题，损失巨大。特高压电网建设推进，线路向高海拔、严寒地区延伸，覆冰防治挑战加剧。当前防治技术存在监测滞后、预测精度欠佳、协同性差等问题，难以应对复杂气象。深入研究覆冰机理与防治技术、构建高效防御体系，对保障电力安全运行、提升能源供应稳定性意义重大，是电力工程重点课题。

1 高压输电线路覆冰机理与影响因素分析

1.1 覆冰形成机理

高压输电线路覆冰是特定气象条件下的复杂物理过程，核心是过冷水滴与导线表面接触后的冻结累积。当大气中存在低于0℃的过冷水汽或过冷水滴时，这些超冷却粒子在气流作用下撞击到温度低于冰点的导线表面，迅速发生相变凝结成冰。初始阶段，导线表面形成薄冰层，随着温度持续降低与湿度升高，后续撞击的过冷水滴在原有冰层上不断冻结，使冰层逐渐增厚。根据形成过程差异，覆冰可分为雨淞、雾淞、混合淞等类型，其中混合淞因密度大、附着力强，对线路的破坏最为严重。这一过程涉及热力学平衡与流体力学作用，过冷水滴的动能、导线表面温度、碰撞效率共同决定了覆冰的初始形成与附着稳定性，当冰层附着力大于气流冲击力与重力时，便会持续累积形成灾害性覆冰。

1.2 覆冰增长模型

覆冰增长模型是量化覆冰发展过程、预测覆冰厚度的核心工具，目前主流模型基于热平衡与质量守恒原理构建。热平衡模型通过计算导线表面的热交换过程，包括过冷水滴冻结释放的潜热、导线与环境的对流换热、辐射换热等，明确覆冰增长的能量条件，当单位时间内

冻结潜热大于散热损失时，冰层呈加速增长趋势。质量守恒模型则聚焦过冷水滴的碰撞与捕获过程，通过计算单位时间内撞击导线的水滴质量与冻结质量，建立覆冰厚度随时间变化的数学关系^[1]。近年来，随着数值模拟技术发展，模型中引入了气流场分布、水滴粒径分布等参数，提升了复杂气象条件下的预测精度。部分模型还结合机器学习算法，通过历史覆冰数据训练优化参数，使增长曲线更贴合实际工程场景，为覆冰预警提供量化依据。

1.3 关键影响因素

高压输电线路覆冰的形成与发展受气象、地理、线路自身特性等多类因素综合影响。气象因素中，温度是基础条件，0℃至-10℃的环境温度最易形成厚冰层，此温度区间过冷水滴数量多且冻结速度适中；相对湿度需达到85%以上，为覆冰提供充足水汽来源；风速在2-10m/s时，既能保证过冷水滴与导线的有效碰撞，又不会因风速过大吹落未冻结水滴。地理因素方面，高海拔区域因温度低、湿度大，覆冰概率显著高于平原地区；山谷、迎风坡等地形易形成气流抬升，增加水汽凝结机会。线路特性上，导线材质影响表面导热性，铝钢芯导线比纯铜导线更易积冰；导线截面越大，单位长度捕获的水滴数量越多，覆冰速度越快；表面粗糙度高的导线因附着力强，冰层更易持续增长，这些因素共同决定了覆冰的严重程度与发展趋势。

2 高压输电线路的覆冰监测与预警技术研究

2.1 传统监测技术

传统覆冰监测技术以人工巡检与物理传感为核心，在电力系统发展中发挥了重要作用。人工巡检包括地面目测、登塔检查及无人机初步探查，工作人员通过观察导线覆冰光泽、厚度及线路形变，结合经验判断覆冰等级，该方法操作灵活，能直观发现线路异常，但受天气

条件限制大,在暴雪、浓雾天气下难以开展,且巡检效率低,无法实现大范围实时监测。物理传感技术通过在导线上安装传感器获取参数,应变式传感器利用覆冰引起的导线应力变化推算覆冰厚度;称重式传感器通过测量导线单位长度重量增量实现监测;倾角式传感器则依据导线覆冰后的垂度变化判断覆冰情况。这些技术数据稳定可靠,但存在安装维护复杂、易受导线振动干扰等问题,适用于重点区域的定点监测,难以满足大规模电网的全面监测需求。

2.2 新型智能监测技术

新型智能监测技术依托物联网、人工智能等技术发展,实现了覆冰监测的精准化与自动化。图像识别技术通过高清摄像头与红外热像仪捕获导线图像,利用图像处理算法提取覆冰区域特征,结合温度数据计算覆冰厚度与密度,该技术直观性强,可同时获取覆冰形态与线路状态信息。卫星遥感与雷达监测技术突破了地理限制,通过卫星搭载的微波传感器与地面雷达系统,实现大范围区域的覆冰分布监测,能快速识别覆冰隐患区域,为电网调度提供宏观数据支持。基于物联网的多源数据监测系统则整合了气象传感器、导线状态传感器等设备,通过无线网络将温度、湿度、导线应力等数据实时传输至后台,结合边缘计算技术实现数据就地处理与分析,提升监测响应速度,为后续预警与防治提供精准数据支撑^[2]。

2.3 预警模型优化

覆冰预警模型优化聚焦提升预测精度与时效性,通过融合多源数据与先进算法实现性能升级。传统预警模型多基于单一气象参数构建,如利用温度与湿度阈值判断覆冰风险,存在预测片面性问题。优化后的模型首先整合气象、地理、线路运行等多维度数据,建立综合特征指标体系,涵盖气温、湿度、风速、海拔、导线负荷等参数,全面反映覆冰影响因素。在算法层面,引入机器学习与深度学习技术,BP神经网络模型通过训练历史覆冰数据,建立特征参数与覆冰等级的映射关系;LSTM模型则凭借时序数据处理优势,精准预测覆冰厚度随时间的变化趋势;随机森林算法通过多决策树集成学习,降低单一因素波动对预测结果的影响。同时,模型加入实时数据更新机制,通过在线学习不断优化参数,提升对极端天气下覆冰灾害的预警能力,为防治工作争取充足时间。

3 高压输电线路的覆冰防治技术体系构建

3.1 主动防治技术

主动防治技术通过主动干预手段去除已形成冰层或

阻止冰层增厚,是覆冰灾害处置的核心技术。热力融冰技术应用最为广泛,直流融冰通过将线路转换为直流供电模式,利用导线电阻产生热量融化冰层,适用于不同类型线路,融冰效率高;交流融冰则通过短路方式产生焦耳热,设备成本低,适合短距离线路。机械除冰技术包括人工机械除冰与自动化除冰,人工除冰借助专用工具进行冰层清除,适用于小范围紧急处置;自动化除冰机器人通过搭载机械臂与破冰装置,沿导线自主移动完成除冰,安全性与效率显著提升。脉冲电流除冰技术是新型主动技术,利用高压脉冲电流产生的电磁力使冰层破裂脱落,具有能耗低、对线路损伤小的特点,适用于覆冰初期的干预处理,各类主动技术可根据覆冰情况灵活选择应用。

3.2 被动防治技术

被动防治技术以事前预防为核心,通过优化线路设计与材料选择减少覆冰形成与危害。线路结构优化包括采用分裂导线设计,增加导线表面电场均匀性,减少水滴附着;强化杆塔与金具强度,提升线路抗覆冰荷载能力;选用防冰绝缘子,增强绝缘子表面憎水性,降低冰闪风险。防冰涂层技术通过在导线表面涂覆低表面能材料,如聚四氟乙烯涂层,减少冰层与导线的附着力,使冰层易在风力作用下脱落,该技术施工简便,适用于现有线路改造。新型导线技术如自阻尼导线,能通过自身结构特性抑制导线舞动,减少覆冰引发的振动损伤;碳纤维复合导线具有强度高、重量轻的特点,可提升线路抗覆冰能力,被动防治技术通常在线路建设或改造阶段应用,形成长期防冰保障。

3.3 多技术协同防治策略

多技术协同防治策略基于不同技术的优势互补,构建“预防-监测-处置-恢复”的完整防御链条,提升覆冰防治的系统性与有效性。在预防阶段,结合被动防治技术,对高风险区域线路采用防冰涂层与强化结构设计,从源头减少覆冰隐患;同时部署智能监测系统,实现覆冰情况的实时跟踪。当监测到覆冰初期迹象时,启动主动干预措施,如采用脉冲电流技术阻止冰层增厚;若覆冰达到一定厚度,根据线路类型与环境条件,选择直流融冰或除冰机器人进行高效除冰。在处置过程中,预警系统实时反馈覆冰清除情况,动态调整防治方案^[3]。覆冰灾害过后,利用无人机巡检与人工检查相结合的方式评估线路损伤,采用针对性修复措施。通过建立技术协同调度平台,实现监测数据、预警信息与防治设备的联动,确保各类技术在不同覆冰阶段精准应用,提升整体防治效能。

4 未来发展趋势

4.1 人工智能在覆冰预测与决策中的深度应用

人工智能技术将在覆冰防治的预测与决策环节实现更深度的融合应用,推动防治工作向智能化升级。在预测层面,基于大数据的深度学习模型将整合更长时间序列的气象数据、线路运行数据及历史覆冰案例,通过特征挖掘与模式识别,实现对极端天气下覆冰灾害的精准预测,包括覆冰发生时间、厚度及发展速度,预测精度较现有模型提升30%以上。在决策支持方面,人工智能将构建智能决策系统,结合实时监测数据与预测结果,自动匹配最优防治方案,如针对轻度覆冰推荐脉冲电流除冰,针对重度覆冰启动直流融冰与机器人除冰协同模式。同时,通过数字孪生技术构建线路覆冰虚拟仿真模型,模拟不同防治措施的实施效果,为决策提供可视化支撑,实现覆冰防治从“经验驱动”向“数据驱动”的转变。

4.2 新型材料(如形状记忆合金、自发热导线)的研发

新型材料的研发与应用将为覆冰防治提供更高效、可靠的技术手段,突破传统技术瓶颈。形状记忆合金材料具有温度感应形变特性,将其应用于导线金具或除冰装置中,当温度降低至覆冰临界值时,合金发生预设形变,产生机械力使冰层破裂,无需额外能源驱动,实现被动除冰的智能化。自发热导线通过在导线内部嵌入导电发热层,可根据环境温度自动调节发热功率,在低温天气下持续维持导线表面温度高于冰点,从根本上阻止覆冰形成,该导线还具有能耗低、使用寿命长的特点,适合高海拔寒区线路应用^[4]。另外,新型憎水性纳米涂层材料将进一步提升表面抗附着性能,其耐磨损、抗老化能力较传统涂层显著增强,可适应复杂户外环境,延长防冰有效期,降低维护成本,为被动防治技术提供更强支撑。

4.3 覆冰治理与新能源消纳的协同优化

覆冰治理将与新能源消纳实现协同优化,构建“防

治-用能”一体化的新型模式,提升电力系统的综合效益。在融冰能源供应方面,高海拔覆冰区域往往伴有丰富的风电、光伏资源,可通过构建分布式能源系统,将新能源电力直接用于覆冰防治的融冰设备供电,减少对主电网电力的依赖,同时解决新能源就地消纳问题。例如,在风电基地周边的输电线路,利用风电余电驱动直流融冰装置,实现新能源电力的高效利用。在系统调度层面,通过智能调度平台协调覆冰防治与新能源发电的运行节奏,当预测到覆冰风险时,提前调整新能源出力,预留融冰所需电力;当覆冰防治结束后,优化新能源并网策略,提升能源利用效率。这种协同模式不仅降低覆冰治理的能源成本,还推动新能源消纳与电网安全保障的良性互动。

结束语

高压输电线路覆冰防治技术的发展是保障电网安全、适应能源结构转型的重要支撑。本文通过对覆冰机理、监测预警及防治技术的系统研究,明确了“监测精准化、防治协同化、决策智能化”的发展方向。未来,通过人工智能与新型材料的深度应用,以及覆冰治理与新能源消纳的协同发展,将构建更高效、经济、可靠的覆冰防治体系。这一体系的完善不仅能提升电网抵御覆冰灾害的能力,还将推动电力系统向绿色、智能方向发展,为能源安全与可持续发展提供坚实保障。

参考文献

- [1] 李晓康,李文彬.特高压输电线路覆冰舞动防治技术研究[J].电气技术与经济,2025(6):86-89.
- [2] 赵斌,常志兴,邵永斌,等.毫米波雷达与视觉融合的高压输电线路覆冰厚度动态测量方法[J].国外电子测量技术,2025,44(6):36-42.
- [3] 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.
- [4] 张源,雷明振,蔡鸿吉.某地区覆冰对高压输电线路的影响[J].自动化应用,2023,64(18):140-142.