

复杂山区输电线路覆冰灾害风险评估与差异化治理策略

魏强国 道杰 陈颂颂 崔家瑞 冉涛
国网新疆电力有限公司巴州供电公司, 新疆 库尔勒 841000

[摘要]伴随电网朝着复杂山区不断延展, 输电线路覆冰灾害已然成为危及电网平稳安全运行的主要自然风险之一。文章着眼于复杂山区独特的地理与气候条件, 全面论述了实施覆冰灾害风险评估以及拟定差异化治理策略的重大价值, 文章创立了包括环境致灾因子、线路承灾体脆弱性以及区域抗灾能力的风险评估体系, 且给出具有针对性的差异化管控策略, 意在实现由被动应对灾害到主动防御灾害的转变, 为增强复杂山区电网的防灾减灾能力提供理论支撑与实践借鉴。

[关键词]复杂山区; 输电线路; 覆冰灾害; 风险评估; 差异化治理; 防灾减灾

DOI: 10.33142/hst.v8i11.18303 中图分类号: TM726.3 文献标识码: A

Risk Assessment and Differentiated Governance Strategies for Icing Disasters on Transmission Lines in Complex Mountainous Areas

WEI Guoqiang, DAO Jie, CHEN Songsong, CUI Jiarui, RAN Tao

Bazhou Power Supply Company of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Korla, Xinjiang, 841000, China

Abstract: With the continuous extension of the power grid towards complex mountainous areas, icing disasters on transmission lines have become one of the main natural risks that endanger the stable and safe operation of the power grid. The article focuses on the unique geographical and climatic conditions of complex mountainous areas, comprehensively discussing the significant value of implementing risk assessment for icing disasters and formulating differentiated governance strategies. The article establishes a risk assessment system that includes environmental disaster factors, vulnerability of line disaster bearing bodies, and regional disaster resistance capabilities, and provides targeted differentiated control strategies, aiming to achieve the transformation from passive disaster response to active disaster defense, and provide theoretical support and practical reference for enhancing the disaster prevention and reduction capabilities of complex mountainous power grids.

Keywords: complex mountainous areas; transmission line; ice cover disaster; risk assessment; differentiated governance; disaster prevention and mitigation

引言

我国广袤的复杂山区, 地势落差大, 呈现出明显的微气候特征, 是水电、风电等清洁电能的富集区域, 也是“西电东送”等重大输电通道的必经地段。这些区域在冬季期间频繁遭遇低温、高湿、强风之类的天气状况, 很容易让输电线路出现严重的雨凇、雾凇等覆冰情况。导线和杆塔覆冰不但会极大提升机械负荷, 造成导线断开、杆塔倒塌事故, 而且可能由于覆冰不均匀或脱冰跳跃致使线路出现闪络、跳闸现象, 对电网安全形成严峻威胁, 传统“一刀切”的防冰抗冰手段用于复杂山区常成本颇高且成效欠佳。因此, 推行科学的风险评定并据此制定差异化的治理办法, 对于达成防灾资源的最优配置、保障电网安全高效运行具有迫切的现实意义。

1 开展复杂山区输电线路覆冰灾害风险研究的现实意义

1.1 保障电网安全稳定运行的迫切需求

覆冰灾害是造成复杂山区电网大范围停运、引发重大社会经济损失的主要自然灾害之一。借助精准的风险评判, 能够提前辨识高风险地段与薄弱环节, 为运维抢修力量安排、应急资源调配给予决策支撑, 进而大幅增强电网抵御极端冰灾的能力, 最大程度缩减停电范围和时长^[1]。

1.2 优化防灾资源精细化配置的内在要求

复杂山区的输电线路距离长、途经环境多样, 整条线路运用最高设防标准既不划算也不合理。以风险评估为基础的差异化治理模式, 可按照不同区段的风险级别, 科学设定设防标准、技术手段与监测频次, 将有限的资金及资

源优先投入到高风险关键地段，达成防灾效益的最大化。

1.3 支撑电网规划设计与智能运维的重要基础

风险评估所呈现的覆冰灾害空间分布态势与关键致灾要素，能够直接引导新建线路的路径优选、塔型抉择和绝缘设定。风险动态评估所得结果还可整合进生产管理系统，为开展状态检测、施行智能巡视和发布灾害警报提供核心数据保障，带动运维模式向数字化、智能化迈进。

2 复杂山区输电线路覆冰灾害风险评估体系构建

2.1 风险致灾因子识别与评估

该部分着重于覆冰环境驱动力的定量解析，目的是精确判别诱发线路覆冰的外在条件。评估体系围绕气象因子展开，包含气温、湿度、降水形式、风速风向及其持续时段；同时整合地形因子，像海拔、坡度坡向、地形遮蔽度对局部微气象的调节作用。借助整合地面气象观测、中尺度数值模拟以及地理信息系统空间分析技术的方式，可绘制出区域覆冰厚度的精确化分布图。同时算出不同重现期下的极端覆冰荷载，最终按照覆冰概率与强度，界定环境致灾的危险等级，为后续风险评估提供客观、量化的环境基础场^[2]。

2.2 承灾体脆弱性分析与建模

脆弱性分析目的在于测度输电线路自身在覆冰荷载影响下的易受损程度，评估应全面考量线路设计参数，涵盖导线规格、架线拉力、档距尺寸、杆塔结构样式与设计承载力；同时纳入运行期限、材料老化程度、缺陷情形等健康指标，以及绝缘子串设置与抗冰闪能力。通过构建导线-杆塔体系的力学仿真模型，可探究不同覆冰厚度与风载协同作用下关键部件的应力反馈与形变规则。整合过往冰害故障实例与测试数据，最终搭建线路整体及杆塔、导线、绝缘子等部件的脆弱性曲线，定量表征覆冰荷载与损伤概率之间的对应关联。

2.3 区域风险综合评估与区划

依托单点危险性评估及脆弱性分析的结果，本阶段实施区域综合风险量化与空间界定。评估应整合致灾因子危险性、承灾体脆弱性这两个关键要素，且要进一步考量区域抗灾复原能力，像覆冰监测与预警的水准、应急抢修道路的可通行性（受交通网络、地形阻碍的影响）、电网备用通道及其转供的能力等。运用风险矩阵、概率-损失评估模型等手段，对风险开展综合量化运算，最终按照风险值高低。把评估区域划分成高风险、中风险、低风险等不同等级，并制作电子和纸质版的风险分区图，达成风险的空间可视化呈现与分级管理，为电网规划、运维加固及应急资源配置提供直接决策凭据。

3 基于风险评估的差异化治理策略

3.1 差异化设防标准与工程改造策略

依托精细化风险评估成果，对输电线路沿线不同地段采取差异化、等级化的防范策略，是增进电网抵御冰灾能力、改善工程投资效益的关键。对于经评估划定的高风险区域，一般指海拔偏高、位于迎风坡面、风道峡谷或者容易出现湿雪覆冰现象的特殊气象地理区域，一定要开展系统性的强化防护。这最先反映在设计标准的提升上，应采用远高于区域常规数值的设计冰厚与风速标准作为计算依据，按照该标准，结构设计应全面强化：杆塔采用承载能力更高、抵抗变形能力更强的塔型与结构材料；导线宜优先选取高强度钢芯铝合金线、软铝型线或者具备出色自阻尼特性的复合芯导线，以此增强抗拉与抗疲劳能力；金具应配套选用加强型的悬垂线夹、耐张线夹以及防振锤，以保障整个支撑与悬挂系统在极端覆冰荷载状况下维持可靠^[3]。

对于被划定为中风险等级的线路路段，其防御策略聚焦于在既有设计框架当中进行有的放矢的优化和强化，而非整体的标准提升。特定措施要依照此区段特定的风险源头（如中等覆冰、易发舞动等）进行定制，为应对覆冰风险，可合理收紧导线的设计垂度，以降低覆冰后弧垂过度增长造成的对地或交叉跨越距离不足问题；对于中冰区容易出现的导线舞动情况，可于档距间科学增设相间间隔棒，切实遏制不同相导线之间的非协同摆动，防止由此产生的闪络或鞭击损伤；还可斟酌在关键杆塔增添防倒装置或者进行局部加固，以兼顾安全性与经济性。

对于大量的低风险地带，一般采用符合该地区普遍气象情况的常规标准来设计，这并不表明能够彻底忽略局部风险，工作的关键应当聚焦于辨识和处置那些处于低风险走廊内的“特殊微地形、微气象点”。这些点位或许为一座孤立的山峰、一处狭长的隘口或者一片濒水区域，其局部覆冰情形可能显著有别于周边。需凭借细致的现场调研与微地貌分析，辨认出这些点位，进而采取“一点一策”的局部加固手段，比如在特定塔位采用略高规格的塔型、在特定档距间加装防舞动装置等。利用这种“普遍常规、局部加强”的途径，在管控整体成本的同时，有力填补因微地形气候造成的防御漏洞，达成风险防控资源的最佳配置。

3.2 差异化监测预警与运维策略

为有力应对冰灾对电网形成的威胁，应当按照线路不同区段的风险等级，创建差异化的运维监测体系与资源配置策略。在高风险覆冰地带，仅仅依赖人工按期巡检已无

法应对急剧变化的冰情，需布置高密度、多参数的在线监测体系，达成对覆冰进程的实时、全方位感知。这一网络一般整合多种监测设备：高清视频与图像监测器具直接观测导线、地线以及绝缘子覆冰呈现的形态；微气象站不断收集现场的湿度、温度、风速、风向以及降水量，为覆冰气象条件分析提供数据支持；装设在导线或杆塔之处的倾角传感器跟张力传感器，能够以间接却连续的方式测算导线覆冰的等效厚度以及荷载变化。借助对这些多源数据开展融合解析和智能搭建模型，系统可达成覆冰厚度的即时计算、增长态势的精确预判，并且在临近设计允许值时自动发出分级预警，该类区段的人工及无人机的巡检周期同样要明显缩短，构建“在线实时监控+高频次现场复核”的立体防护体系^[4]。

针对中风险地段而言，其运行维护监测方式可采用成本与收益更为平衡的“在线监测+定期巡检”组合办法。在线监测点的布置不必像高风险区那样密集，而是选取在代表性杆塔或典型气象点安置关键监测设备，以把控该区域的整体覆冰态势。基于这一情况，认真施行计划性的按期人工巡检，同时主动引入无人机作为关键补充，无人机巡查拥有高效、灵动、视野广泛的长处，特别适宜对地势复杂、人力难以抵达的区域开展冰情普查与细部拍摄，切实填补固定监测点或许存在的空白区域，提高中风险地段冰情把握的全面性与及时性。

在低风险地带，运维的关键之处是以周期性的规划巡查和通道环境治理为主。借助周期性的人工巡查或者无人机巡查，核查线路通道里是否存在树竹障碍物、新建建筑设施等安全隐患，同时查看线路有无明显的覆冰情况，有限的运维资源（包含物资、装备及人力）应当向高风险区段开展战略性侧重。这确切体现为：观冰哨所的部署、移动式抑或固定式直流融冰装置的布点设计，应优先覆盖高风险通道；抢修团队、应急物资储备点的选址工作，还需全面考量到达高风险区段的交通便捷性与响应时长，保证在冰灾出现时能够迅速集合、优先处理。这种依据风险分级实施的差异化运维资源分配，意在把最强劲的监测预警效能、最敏捷的应急处理力量，精确投放至风险最大、最容易出现故障的部分，进而以最佳的成本效益比率，最大限度提高电网整体的抗冰防灾韧性。

3.3 差异化应急准备与协同策略

依据输电线路覆冰风险的等级界定，拟定并执行与之契合、具有高度实操性的专项应急方案，是保障冰灾应急响应高效有序的关键。针对高风险区域，预案的拟定需立足于应对最恶劣的冰灾情形，其细则应详尽且拥有多重保

障，技术应对方案要预先规划多种融冰及除冰方式，比如配置固定式或者移动式直流融冰设备来达成线路带电融冰，筹划直升机或无人机喷火去除冰块、除冰机器人开展作业等多种技术方式。要在高风险地段沿线抑或是相邻交通便利之处，提前设置专门的应急物资储备库，充分储备导线、金具、绝缘子、塔材等抢修物资，以及食品、御寒、照明等后勤保障物品。更具决定性的是，要针对高风险区段预案进行高频率、契合实战的演练，借助模拟极端冰情下的指挥抉择、融冰作业、物资调配与现场抢险，不断校验并改进预案流程，保证应急队伍熟练掌握关键技能^[5]。

应急预案的有效性不光依靠内部准备工作，更取决于跨部门、跨区域的协同运作能力。需构建完善与气象、交通运输、电力调度以及线路沿线地方政府的常态化应急协同机制，针对高风险地段，这一机制极为关键。应与气象部门搭建专线沟通，获取精准到线路走廊的短时间临近冰情预警；和交通管理部门预先谋划好前往高风险地段的应急通道，保证在道路因冰雪封闭等极端情形下，抢修作业人员、大型装备及物资仍可通过除冰、护送等办法抵达事发现场；与地方政府应清晰界定灾时信息传达、民众撤离、后勤保障等方面职责与衔接。这套联动机制的主要目标为，全方位确保高风险区域在灾害降临时，能够做到内外信息的绝对畅达，并保证应急力量与物资的迅速、稳妥投送。

针对中风险与低风险地段，应急预案的重点会存在差异，主要依托区域联合防控与快速援助行动。中低风险区域自身的应急预案能够相对精简，然而要融入区域电网的整体应急网络之内，其关键在于构建高效的监控信息报送流程，以及当本区段出现超出自身应对能力的险情状况时，能够快速向领导或周边应急力量申请援助的机制。这些区段的应急物资（如小型的可移动融冰车、应急抢修队伍）也应归入区域统一调度体系，以便在需要时能够迅速支援风险更高或已出现故障的区段。借助这种“重点重保、区域联防、梯次支援”的预案体系规划，能够构建点面交融、优势互济的应急防御态势，全方位地增强整个输电网络抵御冰灾的整体韧性与恢复能力。

4 结语

复杂山区输电线路覆冰灾害的防治工作属于一项系统工程。依据评估成果拟定的差异化治理举措，覆盖了从源头把控、过程监控到应急处理的全流程，彰显了精准防控与资源优化的核心要义。在未来，伴随气象预测、传感器、大数据与人工智能技术的持续进步，覆冰灾害风险评测将更趋精准化、动态化，差异化治理举措也会持续迭代完善，进而为打造稳固可靠的山区电网给予持久保障。

[参考文献]

- [1]周晋.基于无人机低空摄影的输电线路覆冰监测预警方法[J].智能建筑与智慧城市,2025(11):37-39.
 - [2]许志成.输电线路覆冰监测与智能融冰技术的应用[J].光源与照明,2025(10):218-220.
 - [3]岳雷.基于电容效应的架空输电线路覆冰检测电路[J].仪表技术与传感器,2025(10):103-107.
 - [4]许涵.人工智能在输电架空线路覆冰监测与预测中的应用[J].建设科技,2025(1):91-93.
 - [5]曹铁岩,蒋鹏.电力输电线路的覆冰预测与防冰技术研究[J].中国设备工程,2025(16):239-241.
- 作者简介: 魏强国 (1995.12—), 毕业院校: 新疆工程学院, 所学专业: 机械设计制造及其自动化, 当前就职单位

名称: 国网新疆电力有限公司巴州供电公司, 就职单位职务: 班员, 职称级别: 助理工程师; 道杰 (1973.8—), 毕业院校: 国家开放大学, 所学专业: 机电一体化, 当前就职单位名称: 国网新疆电力有限公司巴州供电公司, 就职单位职务: 班员; 陈颂颂 (1998.11—), 毕业院校: 塔里木大学, 所学专业: 电气工程, 当前就职单位名称: 国网新疆电力有限公司巴州供电公司, 就职单位职务: 班员; 崔家瑞 (1998.4—), 毕业院校: 塔里木大学, 所学专业: 电力自动化技术, 当前就职单位名称: 国网新疆电力有限公司巴州供电公司, 就职单位职务: 班员; 冉涛 (1989.8—), 毕业院校: 江西经济管理专修学院, 所学专业: 金融管理, 当前就职单位名称: 国网新疆电力有限公司巴州供电公司, 就职单位职务: 安全员。