

输电线路防雷技术研究

李圣乾 刘 露 蒋志浩 杨培辉 张振昌
国网泰安供电公司 山东 泰安 271000

摘 要：雷电作为自然界强电磁脉冲现象，其产生的过电压、过电流对输电线路安全稳定运行构成严重威胁。雷击引发的绝缘子闪络、线路跳闸及设备损坏等问题，直接影响电力系统供电可靠性。目前，接闪分流、接地降阻、过电压限制及监测预警等技术广泛应用于输电线路防雷。随着智能电网建设推进，输电线路防雷技术正朝着智能化、数字化、材料结构创新、多技术协同及低碳环保方向发展，以适应电力系统高质量发展需求。

关键词：输电线路；防雷技术；发展趋势

引言

在现代电力系统中，输电线路作为电能输送的关键通道，其运行可靠性直接关系到社会生产与生活的用电稳定。雷电灾害是导致输电线路故障的主要因素之一，频繁的雷击事故不仅造成巨大的经济损失，还可能引发大面积停电，影响社会秩序。深入研究输电线路防雷技术具有重要现实意义。本文从雷击机理与危害分析入手，系统探讨现有防雷技术，并展望其未来发展趋势，以期提升输电线路防雷水平提供参考。

1 输电线路雷击机理与危害分析

1.1 雷电的形成与特性

雷电现象是大气中剧烈的静电放电过程，其形成基于复杂的气象与电学条件。对流云系在发展过程中，水汽凝结释放潜热驱动气流强烈上升，云内粒子间频繁碰撞、摩擦及破碎导致电荷分离，形成电荷的空间分布。一般情况下，云顶积聚正电荷，云底聚集负电荷，同时在地面感应出正电荷，当云地间电场强度超过空气击穿阈值（约 $3\times10^6\text{V/m}$ ），空气介质被电离形成导电通道，先导放电自云层向地面发展，当与地面迎面先导相遇时，形成主放电通道，瞬间释放巨大能量。单次雷电放电电流峰值可达数十千安甚至超200kA，放电通道温度高达20000℃，伴随强烈的电磁辐射与机械效应。雷电波形呈现典型的脉冲特性，雷电流波头时间在1-5μs，半波峰值时间20-50μs，具有频谱宽、能量集中于高频段的特征，这种高频成分极易通过电磁耦合对输电线路产生干扰。

1.2 输电线路雷击类型

输电线路遭受雷击主要分为绕击和反击两种类型。绕击是指雷电先导未受线路避雷线屏蔽作用，直接击中导线的现象。当避雷线保护角过大、地形突出或遭遇强烈雷暴时，雷电流直接注入导线，产生极高的过电压。由于绕击雷电流幅值较小但能量集中，常引发绝缘子闪

络或线路跳闸。反击则源于雷击杆塔或避雷线，强大的雷电流通过杆塔接地装置入地，在接地电阻上产生暂态电位升高，当该电位超过绝缘子串的冲击放电电压时，绝缘子串发生闪络，雷电流经闪络通道注入导线。相较于绕击，反击雷电流幅值更大，持续时间更长，可能造成绝缘子炸裂、金具损坏等严重设备故障，且易引发多基杆塔连续跳闸，扩大事故范围。两种雷击类型的发生概率与线路结构参数、地形地貌、雷电活动强度密切相关，需通过针对性的防护措施降低风险。

1.3 雷击对输电线路的影响

雷击对输电线路的影响涵盖电气、机械及绝缘等多个层面。电气方面，雷击产生的过电压沿导线传播形成雷电波，当遇到线路参数突变（如绝缘子、变压器等）时发生反射与折射，可能使电压幅值倍增，击穿线路绝缘引发短路故障。雷电波产生的暂态电磁脉冲会干扰线路保护装置和自动化系统，导致误动或拒动。机械层面，雷电流通过杆塔和导线瞬间产生的电磁力与热效应，会造成金具断裂、导线断股等损伤。雷电流产生的高温使空气急剧膨胀，形成强烈的冲击波，对杆塔结构产生冲击荷载，严重时导致杆塔倾斜甚至倒塌。绝缘性能方面，多次雷击冲击会加速绝缘子老化，降低其电气强度和机械强度，缩短使用寿命。频繁的雷击闪络还会在绝缘子表面形成碳化通道，进一步降低绝缘性能，增加线路运行风险，威胁电力系统的安全稳定运行。

2 输电线路防雷技术分析

2.1 接闪与分流技术

接闪与分流技术是输电线路抵御雷电直击与感应过电压的核心防护手段。通过在杆塔顶部架设避雷线，构建起立体式的拦截屏障，利用尖端放电原理将雷云电荷提前中和，改变雷电下行先导的发展路径，将直击雷电流引向避雷线而非线路本体。避雷线具备良好的电气导

通性，其截面设计需满足雷电流的承载要求，确保在强电流冲击下不发生熔断或过热现象。当雷电流沿着避雷线传输时，杆塔作为分流节点，将雷电流分散至大地。现代输电线路常采用多根避雷线并联的方式，增强接闪能力，同时优化避雷线的悬挂高度与保护角，通过精确的电磁仿真计算，将线路处于有效保护范围之内。在海拔、多雷区，还会配合安装线路避雷器，形成“拦截-疏导-钳位”的复合防护体系，进一步降低雷电流对线路绝缘子串的冲击强度^[1]。

2.2 接地降阻技术

接地降阻技术聚焦于提升杆塔接地装置的散流效率，是保障输电线路防雷性能的基础环节。良好的接地系统能够迅速将雷电流导入大地，避免杆塔电位的急剧升高。传统的水平与垂直接地体组合结构，通过增加接地体长度和埋设深度，扩大与土壤的接触面积，降低接触电阻。在土壤电阻率较高的地区，采用换土法、降阻剂填充等技术手段，改善接地体周边的导电环境。新型柔性石墨基接地体凭借其优良的导电性能和抗腐蚀特性，逐渐成为高腐蚀区域的优选方案。三维立体接地网络的构建，通过多方向的散流通道，减少雷电流的集中效应，使地电位分布更加均匀。接地装置的定期检测与维护至关重要，通过测量接地电阻值、检查接地体的完整性，及时发现并处理接地系统存在的隐患，确保雷电流能够高效、稳定地泄放。

2.3 过电压限制技术

过电压限制技术旨在抑制雷电过电压对输电线路绝缘的破坏作用，保障电力设备的安全运行。氧化锌避雷器作为核心防护元件，凭借其优异的非线性伏安特性，在正常运行电压下呈现高阻态，泄漏电流极小；当雷电过电压侵入时，迅速转为低阻态，将过电压限制在设备耐受水平之内，吸收雷电流能量后恢复绝缘性能。间隙保护装置通过设置放电间隙，在过电压达到击穿阈值时迅速导通，将雷电流旁路，避免绝缘子闪络。组合式过电压保护器集成多种保护元件，发挥不同器件的优势，实现对不同幅值过电压的分级限制。在超高压输电线路中，采用可控放电避雷针与线路避雷器协同工作，利用前者的主动引雷特性，降低避雷器的动作次数，延长设备使用寿命，同时配合绝缘子串的优化配置，提升线路整体的绝缘水平，有效防止雷击跳闸事故的发生^[2]。

2.4 监测与预警技术

监测与预警技术为输电线路防雷提供了智能化的保障，实现对雷击风险的实时感知与预判。在线监测系统通过安装于杆塔上的雷电定位传感器，实时捕捉雷击

的时间、位置、电流幅值等参数，结合地理信息系统（GIS），绘制区域雷电活动图谱，直观呈现雷击分布规律。绝缘子泄漏电流监测装置能够实时监测绝缘子表面的绝缘状态，当雷击导致绝缘子局部放电时，及时发出异常信号。基于大数据分析的预警模型，整合历史雷击数据、气象预报信息和线路运行参数，通过机器学习算法，预测特定区域的雷击概率和线路故障风险。当监测到异常雷击活动或设备隐患时，系统自动向运维人员推送预警信息，辅助制定针对性的检修计划，提前采取防护措施，变被动抢修为主动防御，显著提升输电线路的防雷可靠性和运维效率。

3 输电线路防雷技术的发展趋势

3.1 智能化与数字化防雷

（1）智能化与数字化防雷通过部署传感器网络实时采集输电线路运行数据，借助物联网技术将线路绝缘子泄漏电流、杆塔接地电阻、周边气象条件等关键信息传输至数据中心。利用机器学习算法对海量数据进行深度分析，构建精准的雷击风险预测模型，提前识别高风险区域与时段，为运维人员提供主动预警，改变传统被动防御模式。（2）数字孪生技术在输电线路防雷领域的应用日益深入，通过对物理线路进行1:1数字化建模，模拟不同雷击场景下线路的响应情况。运维人员可在虚拟环境中对防雷装置进行优化设计与参数调整，直观观察防雷效果，大幅缩短研发周期，降低试验成本，同时为制定差异化防雷策略提供可视化依据。（3）人工智能驱动的自适应防雷系统可根据实时监测数据自动调整防雷装置工作状态。当检测到雷击即将发生时，智能间隙装置能够迅速改变自身参数，提高放电性能，主动疏导雷电流；故障定位系统结合大数据分析，可在雷击故障发生后快速、精准锁定故障位置，极大提升线路故障修复效率，保障电力系统稳定运行。

3.2 新型材料与结构创新

（1）纳米复合绝缘材料凭借其优异的电气性能与机械强度，成为输电线路防雷的新选择。这类材料通过将纳米级填料均匀分散在基体树脂中，有效改善材料的耐电痕化、耐老化性能，大幅提升绝缘子的绝缘寿命与防雷能力。纳米材料的高比表面积特性使其具备更强的抗污闪能力，在复杂环境下保障线路绝缘可靠性。（2）超导体材料在防雷领域展现出独特优势，当雷电流通过超导装置时，由于超导体零电阻特性，能够快速导通大电流，避免线路因过电压造成损坏。新型碳纤维复合材料在杆塔结构中的应用，使杆塔具备重量轻、强度高、耐腐蚀等特点，有效降低雷击时杆塔的损坏概率，同时减

轻运输与安装难度,提升施工效率。(3)自修复材料的研发为输电线路防雷带来新突破,当防雷装置因雷击受损时,材料内部的微胶囊结构破裂释放修复剂,自动对损伤部位进行填充与固化,恢复材料性能。梯度功能材料的应用则根据防雷装置不同部位的工作需求,实现材料性能的梯度变化,如表面具备高耐电弧特性,内部保持良好机械强度,全方位提升防雷装置的综合性能^[3]。

3.3 多技术协同防护体系

(1)多技术协同防护体系整合多种防雷技术优势,将传统的避雷针、避雷线与新型的可控放电避雷针、线路避雷器相结合。在雷电侵入时,避雷针与避雷线优先对雷电流进行拦截与疏导,降低线路直击雷风险;当雷电流超过一定阈值,线路避雷器迅速动作,限制过电压幅值,形成多级防护屏障,全方位保障输电线路安全。

(2)将防雷技术与接地优化技术协同应用,通过采用柔性石墨接地体、降阻模块等新型接地材料,结合离子接地极等创新接地结构,降低杆塔接地电阻,提高雷电流散流效率。配合防雷间隙装置,在雷击时快速建立低阻抗通道,引导雷电流入地,减少雷击对线路绝缘的冲击,提升线路耐雷水平。(3)融合气象监测与防雷技术,利用气象雷达、卫星云图等手段实时监测雷电活动。当预测到雷电天气时,提前调整防雷装置参数,启动备用防护措施;结合线路运行状态监测系统,对雷击后线路进行快速评估与修复,形成“监测-预警-防护-修复”的闭环防护体系,有效提升输电线路防雷的整体效能。

3.4 低碳化与环境适应性设计

(1)低碳化防雷设计聚焦于降低防雷装置全生命周期的碳排放,采用可回收材料制造防雷设备,如铝合金材质的避雷线夹、镁合金杆塔部件等,在保障性能的同时减少资源浪费与环境污染。在生产工艺上,推广绿色制造技术,优化加工流程,降低能耗与污染物排放,推

动输电线路防雷技术向绿色可持续方向发展。(2)针对不同地域环境特点,研发具有强环境适应性的防雷装置。在高海拔、强紫外线地区,采用抗老化性能优异的特种高分子材料制作绝缘子与防护套;在盐雾腐蚀严重的沿海地区,使用防腐涂层技术或耐蚀合金材料,提高防雷装置的抗腐蚀能力;在覆冰严重区域,设计自脱冰结构的防雷装置,避免因覆冰影响防雷性能。(3)通过优化防雷装置结构与布局,降低其对生态环境的影响。采用紧凑型设计减少占地面积,避免破坏植被与生态地貌;在鸟类活动频繁区域,加装驱鸟装置或优化防雷设施造型,防止鸟类筑巢引发短路故障,实现防雷技术与生态环境保护的和谐统一,保障电力系统与自然环境协调发展^[4]。

结语

综上所述,全面深入研究输电线路防雷技术,对保障电力系统安全稳定运行意义重大。通过剖析雷电形成特性、雷击类型及其对输电线路的影响,明确了现有接闪分流、接地降阻等防雷技术的原理与应用价值。随着智能化、数字化技术及新型材料的发展,多技术协同、低碳环保的新型防雷体系将不断完善,为输电线路抵御雷击风险、提升供电可靠性提供坚实保障,推动电力行业可持续发展。

参考文献

- [1]张强.输电线路防雷技术研究[J].百科论坛电子杂志,2020(7):1638.
- [2]任宁亚.输电线路防雷技术研究[J].建筑工程技术与设计,2020(19):497.
- [3]王兵兵.输电线路防雷技术研究[J].建筑工程技术与设计,2020(14):4237.
- [4]张伟成.输电线路防雷技术研究[J].商品与质量,2020(11):129.