

高压输电线路的雷击防护技术研究与优化

殷超¹ 居尚² 施渊³

1 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏南京, 210000;

2 扬州浩辰电力设计有限公司, 江苏扬州, 225000;

3 国网江苏省电力有限公司南通供电公司, 江苏南通, 226001;

摘要:针对高压输电线路在运行过程中所面临的雷击防护问题, 通过深入分析雷击对输电线路造成的破坏机理研究了多种防护技术方案。采用数值模拟及现场实测相结合的方法, 对架空地线、避雷器、接地装置等防护设施进行了系统性研究, 通过对绝缘子串防护性能、避雷器保护特性以及接地装置阻抗参数等关键指标进行测试与分析, 提出了防护措施的优化策略。研究结果表明, 合理配置防护设施、优化接地网布置、改进绝缘子防雷性能等措施能有效提升输电线路的雷击防护水平, 基于研究成果, 制定了一套完整的雷击防护技术优化方案, 为提高输电线路运行可靠性提供了重要参考。

关键词:雷击防护; 避雷器; 接地装置; 绝缘子串

DOI:10.69979/3041-0673.25.02.086

高压输电线路是电力系统的重要组成部分, 其运行可靠性直接影响着电力系统的稳定运行。雷击故障作为影响输电线路运行的主要因素之一, 其防护技术研究具有重要意义, 随着电网规模不断扩大, 输电线路跨越复杂地形日益增多, 传统的雷击防护方式已难以满足实际需求, 近年来新型防护材料与技术的不断涌现, 为解决雷击防护难题提供了新思路。通过对现有防护技术进行深入研究与创新优化采用先进的数值计算方法与检测手段, 可有效提升防护效果, 基于工程实践经验, 结合新型防护技术的应用特点, 深入开展防护措施的优化研究, 对提高输电线路的抗雷性能具有重要的实践价值。

1 雷击防护基础分析

高压输电线路在雷电活动频繁地区极易遭受雷击破坏, 主要包括直击雷和感应雷两种形式, 直击雷会造成线路绝缘子闪络, 引起相间短路或相对地短路, 导致输电线路跳闸; 感应雷则会在线路上产生过电压, 对设备绝缘造成损害。通过对雷击参数进行统计分析发现雷击电流幅值多集中在 20~40kA 范围内, 雷击波前时间为 1.2~8 μs, 波尾时间为 20~50 μs, 雷击位置主要集中在输电线路档距中部和杆塔顶部, 其中杆塔顶部遭受雷击的概率较大。根据雷击破坏机理分析, 当雷电流注入输电线路后, 会在线路及杆塔上形成行波, 在波阻抗不连续处发生反射和折射, 产生过电压, 这种过电压会导致绝缘子串发生闪络, 进而引发短路故障, 雷击电流通过接地装置流入大地时, 会在接地电阻上产生电位升高, 当电位超过绝缘子耐受水平时, 会发生反闪络。

因此针对不同类型的雷击破坏机理, 需要采取相应的防护措施, 如增设避雷线、安装避雷器、优化杆塔接地等以提高输电线路的抗雷能力, 还需考虑线路所处地区的地质条件、气象特征等环境因素, 因地制宜地制定防护方案, 通过对雷击破坏机理的深入研究可为后续防护技术的优化提供理论依据^[1]。

2 雷击防护关键技术研究

2.1 避雷器配置技术优化

针对高压输电线路避雷器配置问题, 采用数值模拟与实验相结合的方法进行深入研究。通过建立电磁暂态仿真模型分析不同避雷器安装位置和数量对防护效果的影响, 研究表明在输电线路转角杆塔、分支杆塔及直线档距较长处增设避雷器, 能显著提高防护效果, 避雷器的选型需综合考虑工作电压、残压特性和能量吸收能力等因素。在实际应用中, 采用金属氧化锌避雷器替代传统硬质合金避雷器, 不仅具有更好的非线性特性而且无需设置放电间隙, 可靠性更高, 通过优化避雷器的布置方式在重要线路段采用并联安装方式, 可提高防护裕度。结合线路实际运行工况, 建立了避雷器动态配置模型, 根据雷电活动规律和线路重要程度, 制定差异化配置方案, 实践证明, 采用优化后的避雷器配置方案, 可使线路雷击跳闸率降低 40%以上, 经济效益显著。

2.2 接地系统改进方案

针对传统接地系统在复杂地质条件下接地电阻值偏高的问题, 开展了接地系统改进研究, 通过对不同土

壤电阻率进行测试分析发现深层土壤电阻率普遍低于表层，据此提出了分层接地方案。在接地极布置方面，采用放射型与环形相结合的方式，增加接地极与土壤的接触面积，在土壤电阻率较高区域，采用离子接地材料进行土壤改良，有效降低了接地电阻值，在接地导体连接处，采用热熔焊接工艺替代传统机械连接，提高了连接可靠性。为解决季节性土壤电阻率变化问题，在重要杆塔处采用深井接地技术，将接地极埋设至地下水位以下，确保接地电阻全年稳定，通过改进接地系统设计使接地电阻值较传统方案降低了30%，且年度变化幅度控制在15%以内，显著提升了接地系统的可靠性^[2]。

2.3 绝缘子防护性能提升

针对高压输电线路绝缘子在雷击防护中的关键作用，开展了绝缘子防护性能提升研究，通过改进绝缘子串结构设计采用大直径、多片绝缘子串组合方式，提高了绝缘子串的耐雷水平。在绝缘子材质选择方面，采用改性复合材料替代传统瓷质材料，不仅提高了绝缘强度还增强了抗污闪性能，在绝缘子表面喷涂纳米级疏水涂层，有效改善了绝缘子在潮湿环境下的电气性能，针对绝缘子串间隙闪络问题，通过优化金具结构增大了绝缘子串对地及相间距离，降低了闪络概率。在重污染区域，采用大伞裙、多裙型绝缘子，提高了爬电距离，增强了绝缘子的防污能力，通过实验室模拟试验和现场运行验证，改进后的绝缘子串在雷电冲击下表现出更好的绝缘性能，闪络率降低了35%以上。

2.4 防雷设施协同保护

基于系统工程理念，研究开发了防雷设施协同保护技术方案。通过建立防雷设施信息数据库，实现了避雷器、接地装置、绝缘子等设备的状态信息实时监测与共享，采用智能化控制系统，根据雷电预警信息和设备运行状态，自动调整防护策略，在线路重要节点处安装雷电流监测装置，实时记录雷击参数，为防护方案优化提供数据支持。通过构建防雷设施协同响应机制当检测到雷击时，各防护设备能够快速协同动作，形成多重防护屏障，建立了防雷设施性能评估体系，定期对各类防护设备进行检测评估，及时发现并处理潜在问题，实践证明，采用协同保护方案后，防雷设施的整体防护效果提升显著，系统可靠性得到有效保障。

为进一步提升协同保护效果，开发了基于云平台的防雷设施管理系统，该系统采用分层架构设计，包括数据采集层、网络传输层、数据处理层和应用服务层，在数据采集层，通过部署多类传感器网络实现对电气参数、

气象条件和设备状态的全面监测。网络传输层采用5G通信技术，确保数据传输的实时性和可靠性，数据处理层引入大数据分析技术，对海量监测数据进行深度挖掘，建立设备状态评估模型和故障预警模型，在应用服务层，开发了可视化管理界面，实现了防雷设施的远程监控和智能运维。系统还具备移动端应用功能，运维人员可通过手机APP随时查看设备状态，接收告警信息，快速响应处理故障，通过一年的运行验证系统平均故障响应时间缩短了60%，设备维护效率显著提升，运维成本降低了35%^[3]。

3 雷击防护技术创新与应用

3.1 新型避雷器应用研究

围绕提升避雷器性能的目标，开展了新型避雷器应用技术研究，采用纳米复合金属氧化物作为核心材料，研制出具有更优非线性系数的新型避雷器。该避雷器在保护特性方面表现出显著优势，残压比传统产品降低20%，能量吸收能力提升35%，在结构设计上，采用模块化密封结构，提高了产品的防潮能力和机械强度，通过改进内部压力释放装置有效解决了避雷器过负荷时的防爆问题。在避雷器外套管表面设计了新型均压环，改善了电场分布，提高了产品的稳定性，在生产工艺方面，采用精密控制烧结技术，显著提升了产品性能的一致性，实验室加速老化试验表明，新型避雷器的使用寿命较传统产品延长40%以上，运行可靠性得到显著提升。

3.2 接地电阻在线监测技术

针对传统接地电阻测量方法存在周期长、误差大等问题，研发了基于物联网技术的接地电阻在线监测系统。该系统采用分布式传感技术，在接地网关键节点布置监测单元，实现接地电阻值的实时采集，通过改进测量方法采用高频注入技术替代传统测量方式，避免了工频干扰的影响，提高了测量精度，在数据传输方面，采用无线通信技术，解决了传统有线方式布线困难的问题。系统配备了智能分析模块，能够自动识别异常数据并结合气象信息进行趋势预测，通过建立历史数据库实现了接地电阻变化规律的分析与评估，现场应用结果表明，该系统测量精度达到±2%，实时性优于5秒，为接地系统维护提供了可靠依据^[4]。

3.3 绝缘子串改进设计

针对传统绝缘子串在极端天气条件下防雷性能不足的问题，开展了绝缘子串结构改进设计研究。采用计算流体力学软件对绝缘子伞裙结构进行优化，设计出具

有自清洁功能的新型伞裙构型，通过增大伞裙边缘倾角提高了雨水冲刷效果，减少了污染物附着，在绝缘子芯棒材料方面，采用改性环氧树脂复合材料，提高了机械强度和抗老化性能。针对绝缘子串连接部位易发生电晕放电的问题，设计了新型均压环结构，有效改善了电场分布，在金具连接处采用弹性补偿装置，提高了绝缘子串的抗震性能，实验研究表明改进设计后的绝缘子串在带电条件下运行更加稳定，防雷性能提升显著。

在改进设计的基础上，进一步开展了绝缘子串组合方式的创新研究，通过优化绝缘子片数和间距建立了适应不同污秽等级的绝缘子串组合模型，在重污染地区，采用双串并联或三串并联的方式，显著提高了绝缘子串的电气强度。针对冰雪覆盖地区的特殊需求，设计了大间隙、大爬距的绝缘子串组合，有效解决了覆冰条件下的闪络问题，开发了绝缘子串状态评估技术，通过在线监测绝缘子表面温度分布和局部放电情况及时发现潜在故障。在沿海地区的试验线路上，采用新型组合方式后，绝缘子串的年度故障率降低了45%，维护成本显著降低，通过建立绝缘子串选型专家系统实现了不同地理环境下绝缘子串的最优配置，为工程应用提供了重要参考。

3.4 防护装置智能控制系统

为实现防雷设备的智能化管理，开发了基于人工智能算法的防护装置控制系统。该系统通过部署多类传感器，实现对雷电活动、气象条件和设备状态的全方位监测，采用深度学习算法建立雷电预警模型，提前预测雷击风险并自动调整防护策略，在控制层面，设计了分布式控制架构，实现了各防护设备的协同联动。系统具备自学习功能，能够根据历史数据不断优化控制参数，提高防护效果，通过建立专家决策系统在复杂工况下可提供智能化解决方案，实践应用表明，该系统响应时间小于100毫秒，大大提高了防护效率^[5]。

3.5 防雷性能评估方法

建立了一套科学完整的防雷性能评估体系，包含设备性能评估、系统可靠性评估和经济性评估三个层面，通过构建评估指标体系对防雷设备的技术参数、运行状态和防护效果进行量化分析，采用概率统计方法，建立了基于历史数据的可靠性评估模型，实现了防雷系统失

效风险的准确预测。在评估过程中引入模糊综合评判法，考虑多种影响因素的权重，提高了评估结果的准确性，建立了标准化的评估流程，确保评估工作的规范性和可重复性，通过定期开展评估工作及时发现防护系统中存在的问题，为优化改进提供依据。

4 结语

通过对高压输电线路雷击防护技术的深入研究，系统性地分析了各类防护措施的特点与应用效果，研究表明优化避雷器配置、改进接地系统设计、提升绝缘子防护性能等措施能够显著提高线路的抗雷能力。新型防护技术的应用为提升防护水平提供了有效途径，智能监测与控制系统的引入则为防护措施的优化调整提供了数据支持，基于研究成果，建立了一套完整的防护技术体系，在实际工程应用中取得了良好效果，未来还需要进一步深化研究，探索更加高效的防护方案，不断提升输电线路的运行可靠性。

参考文献

- [1] 林力辉, 吴晓杰, 康合敏, 等. 基于雷击防护的高压输电线路雷电监测系统研究[J]. 电工技术, 2022, (01): 147-148+169.
- [2] 吴洪双. 特高压与超高压输电线路多分裂导线施工技术研究[J]. 电力设备管理, 2024, (21): 219-221.
- [3] 高晓东, 安韵竹, 毕斌, 等. 输电线路雷击接地散流与附近管道过电压防护研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(01): 162-166+174.
- [4] 孟宪伦. 高压输电线路巡检与监测系统优化设计与应用研究[J]. 家电维修, 2024, (10): 107-109.
- [5] 汪世平, 丁志刚, 李吉, 等. 特高压输电线路监测终端取能技术的研究与应用[J]. 浙江电力, 2021, 40(11): 46-53.

作者简介：殷超（1990.01-），男，汉族，江苏泰州人，硕士，中级工程师 研究方向：电力系统及其自动化
居尚（1988.11-），男，汉族，江苏高邮人，本科，中级工程师 研究方向：220千伏及以下变电站电气一次设计

施渊（1983.11-），男，汉族，江苏南通人，本科，高级工程师 研究方向：电网建设