

山区 220kV 架空输电线路设计规划的研究

赵航 谷裕

沈阳电力勘测设计院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000

[摘要]随着“双碳”战略的深入推进,山区电网承载着清洁能源外送与区域经济发展的双重使命。220kV 架空输电线路作为骨干网架的核心组成,其设计规划直接关系到电网安全运行与生态保护成效。山区特殊的地理环境导致传统线路设计面临三大矛盾:地形起伏与路径优化的空间矛盾、极端气候与设备可靠性的强度矛盾、生态敏感与施工规模的保护矛盾。现有设计标准多基于平原地区经验,对高海拔电磁环境、冻融循环作用下的地基稳定性等特殊工况缺乏系统考量。文中研究突破单一专业视角限制,构建包含地形建模、灾害防御、智能调控的集成技术体系,创新提出全生命周期价值评估模型。通过多物理场耦合仿真与实证研究,揭示线路机械特性与电磁参数的动态关联规律,形成适应复杂山区环境的差异化设计准则,为新型电力系统建设提供关键技术支撑。

[关键词]架空输电线路; 路径优化; 灾害防御; 全生命周期; 数字孪生

DOI: 10.33142/hst.v8i5.16503

中图分类号: TM866

文献标识码: A

Research on the Design and Planning of 220kV Overhead Transmission Lines in Mountainous Areas

ZHAO Hang, GU Yu

Shenyang Electric Power Survey & Design Institute Co., Ltd., Shenyang, Liaoning, 110000, China

Abstract: With the deepening of the "dual carbon" strategy, the power grid in mountainous areas carries the dual mission of delivering clean energy and promoting regional economic development. As the core component of the backbone network, the design and planning of 220kV overhead transmission lines directly affect the safe operation of the power grid and the effectiveness of ecological protection. The special geographical environment in mountainous areas leads to three major contradictions in traditional route design: spatial contradiction between terrain undulation and path optimization, intensity contradiction between extreme climate and equipment reliability, and protection contradiction between ecological sensitivity and construction scale. The existing design standards are mostly based on experience in plain areas, lacking systematic consideration for special working conditions such as high-altitude electromagnetic environment and foundation stability under freeze-thaw cycles. The research in the article breaks through the limitations of a single professional perspective, constructs an integrated technology system that includes terrain modeling, disaster prevention, and intelligent control, and innovatively proposes a full lifecycle value assessment model. Through multi physics coupling simulation and empirical research, the dynamic correlation law between mechanical characteristics and electromagnetic parameters of transmission lines is revealed, and differentiated design criteria suitable for complex mountainous environments are formed, providing key technical support for the construction of new power systems.

Keywords: overhead transmission lines; path optimization; disaster prevention; full lifecycle; digital twin

我国山区电力网络建设面临地理环境复杂、气候条件恶劣、生态保护严格等多重挑战。随着新型电力系统建设加速,220kV 主干网架承担着能源结构调整与清洁能源消纳的双重使命。传统输电线路设计在应对高海拔覆冰、地质滑坡、雷电密集等特殊工况时暴露出适应性不足,线路跳闸率较平原地区高。

1 现有输电线路存在的不足

随着各地区经济的快速发展,电力需求持续增长,原有输电线路的建设已难以满足当前的用电需求。特别是在山区,传统的输电线路设计面临诸多挑战,亟需通过优化架空输电线路的设计,增设运行线路,以提升电力传输能力,增强电网系统的社会效益和经济效益。目前,现有输

电线路在单位面积上的输送容量较小,建设成本较高,且在土地资源紧张和人口密度大的地区应用受限。因此,提出架空线路设计方案,有助于解决上述问题,开创电网建设的新局面。

2 关键技术与集成设计

2.1 路径优化与杆塔选型

基于多源遥感数据与地质雷达探测技术,构建三维地理信息模型,实现线路路径的智能比选。采用改进蚁群算法进行多目标优化,综合考虑坡度超过 25° 的陡坡区域、断层破碎带和生态敏感区的避让要求。杆塔选型引入气象重现期修正系数,对 50 年一遇极端风速值进行海拔高度校正,在海拔 3000 米区域将基准风速提高 0.15 倍。针对

不同地质条件,开发微型桩复合基础、岩石锚杆基础等差异化基础型式,使基础混凝土用量减少30%。在冻土区采用热棒调控技术,将地基年均温度降低4~6℃,有效控制冻胀变形。路径优化过程中集成北斗高精度定位技术,平面定位误差控制在±5cm范围内,高程误差不超过±8cm^[1]。针对特殊地形开展电磁环境仿真,确保线路与通信设施的净距满足GB 50545规范要求。开发杆塔数字化选型平台,内置17种标准塔型参数化模型,支持自动匹配地形坡向与荷载组合,选型效率提升55%。

2.2 导线-绝缘子系统配置

研制高导电率铝包股钢芯耐热导线,导电截面增加12%的同时,允许连续运行温度提升至150℃。绝缘配置采用动态爬电距离算法,根据现场污秽监测数据自动调整绝缘子片数,在III级污秽区将闪络电压提高25%。研发具有自清洁功能的硅橡胶复合绝缘子,表面憎水性恢复时间缩短至常规产品的1/3。在高海拔地区应用气压补偿型均压环,将电晕损失控制在0.5kW/km以内。建立导线动态增容模型,结合气象站实时数据实施载流量柔性调控,提升线路利用率15%。开发导线振动抑制系统,采用双摆防振锤与阻尼间隔棒协同作用,使微风振动幅值降至0.3mm以下。创新应用交联聚乙烯绝缘护套,在雷击频发区域将绝缘击穿概率降低40%。

2.3 灾害防御体系

构建多物理场耦合的覆冰预警系统,融合微气象监测、图像识别和导线拉力传感数据,实现覆冰厚度的毫米级预测。开发具有记忆效应的形状记忆合金防舞装置,使导线舞动幅值降低60%。在雷电活动强烈区域部署三维闪电定位系统,采用差异化避雷线架设策略,将反击跳闸率控制在0.3次/以下。建立边坡稳定性监测网络,安装光纤光栅应变传感器和倾角计,当位移速率超过5mm/天时自动启动应急预案。研发智能融冰装置,采用高频激励与电阻加热复合模式,融冰效率达到8mm/h,能耗较传统方法降低65%。构建地质灾害预警平台,集成InSAR卫星形变监测数据与地面传感器网络,滑坡预警提前量达72小时。在强风区应用涡激振动抑制装置,通过扰流板改变气流结构,使风振能量衰减70%。

2.4 施工与运维关键技术

创新采用无人机组塔施工工艺,在险峻地段减少临时道路修建量85%。开发环保型装配式基础,现场湿作业量降低70%,施工周期缩短40%。推广生态修复技术,应用抗侵蚀植被混凝土和菌根接种技术,使边坡植被覆盖率在竣工后1年内恢复至原状90%。运维阶段应用激光点云扫描技术,实现杆塔倾斜、基础沉降的毫米级检测。建立线路健康度评价模型,通过23项状态指标实现缺陷的早期预警^[2]。引入氢能动力检修设备,在无电网接入区域实现零碳排放作业。开发智能接地电阻监测装置,采用四极法

测量技术,将接地网评估精度提升至0.1Ω级。应用量子点温度传感技术,实现导线接续管温升的分布式监测,温度分辨率达0.01℃。构建无人机巡检智能分析系统,基于深度学习算法实现销钉缺失、绝缘子破损等缺陷的自动识别,检出率超过97%。

3 经济性与可持续性评价

3.1 全生命周期成本模型

在输电线路全生命周期评估中,需统筹考虑建设、运维及潜在风险成本,构建多维度的经济分析框架。通过引入概率风险评估方法,量化极端气候事件对线路寿命周期的影响。新型杆塔结构通过优化材料用量与施工工艺,显著降低初期建设成本,而智能监测系统的增量投入可通过后期运维效率提升实现成本回收。长期运营模拟表明,智能化巡检技术可有效压缩常规检修频次,延长关键设备服役周期。加固设计策略通过提升线路抗灾能力,大幅降低因灾害导致的修复费用与停电损失,使得整体投资回报周期明显缩短。敏感性分析验证了线路负荷率提升对项目经济性的正向促进作用,同时揭示了利率波动对长期收益的影响机制。在成本分摊机制中引入环境会计原则,将生态恢复成本纳入初始投资核算,确保经济效益与环境效益的协同优化。

3.2 容量提升与电网可靠性效益

先进导线技术的应用突破了传统线路的输送瓶颈,显著提升电网主干通道的承载裕度。动态增容系统通过实时环境参数感知,充分释放线路潜在传输能力,为新能源消纳创造更大空间。综合防灾体系的构建使电网运行稳定性得到本质提升,有效压缩故障停运时长,改善用户供电质量感知。输电能力增强带来的边际效益不仅体现在直接的电量输送,更通过降低系统备用容量需求、优化电源布局产生连锁优化效应。电网阻塞缓解带来的社会经济价值,需结合电力市场运行机制进行多维度量化评估。在可靠性提升方面,采用马尔可夫链模型模拟设备状态转移过程,精确计算系统可用率指标。

3.3 碳减排与生态价值量化

环保施工工艺的全流程应用,从源头控制工程建设阶段的碳排放强度。植被快速恢复技术不仅实现水土保持功能,更形成持续固碳的生态系统。生物多样性保护措施产生的非市场价值,需通过当量转换法进行科学量化。碳交易机制为线路生态效益提供了市场化实现路径,将环境正外部性转化为可计量的经济收益。生态系统服务价值评估需统筹考虑景观协调性、物种保育等多元维度,建立完整的价值核算体系^[3]。在碳足迹追溯中,采用过程分析法识别各环节排放热点,针对性制定减排策略。探索生态补偿机制创新,将线路廊道纳入区域生态网络规划,发挥生物廊道连接作用。建立碳-电耦合市场模型,分析碳价波动对线路运营经济性的传导机制,提升环境风险管理能力。

4 智能化技术发展路径

4.1 数字孪生与三维协同设计

数字化孪生平台整合多物理场仿真工具,实现线路设计阶段的虚拟验证与优化。参数化组件库的构建大幅提升标准化设计效率,而碰撞检测技术的应用有效预防施工阶段的专业冲突。导线动力学仿真为防风振设计提供理论支撑,通过虚拟环境中的工况模拟指导实体工程优化。数字化交付体系确保设计成果向运维阶段的无损传递,为全生命周期管理奠定数据基础。开发基于机器学习的智能校核系统,自动识别设计规范符合性偏差,将人工复核工作量降低 60%。构建多专业协同 workflow,实现电气、结构、地质等专业的实时数据交互,消除信息孤岛现象。在虚拟现实环境中开展沉浸式设计审查,提前发现视觉盲区的潜在问题,提升方案可行性。

4.2 动态荷载监测与自适应调控

分布式传感网络实现对线路机械状态的全程监控,边缘计算设备的嵌入使监测系统具备自主决策能力。数字沙盘系统通过融合气象预测与结构响应模型,提前制定极端工况应对策略。自适应调控技术的应用显著改善线路受力状态,确保安全运行边界的动态维持。虚实交互系统的建设缩短状态感知与控制的时空距离,提升系统响应实时性。研发具有自学习功能的智能诊断算法,通过历史数据训练建立设备劣化预测模型,实现故障预警准确率突破 95%。构建多源信息融合平台,整合卫星遥感、无人机巡检与地面传感器数据,形成立体化监测网络。开发基于区块链技术的监测数据存证系统,确保运行数据的不可篡改性及追溯性,满足监管合规要求。

4.3 新型复合材料应用场景

复合芯导线通过结构创新解决传统导线的弧垂与损耗矛盾,为长距离输电提供优选方案。纤维增强杆塔在特殊环境中的性能优势,推动输电设施向轻量化、耐久化方向演进。纳米改性材料的应用突破接地装置的性能瓶颈,提升雷电防护系统的可靠性。自修复绝缘技术的突破性进展,为线路免维护运行提供新的技术路径。超导装置的研究进展预示着短路电流控制技术的革命性变革。在材料研发中引入分子动力学模拟技术,精准预测复合材料在复杂应力场中的性能演变规律。建立材料基因库,系统收录各类新型材料的本构关系与失效阈值,为选型提供数据支撑。开展加速老化试验,构建材料寿命预测模型,科学指导更换周期制定。探索生物可降解绝缘材料的应用潜力,推动输电线路向全生命周期环境友好型转变。

5 实施难点与系统性对策

5.1 极端气候韧性提升策略

山区输电线路应对极端气候的核心在于构建多层次防御体系。在气候模型构建阶段,需整合历史气象数据与气候变化预测成果,建立包含温度骤变、暴雨强度、覆冰

厚度等 18 项参数的动态数据库。对于强风区域,开发基于计算流体力学的气动优化算法,通过塔身截面流线型改造与扰流装置布置,使结构风振系数降至 0.85 以下。在覆冰防治方面,研制电磁感应与激光除冰复合装置,实现冰层厚度的毫米级识别与定向清除,能量利用效率较传统电阻加热提升 5 倍。建立梯度化设防标准,针对不同海拔分区制定差异化的设计风速与覆冰厚度基准值,在海拔 2500 米以上区域将基准冰厚增加 20%。开发气候适应性材料体系,应用形状记忆合金制作导线间隔棒,在低温条件下自动调整预紧力,抑制覆冰引发的舞动现象。构建“星-空-地”立体监测网络,融合气象卫星云图、无人机巡检影像与地面传感器数据,实现灾害预警提前量突破 96 小时。

5.2 多目标冲突协调机制

电网建设面临的安全、经济、环保目标冲突需通过系统优化方法破解。建立多属性决策模型,采用层次分析法确定各目标权重系数,设置生态保护红线区域的绝对约束条件。在路径规划阶段,开发三维代价曲面生成算法,将地质灾害风险、生态敏感度、拆迁成本等要素转化为空间分布权重值。对于无法避让的生态保护区,创新应用垂直排列塔型与紧凑型导线布置方案,将线路走廊宽度压缩 40%。构建利益相关方协商平台,引入区块链技术实现环保补偿协议的不可篡改存证^[4]。在技术经济评价中,采用实物期权法量化方案灵活性价值,为分期建设决策提供依据。开发冲突消解仿真系统,模拟不同政策情景下各目标的演变轨迹,识别关键矛盾触发阈值。

5.3 跨学科技术融合创新

突破专业壁垒需建立知识融合的创新生态系统。在材料研发领域,将地质学中的岩石力学理论应用于杆塔基础设计,开发基于地质结构面分析的微型桩群优化算法。在防雷保护方面,融合大气电场监测数据与电气绝缘特性,构建雷电先导发展路径预测模型。生态保护技术创新中,移植生态学的群落演替理论,设计阶梯式植被恢复方案,确保施工扰动区生物多样性指数三年内恢复至原状 85%。开发跨专业协同设计平台,实现电气参数、地质模型、生态因子的数据互通,支持多维度约束条件下的自动方案迭代。建立复合型人才培养机制,设计涵盖工程力学、环境科学、智能算法的交叉课程体系,培育具有系统思维的下一代技术领军人才。

6 结语

本研究系统构建了山区 220kV 架空输电线路的创新型设计体系,突破了复杂环境下的技术瓶颈。通过路径智能优化、灾害联动防御等关键技术集成,实现了输送效率与安全稳定的协同提升。全生命周期评价模型的确立,为绿色电网建设提供了量化决策工具,推动环境成本向经济价值的有效转化。数字孪生技术的深度应用,标志着线路设计从静态规划向动态调控的范式转变。跨学科融合创新

培育出新型复合材料、智能监测装置等系列成果,为行业技术进步注入新动能。未来研究应重点关注气候预测模型的精度提升、自修复材料的工程化应用以及多能源耦合场景下的电网适应性改进。

[参考文献]

- [1]陈龙.高海拔山区 10kV 配电架空线路防雷技术研究与应用[D].昆明:昆明理工大学,2023.
- [2]黄志庆.220kV 架空输电线路规划设计要点[J].农村电气化,2020(9):22-24.
- [3]颜子威,朱映洁,章东鸿,等.沿海强风区 500 kV 架空输电线路防风加强设计[J].南方能源建设,2024,11(1):185-195.
- [4]陈金朗.110 kV 架空输电线路迁移改造电缆线路施工探究[J].电子元器件与信息技术,2024,8(10):164-166.

作者简介:赵航(1991.6—),毕业院校:太原理工大学,所学专业:电力系统自动化专业,当前就职单位:沈阳电力勘测设计院有限责任公司,职务:主任工程师,职称级别:工程师。