

高压输电线路电气设计问题及改进对策

赵航 王宗实

沈阳电力勘测设计院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110000

[摘要] 高压输电线路电气设计的范式革新是支撑新型电力系统构建的核心技术命题。文中聚焦路径规划的空间失配、杆塔选型的力学失稳及防雷抗冰的防护失效等系统性缺陷, 揭示技术瓶颈的物理机理与制度成因, 提出基于多源数据融合与智能决策联动的全要素优化框架。通过构建地理信息深度解析模型、结构可靠性数字孪生平台及多灾害耦合防护体系, 实现线路规划从经验驱动向算法治理、杆塔设计从静态安全向动态韧性、灾害防御从被动响应向主动免疫的三重跨越。研究证实, 全生命周期价值流与气候适应性设计准则的深度耦合, 能够突破传统设计模式的认知边界, 为构建高可靠、强韧性的输电网络提供自组织演化路径, 推动电力基础设施向智慧化、可持续化方向迭代升级。

[关键词] 高压输电线路; 电气设计; 路径优化

DOI: 10.33142/aem.v7i4.16360

中图分类号: TM5

文献标识码: A

Electrical Design Problems and Improvement Strategies for High Voltage Transmission Lines

ZHAO Hang, WANG Zongshi

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

Abstract: The paradigm innovation of electrical design for high-voltage transmission lines is a core technological proposition supporting the construction of new power systems. The article focuses on systematic defects such as spatial mismatch in path planning, mechanical instability in tower selection, and failure of lightning and ice protection. It reveals the physical mechanisms and institutional causes of technical bottlenecks and proposes a comprehensive optimization framework based on multi-source data fusion and intelligent decision-making linkage. By constructing a deep analysis model of geographic information, a digital twin platform for structural reliability, and a multi disaster coupling protection system, the triple leap of line planning from experience driven to algorithm governance, tower design from static safety to dynamic resilience, and disaster prevention from passive response to active immunity can be achieved. Research has confirmed that the deep coupling of the full lifecycle value stream and climate adaptive design criteria can break through the cognitive boundaries of traditional design patterns, provide a self-organizing evolutionary path for building highly reliable and resilient transmission networks, and promote the iterative upgrading of power infrastructure towards intelligence and sustainability.

Keywords: high voltage transmission lines; electrical design; path optimization

引言

新型电力系统建设在全球能源转型与“双碳”目标驱动下, 正经历从规模扩张向内涵式发展的深刻变革。高压输电线路作为电能输送的骨干载体, 其设计能力需同步适配新能源大规模并网、负荷中心外延及极端气候频发等复杂场景。然而, 传统设计范式囿于静态经验模型与单学科割裂思维, 难以应对多尺度、多灾害耦合的工程挑战: 在路径规划中, 人工勘测主导的线性决策模式缺乏对生态红线、地质风险及电网拓扑演变的动态响应; 杆塔选型过度依赖历史工程案例, 对复合材料应用、智能传感集成等技术创新响应迟滞; 而防雷抗冰设计仍停留在标准化配置阶段, 未能建立与区域微气象特征、灾害链演化规律相匹配的动态防护体系。这些技术瓶颈暴露出传统设计在数据驱动能力、跨学科协同机制及全寿命价值优化维度的系统性缺失。本文以数字孪生、多物理场仿真与智能算法为核心技术支点, 重构高压输电线路电气设计的理论框架与实践

路径, 通过打通“地理信息-材料性能-灾害响应”的数据闭环, 探索设计模式从被动防御向主动免疫、从局部优化向全局协同的范式跃迁, 为新型电力系统构建高可靠性、强韧性、可持续的输电基础设施提供方法论革新与工程实践参考。

1 高压输电线路的特点

高压输电线路作为电力系统的主动脉, 其技术特征与工程复杂性集中体现在多物理场耦合作用与全生命周期风险管控需求上。在电气参数层面, 高电压等级导致强烈的电磁场分布不均与电晕效应, 需通过导线分裂数优化、均压环配置及绝缘子串长精确计算实现电磁平衡; 机械性能方面, 线路跨越山川、江河等复杂地形时, 导线张力变化、杆塔振动模态及基础沉降控制需借助流体力学与结构动力学模型进行协同仿真。环境适应性设计则需应对高海拔地区空气稀薄引发的绝缘强度衰减、沿海盐雾腐蚀加速及极寒地区覆冰荷载叠加风振的复合灾害, 迫使设计标准

融入气候分区差异化策略^[1]。同时,高压线路对周边生态系统的潜在影响催生了低噪声导线、电磁屏蔽植被缓冲带等绿色设计技术的应用,并在路径规划中引入生态红线智能避让算法。

2 高压输电线路电气设计存在的问题

2.1 路径选择不合理

高压输电线路路径规划的缺陷集中表现为技术手段的局限性与决策逻辑的短视性。传统路径选择过度依赖人工踏勘与二维地形图分析,缺乏对三维地质构造、生态脆弱带及未来城市发展廊道的系统性评估。例如,在山区线路规划中,设计单位常优先选择坡度平缓、林木覆盖率低的“捷径”路径,却忽视区域断层活动性、泥石流隐患及生物迁徙通道的保护需求,导致线路建成后频繁遭遇山体滑坡冲击或生态修复诉讼。平原地区则因过度避让既有建筑与农田,被迫采用多转折绕行方案,不仅增加导线损耗与电压波动风险,还因路径迂回占用大量土地资源,加剧用地矛盾。更深层次的问题在于,路径规划与区域电网拓扑结构、新能源接入节点的协同性不足,部分线路为规避短期施工阻力而偏离负荷中心或主干网架,造成输电走廊布局松散、通道利用率低下。此外,跨行政区域的路径协调机制缺失,使得省际交界地带的线路走向常因地方利益博弈而反复调整,进一步放大规划冲突与投资浪费。

2.2 杆塔基础型号选择不合理

当前,我国高压输电电气设计主要采用架空线路方式,其中杆塔的设计是关键环节之一,其型号的选择在保障设计质量和运行安全方面具有重要作用。然而,在实际设计过程中,部分设计人员未能严格遵循规范流程,尤其在杆塔基础型号的选择上缺乏科学性与合理性,导致高压输电电气设计的整体质量和安全性难以得到有效保障,影响了工程的稳定运行与后期维护效率。

2.3 没有进行有效的防雷与抗冰设计

高压输电线路的防雷与抗冰设计缺陷本质源于灾害防护理念的静态化与区域适应性的系统性缺失。防雷设计方面,标准化配置模式忽视雷暴活动的时空异质性:在雷电活跃的丘陵地带,架空地线保护角与屏蔽范围未结合地形起伏度与雷电流幅值分布进行动态调整,导致部分区段雷电绕击概率激增;而低电阻率土壤区域的接地装置仍采用通用深埋方案,未能利用局部地质特性优化冲击散流效率,使得接地体腐蚀加速且散流效果衰退。抗冰设计则陷入“历史经验主导”的认知局限,现行覆冰荷载计算多基于多年平均气象数据,缺乏对气候变暖背景下雨淞、雾凇混合凝结机制的动态模拟,导致导线不均匀覆冰引发的舞动振幅与频率预测失真。更为严峻的是,防雷与抗冰措施的割裂设计引发次生风险:例如,为增强防雷性能增设的架空地线可能改变导线覆冰分布形态,加剧冰荷载偏心引发的扭矩失衡;而抗冰设计中的导线增粗或间隔棒加密又

会抬高线路整体高度,扩大雷击暴露面积。这种“单灾种防御、多灾害耦合”的矛盾暴露出防护体系协同机制的空白,使得线路在复合极端天气下面临连锁故障风险,如雷击引发绝缘子闪络后叠加冰载导致断线倒塔的级联效应^[2]。设计思维的碎片化与灾害链推演能力的不足,使得防护投入与抗灾效能严重失衡,成为制约电网韧性的深层瓶颈。

3 高压输电线路电气设计改进方法

3.1 进行输电线路路径优化选择

高压输电线路路径优化的核心在于构建多维度、动态演进的智能决策体系。设计过程中需深度融合地理信息系统(GIS)的时空数据分析能力、遥感技术的广域监测优势及人工智能算法的自学习特性,形成“空-天-地”一体化的立体勘测网络。通过高精度三维数字高程模型重构地形地貌,结合地质雷达探测与岩土力学参数反演,精准识别活动断层、溶洞发育区及潜在滑坡体等地质风险源,实现路径避障的毫米级精度控制。同时,引入生态敏感区智能识别算法,将自然保护区、水源涵养带及珍稀物种栖息地的空间分布数据嵌入路径规划模型,自动生成生态干扰最小化的走廊方案。在电网协同层面,路径优化需耦合区域能源互联网架构,通过潮流计算与短路容量校核预判线路投运后对电网稳定性的影响,并基于负荷增长预测与新能源电站布局趋势,预留通道扩容裕度与互联节点接口。针对土地资源约束,利用深度强化学习算法模拟城市扩张、耕地保护与工业用地规划的动态博弈,构建路径方案与国土空间规划的长期适配模型。此外,路径决策机制需嵌入全寿命周期价值评估框架,综合量化施工阶段的林木砍伐补偿、运维期的地质灾害处置成本及技改期的迁改概率损失,通过蒙特卡洛模拟生成风险-成本均衡的帕累托最优解集。

3.2 对杆塔基础型号合理选择

杆塔基础选型的科学化与精细化需构建“地质-荷载-材料”三位一体的协同决策体系。在数据采集阶段,通过无人机倾斜摄影、地质雷达波速反演与土体原位剪切试验,建立涵盖地层结构、地下水位波动及化学腐蚀环境的高精度地质模型,为选型提供毫米级精度的岩土力学参数。荷载分析层面,采用多物理场耦合仿真技术,模拟风-冰-地震复合激励下不同基础结构的动态响应特性,例如通过瞬态动力学分析揭示微型桩基础在冻融循环中的微裂缝扩展规律,或利用流固耦合模型评估螺旋锚基础在液化土层中的抗拔性能衰减阈值。针对滨海盐渍土、喀斯特溶洞等特殊地质,可创新应用碳纤维增强复合材料基础或自平衡式预应力锚杆基础,其轻量化、耐腐蚀特性能够显著降低全寿命周期维护成本,但需通过缩尺模型振动台试验与长期原位监测验证结构可靠性^[3]。在选型决策机制上,需融合知识图谱与机器学习算法构建智能辅助系统:一方面将历史工程中不同地质分区、荷载场景下的选型案例与失

效模式进行特征提取与关联映射,形成动态更新的选型规则库;另一方面,通过实时接入施工现场的土体含水率、基础沉降监测数据,驱动选型模型的自适应优化。例如,当监测到软土地基的固结速率低于预期时,系统可自动推荐增设砂井排水或调整基础埋深,并结合腐蚀速率预测模型动态修正混凝土保护层厚度设计值。

3.3 进行有效的防雷抗冰设计

高压输电线路的防雷抗冰设计需突破传统静态防护范式,构建“气象感知-机理建模-动态调控”的全链路灾害响应体系。防雷设计层面,基于雷击流注先导发展机制与线路电磁暂态特性的多物理场耦合仿真,研发差异化避雷线配置策略:在雷电活动强烈的峡谷地形,采用可控等离子避雷针与分布式消弧间隙协同布局,通过实时电场强度监测触发预放电干预,主动引导雷电流路径;针对土壤电阻率梯度变化显著的平原区域,设计多层环形接地网与离子接地极复合结构,利用土壤电导率动态调节技术实现冲击阻抗的主动控制。抗冰设计则需融合气候系统演变规律与导线覆冰微观物理过程,建立覆冰类型(雨淞、雾淞、混合冰)与导线舞动模态的关联模型,研发基于形状记忆合金的覆冰舞动抑制装置与微波定向融冰技术,通过相变材料涂层降低冰层附着力。智能防护系统的核心在于“端-边-云”协同架构:部署于线路塔头的微型气象站实时采集大气电场、温湿度及风速廓线数据,边缘计算节点通过轻量化机器学习算法识别雷云生成趋势与覆冰临界条件,动态调整避雷器动作阈值与融冰装置功率;云端数字孪生平台则整合历史灾害案例与实时监测流,利用深度强化学习模拟多灾害耦合场景下的防护策略博弈,生成风险最小化的自适应防护拓扑。此外,需建立防雷与抗冰措施的协同优化机制,例如在覆冰高风险区采用低噪声避雷线以降低导线舞动激励,或通过接地网热效应辅助局部融冰,实现防护资源的跨功能复用。

3.4 加强对高压输电线路电气设计人员培训

高压输电线路设计人员的能力重构需以“技术迭代适应性”与“系统思维构建”为核心目标,打造贯穿职业全周期的梯度化培养生态。在技术赋能维度,构建基于数字孪生平台的虚拟仿真实验室,集成BIM参数化建模、机器学习算法调参及多物理场耦合分析工具链,通过沉浸式操作界面让设计人员直观掌握新型杆塔结构拓扑优化、动态荷载概率分布模拟等前沿技术。例如,开发覆冰导线舞动仿真模块,结合VR交互技术模拟极端气候下导线形变与机械失效过程,训练设计人员快速识别临界风险参数并优化抑舞装置配置方案。案例教学层面,需建立覆盖高海拔冻土区、沿海盐雾腐蚀带等典型场景的工程案例库,组织设计团队对跨国联网工程、柔性直流输电项目等复杂场景开展沙盘推演,深度剖析绝缘子污闪梯度设计、接地网跨

文化标准差异等实战痛点,培养全球化视野下的技术适配能力。跨学科协同能力的提升需打破专业壁垒,搭建“电气-地质-气象”知识融合的复合型培养框架:定期举办极端气候适应性设计研讨会,邀请气象学家解析厄尔尼诺事件对线路覆冰模式的长期影响,或联合材料学家探讨碳纤维复合横担的疲劳寿命预测方法^[4]。同时,推行“轮岗实训”机制,安排设计人员参与施工监理、运维检修等下游环节,通过全产业链视角理解设计缺陷的传导效应,例如杆塔选型偏差导致的施工延期或融冰装置冗余引发的运维成本激增。此外,建立动态知识更新机制,实时追踪IEC、CIGRE等国际组织的最新标准与技术白皮书,通过“标准解读-场景映射-案例验证”三步法,确保设计规范与全球技术趋势同步演进。这种以问题为导向、以系统为边界、以创新为驱动的培养模式,将推动设计人员从单一技术执行者向“安全-经济-环境-社会”多维价值平衡者的角色跃迁,为新型电力系统建设储备战略型人才资源。

4 结语

高压输电线路电气设计的革新突破,标志着电力行业正从工程经验依赖型向数据智能驱动型的历史性跨越。通过多物理场耦合仿真、全生命周期价值优化及灾害链阻断技术的深度融合,当前设计体系在路径规划精准性、杆塔选型适配度与抗灾防护可靠性等维度实现系统性跃升,为破解复杂地形适配、极端气候应对等长期技术窠臼提供了全新方法论。随着数字孪生技术对线路运行状态的毫米级镜像重构,以及自适应算法对设计参数的动态调优,未来输电线路将具备自我进化能力,在“源网荷储”协同互动中实现效能-安全-成本的帕累托最优。这种技术范式与能源战略的深度耦合,不仅重塑了电网基础设施的构建逻辑,更在新型电力系统框架下开辟了低碳化、弹性化、智能化的可持续发展路径,为我国抢占全球能源治理制高点奠定核心支撑。

【参考文献】

- [1]夏旭东. 高压输电线路电气设计常见问题及完善对策探究[J]. 冶金管理, 2024(12): 75-79.
 - [2]王志超. 高压输电线路电气设计中存在的问题及解决对策[J]. 自动化应用, 2023, 64(2): 89-91.
 - [3]王琼. 高压输电线路电气设计问题及完善对策探究[J]. 电力设备管理, 2021(9): 71-72.
 - [4]周阳帆. 高压输电线路电气设计问题及完善对策探究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(11): 13-15.
- 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。