

输电线路的防雷设计与输电线路运维技术

何 峰

国网陕西省电力有限公司延安供电公司 陕西 延安 716000

摘 要：雷电作为自然现象，对输电线路影响重大。本文阐述雷电形成原理及输电线路遭雷击形式，强调防雷设计重要性。介绍接地系统、避雷器、架空地线等防雷设计关键技术，以及日常巡检、故障排查、设备维护等运维技术。展望新材料、智能化等新技术应用前景，为提升输电线路防雷水平提供参考。

关键词：输电线路；防雷设计；运维技术；新技术应用

引言：雷电是影响输电线路安全运行的重要自然因素，直击雷和感应雷均可能引发线路跳闸或设备损坏。随着电网规模扩大，对输电线路防雷能力提出更高要求。科学的防雷设计和有效的运维手段成为保障线路稳定运行的关键。本文从雷电形成及其影响入手，系统分析了输电线路防雷设计的核心技术和运维策略，并展望了未来防雷新技术的发展趋势。

1 输电线路防雷设计基础

1.1 雷电形成原理及其对输电线路的影响概述

雷电现象源于大气中复杂的电荷运动与能量释放过程。积雨云发展阶段，内部水滴、冰晶与气流剧烈摩擦，致使云层内部电荷分布失衡。随着电荷不断累积，云层与云层间、云层与地面间电场强度持续增强，当突破空气绝缘临界值，便形成导电通道。闪电瞬间释放巨大能量，产生强烈光辐射与高温，通道内空气受热急速膨胀，引发冲击波向外扩散。这种能量冲击对输电线路产生多方面影响。高温致使闪电通道附近空气剧烈膨胀，产生的冲击波直接作用于输电线路杆塔，可能造成结构损伤甚至倒塌。闪电激发的强电磁脉冲，会在输电线路路上感应出暂态过电压，这种过电压可瞬间击穿线路绝缘层，导致绝缘子闪络、线路短路，干扰电力系统正常运行。此外，雷电流沿线路传导，会在杆塔和接地装置上形成电位降，引发反击现象，进一步加剧线路故障风险。

1.2 输电线路遭受雷击的主要形式

输电线路遭受雷击的主要形式包括直击雷与感应雷。直击雷指雷电直接击中输电线路杆塔、避雷线或导线，强大雷电流沿被击物体传导，在瞬间产生极高电位。当雷电流幅值较大时，杆塔和接地装置电位急剧升高，引发反击，致使绝缘子串闪络，造成线路短路跳闸。感应雷则是雷电发生时，雷击点周边电磁场急剧变化，在输电线路路上感应出大量电荷^[1]。雷击结束后，这些

感应电荷迅速流动，形成过电压波沿线路传播。尽管感应雷过电压幅值通常低于直击雷，但其覆盖范围广泛，易引发绝缘子局部放电，加速绝缘老化，长期作用下会降低线路绝缘性能，增加故障发生概率。绕击雷也是不容忽视的雷击形式，当避雷线保护角设计不合理或受地形影响，雷电可能绕过避雷线直接击中导线，同样会对线路造成严重破坏。

1.3 防雷设计的重要性及目标设定

防雷设计是保障输电线路安全运行的关键环节。输电线路作为电力传输的基础设施，一旦因雷击出现故障，将导致大面积停电，直接影响工业生产、居民生活等多个领域的正常用电秩序。频繁的雷击故障不仅增加线路维护成本，还会缩短设备使用寿命，降低电力系统整体可靠性。防雷设计围绕降低雷击故障率、保障线路稳定运行展开。通过科学规划和合理布局防雷装置，最大程度减少直击雷对线路的直接损害，抑制感应雷产生的过电压。在雷电活动频繁区域，确保输电线路能够承受雷电冲击，降低绝缘子闪络、线路跳闸几率，维持电力系统持续稳定供电，提升输电网络整体安全性与可靠性，为电力传输构建坚实的防护屏障。

2 输电线路防雷设计关键技术

2.1 接地系统的设计原则与优化措施

接地系统是输电线路雷电流泄放的核心通道，其性能能直接影响线路防雷效果。设计接地系统时，首要目标是实现低接地电阻，保证雷电流能快速导入大地，降低杆塔电位反击风险。降低接地电阻可从多维度着手，一方面通过增加接地体数量与长度，利用多根垂直接地极配合水平接地体形成立体网络，扩大与土壤接触面积；另一方面采用物理降阻材料，如将降阻模块与接地体紧密连接，改善接地体周边土壤导电特性，增强散流能力。地网布局优化需结合地理环境特性。在平坦开阔区域，采用环形或网格状地网结构，确保电流均匀扩散；

若处于山区复杂地形,可依山体走势布置放射状地网,沿岩石缝隙或低洼潮湿处理设接地体,充分利用土壤电阻率较低区域。针对土壤分层特性,优先将接地体铺设于低电阻率土层,通过合理调整地网埋深与走向,提升接地系统整体效能,避免因布局不当导致局部电阻过高。

2.2 避雷器的选择与配置

避雷器在过电压防护中起关键作用,不同类型产品工作机制存在差异。氧化锌避雷器基于非线性伏安特性,正常运行时呈高阻态,泄漏电流微弱;遭遇雷击过电压瞬间,迅速转变为低阻通道,将雷电流引入大地,限制电压幅值。间隙型避雷器则依靠气体放电间隙,当电压超过击穿值时,间隙放电导通,释放过电压能量^[2]。安装位置选择直接决定避雷器保护效果。线路绝缘子串两端是重点安装区域,在此处加装避雷器可有效限制绝缘子承受的过电压,防止闪络。变压器、开关设备等终端设备的进线侧,同样需配置避雷器,抵御沿线路侵入的雷电波,保护设备绝缘。对于易受雷击的特殊区段,如大跨越档、高海拔线路,应根据雷击风险等级,在杆塔适当位置增设避雷器,形成多级防护体系,确保不同电压等级和环境条件下线路的过电压防护需求。

2.3 架空地线(屏蔽线)的应用

架空地线通过物理屏蔽降低直击雷风险,其架设高度与保护角设计需综合权衡。增加架设高度可扩大保护范围,但会提升施工成本与运维难度;保护角大小直接影响屏蔽效果,较小的保护角能增强对导线的屏蔽能力,需依据线路电压等级、所处区域雷击强度等因素确定。对于雷电活动频繁区域,适当减小保护角,确保导线处于架空地线有效防护范围内;而在雷击风险较低地区,可适度放宽保护角要求,优化工程经济性。材料选择影响架空地线的性能与寿命。钢芯铝绞线凭借高强度与良好导电性成为常用材料,内部钢芯提供机械支撑,外层铝线承担导电功能;铝包钢绞线则具备优异的耐腐蚀性能,适用于沿海、化工区等恶劣环境。雷击时产生的高温与大电流对材料热稳定性提出要求,需确保材料在瞬间过载情况下不发生熔断或机械性能下降。材料重量与柔韧性影响施工便利性和长期运行可靠性,需综合考虑线路档距、地形条件,选择适配的架空地线材料,保障其在防雷功能与工程实施间达到平衡。

3 输电线路防雷运维技术

3.1 日常巡检内容与周期规划

输电线路日常巡检是保障防雷性能的基础工作。巡检重点聚焦于易受雷击和环境影响的区域,如地形高耸处、空旷开阔地带的杆塔,这些位置因缺乏遮挡,遭受

直击雷概率更高。检查项目涵盖杆塔本体、接地装置、架空地线和避雷器等关键部件。杆塔需查看是否存在倾斜、锈蚀,连接部件有无松动;接地装置要检查其与土壤的接触状态,有无外露、断裂;架空地线则需确认架设高度、保护角是否发生偏移;避雷器表面有无破损、放电痕迹也是检查要点。周期规划需依据线路所处环境和运行状况灵活调整。处于雷电高发区的线路,巡检频率应适当增加,以每月或每季度为周期开展全面检查。对于运行年限较长、设备老化严重的线路,缩短巡检间隔有助于及时发现潜在隐患。季节性维护工作需提前部署,在雷雨季节来临前,重点排查防雷设备的性能,紧固连接部件,清理绝缘子表面污垢,降低雷击引发闪络的风险;冬季则需检查杆塔基础是否因冻胀受损,避免因结构不稳定影响防雷系统有效性。

3.2 故障排查与快速修复策略

准确识别常见故障类型是高效排查的前提。雷击造成的绝缘子闪络,会在绝缘子表面留下明显的放电痕迹,同时可能伴随线路跳闸;接地装置失效时,接地电阻值会超出正常范围,影响雷电流泄放;避雷器故障表现为本体发热、泄漏电流异常增大。针对不同故障类型,采用相应检测手段,如通过红外测温仪检测避雷器温度,利用接地电阻测试仪测量接地装置阻值。应急处理流程需遵循标准化操作。线路发生雷击故障跳闸后,首先通过故障录波装置和在线监测系统初步定位故障区段,随后安排人员携带检测设备赶赴现场^[3]。在现场检查时,遵循从整体到局部的原则,先排查杆塔、架空地线等明显受损部件,再深入检测避雷器、绝缘子等细节部位。修复过程中,严格按照操作规程更换损坏设备,对新安装的绝缘子、避雷器进行绝缘测试和性能校验,确保修复后的线路恢复防雷能力。处理故障时需注意安全,穿戴绝缘防护用具,避免在恶劣天气下进行高空作业。

3.3 防雷设备的状态评估与维护

监测手段是掌握防雷设备运行状态的关键。采用在线监测技术实时获取避雷器泄漏电流、绝缘子串电压分布等参数,通过数据分析判断设备性能变化趋势。对于接地装置,定期开展开挖检查,观察接地体的腐蚀程度,测量接地电阻值,结合历史数据评估其散流能力。利用无人机搭载高清摄像头对架空地线进行巡检,可直观发现断股、磨损等问题,相比人工巡检效率更高且能覆盖危险区域。维护保养需结合设备特性制定方案。避雷器表面污垢会影响其绝缘性能,需定期进行清扫,对于复合绝缘子,可使用专用清洁剂去除表面污秽;接地装置若出现腐蚀,及时采取防腐处理,更换锈蚀严重的

接地体,或在接地体表面涂抹防腐材料。当设备运行年限接近或达到设计寿命,依据状态评估结果,及时制定更新计划。对于性能下降明显、存在安全隐患的防雷设备,优先安排更换,确保输电线路防雷系统持续可靠运行,降低雷击故障发生概率。

4 新技术在输电线路防雷中的应用展望

4.1 新材料在防雷设备中的应用前景

新材料研发为输电线路防雷设备性能提升开辟新路径。在接地材料领域,纳米碳基复合材料展现出独特优势。其具有极高的导电性,相比传统金属材料,能显著降低接地电阻,优化雷电流泄放效率。同时纳米碳基材料的化学稳定性强,耐腐蚀性远超钢材,可有效延长接地装置使用寿命,减少因腐蚀导致的接地性能下降问题。在绝缘子材料方面,新型复合绝缘材料不断迭代。这些材料以高分子聚合物为基体,添加特殊增强纤维,兼具高绝缘强度与优异的耐候性。相比传统陶瓷或玻璃绝缘子,新型复合材料重量更轻,便于安装维护,且表面憎水性强,不易吸附污秽,能大幅降低雷击闪络风险。具有自修复功能的涂层材料也逐步应用于防雷设备表面,当涂层因雷击或其他因素受损时,可通过物理或化学反应自动修复微小裂纹,维持设备防护性能。

4.2 智能化防雷技术的发展趋势

智能化技术正重塑输电线路防雷体系。基于物联网的在线监测系统愈发成熟,通过在防雷设备上部署各类传感器,实时采集避雷器泄漏电流、绝缘子串电压分布、接地电阻等关键参数。借助5G通信技术,这些数据能快速传输至监控中心,利用大数据分析和人工智能算法,精准预测设备故障与雷击风险。例如,通过分析历史雷击数据与实时气象信息,系统可提前预判高风险区域,为运维人员提供精准的巡检与防护建议^[4]。无人机与机器人技术在防雷运维中的应用也不断深化。具备高分辨率成像和红外热像检测功能的无人机,可快速对输电线路进行全方位巡检,识别防雷设备的细微损伤与异常发热点。智能机器人则能在复杂地形或恶劣环境下,自主完成避雷器参数测量、绝缘子清扫等维护工作,提升

运维效率与安全性。未来,智能化防雷系统有望实现从故障监测到自主决策、自动修复的全流程闭环管理。

4.3 其他新兴技术对提升防雷效果的可能性探讨

除新材料与智能化技术外,其他新兴技术也为输电线路防雷带来新可能。等离子体技术在防雷领域的应用逐渐受到关注,通过在输电线路附近设置等离子体发生器,可在雷击发生时主动引导雷电通道,改变雷电落雷点,使线路避开直击雷威胁。该技术利用等离子体的高导电性,在空间形成低阻抗通道,将雷电流安全导入大地,减少对线路的冲击。超导技术同样具备潜在应用价值。超导材料在临界温度以下电阻为零,若能应用于输电线路防雷装置,可极大降低雷电流通过时的能量损耗,提高泄流效率。尽管目前超导材料的应用受限于低温环境要求,但随着高温超导材料研究的突破,未来有望开发出适用于输电线路的超导防雷设备。仿生学技术也为防雷设计提供新思路,借鉴自然界中某些生物对雷电的适应机制,研发新型防雷结构或材料,进一步提升输电线路的防雷能力。

结束语

输电线路防雷是一项系统性工程,涉及设计、施工、运维等多个环节。优化接地系统、合理配置避雷器、完善架空地线布局可有效提升线路抗雷能力。日常运维中加强巡检与状态评估有助于及时发现并处理隐患。新材料和智能化技术的应用将推动防雷技术向高效、智能方向发展,为输电线路的安全运行提供更强保障。

参考文献

- [1]段成龙.基于接地保护技术的110kV架空输电线路防雷设计策略分析[J].电工技术,2023,(S1):102-104.
- [2]姬磊.输电线路设计中线路防雷技术的运用[J].城市建设理论研究(电子版),2023,(11):7-9.
- [3]韩昌强,何璇,仇国滔.输电线路设计中线路防雷技术的运用[J].电子测试,2021,(16):90-91+110.
- [4]牟渊.防雷技术在输电线路设计中的应用探讨[J].光源与照明,2022(08):183-185.