

输电线路设计中线路防雷技术的运用

张栋林

国网甘肃省电力公司平凉供电公司 甘肃 平凉 744000

摘要: 输电线路长期暴露在户外环境, 极易受直击雷、感应雷侵扰, 引发线路闪络、跳闸甚至设备损毁, 严重威胁电网供电稳定性。本文阐述输电线路雷击故障机理与防雷核心原理, 分析避雷线、避雷器、接地装置、外绝缘配合等核心防雷技术的设计要点与应用方式。结合山区、高海拔、老旧线路等复杂工况, 提出差异化防雷优化方案, 并展望智能监测、多技术融合防雷体系的发展趋势, 为线路防雷设计与运维提供参考。

关键词: 输电线路设计; 线路防雷技术; 运用

引言: 电力输电线路是电网能源输送的核心载体, 线路覆盖范围广、敷设环境复杂, 雷击是诱发线路故障、造成供电中断的主要自然因素。不同类型雷击产生的过电压会破坏线路绝缘结构, 各类复杂地形与气候工况进一步加剧防雷难度。为提升输电线路耐雷水平, 降低雷击跳闸率, 保障电网安全稳定运行。本文系统探究输电线路防雷基础理论与关键技术, 针对性优化复杂场景防雷方案, 助力电力线路防雷体系提质增效。

1 输电线路雷击机理与防雷基础理论

1.1 输电线路雷击类型及故障机理

(1) 直击雷危害机理主要分为杆塔反击与线路绕击两类。杆塔反击是雷电直击杆塔或避雷线后, 雷电流沿杆塔泄入大地, 使杆塔电位急剧升高, 造成杆塔与导线间形成高电位差, 击穿空气绝缘间隙, 引发闪络故障。线路绕击是雷电避开避雷线屏蔽范围, 直接击中输电导线, 瞬间产生超高电压, 超出线路绝缘耐受能力, 诱发绝缘闪络跳闸。(2) 感应雷危害机理由雷电电磁感应效应产生。当雷云在线路附近对地放电时, 空间会形成强交变电磁场, 使架空输电导线产生电磁感应效应。导线两端会感应出瞬时过电压, 该过电压幅值虽低于直击雷, 但覆盖范围广, 易造成线路绝缘薄弱部位击穿, 引发间歇性故障。(3) 两类雷击故障特征与危害差异显著。直击雷电压幅值高、能量大, 多造成永久性闪络、线路跳闸甚至设备损坏, 危害程度极高; 感应雷过电压幅值较小、作用范围大, 多引发瞬时性闪络, 故障恢复快, 但易造成线路频繁误跳闸, 影响供电稳定性^[1]。

1.2 输电线路防雷核心原理

(1) 雷电屏蔽原理依托避雷线实现, 通过在输电线路上方架设避雷线, 构建防护屏蔽区域, 拦截直击雷, 避免雷电直接击中导线, 从源头降低线路直击雷故障概

率。(2) 过电压抑制原理以避雷器为核心, 当线路出现雷电过电压时, 避雷器迅速导通, 钳位线路电压, 将过电压控制在绝缘耐受范围内, 过电压消失后自动恢复绝缘状态, 有效保护线路设备。(3) 雷电泄放原理依靠接地装置实现, 可将杆塔、避雷线、避雷器引导的雷电流快速散入大地, 降低杆塔电位抬升幅度, 避免电位过高引发反击闪络, 完成雷电能量的安全释放。

1.3 输电线路防雷性能评价指标

(1) 雷击跳闸率、耐雷水平是核心评价参数。雷击跳闸率反映线路年度雷击故障跳闸频次, 直观体现防雷运行效果; 耐雷水平指线路可承受的最大雷电流幅值, 是衡量线路抗雷击能力的核心指标。(2) 接地电阻、保护角为关键设计控制指标。接地电阻决定雷电流散流效率, 电阻越小泄流效果越好; 保护角是避雷线与导线的防护夹角, 角度越小, 线路绕击防护效果越优。(3) 复杂工况综合评估标准, 结合雷雨天气、地形地貌、线路老化程度等工况, 整合跳闸率、绝缘损耗、接地稳定性等参数, 全方位判定复杂环境下线路整体防雷性能。

2 输电线路防雷关键技术及设计运用

2.1 避雷线防雷技术及优化设计

(1) 常规避雷线以镀锌钢绞线为核心结构, 结构简单、机械强度高、造价低廉, 主要依靠金属导电性能实现雷电拦截与泄流, 适用于常规电压等级输电线路。OPGW光缆避雷线为光纤复合架空地线, 集成了通信光纤与避雷线双重结构, 在具备传统避雷线防雷、承载功能的基础上, 可实现电力通信数据传输。相较于普通避雷线, 其一体化结构可减少线路架设耗材, 抗腐蚀性性能更强, 且能同步满足线路防雷与智能运维通信需求, 是现阶段高压、超高压线路的主流配置。(2) 避雷线保护角是线路防雷设计的核心参数, 需根据线路电压等级差异化优化设计。低压与110kV常规线路可采用 $15^{\circ} \sim 25^{\circ}$ 较

大保护角,平衡建设成本与防护效果;220kV及以上高压线路需缩小保护角至 10° 以内,超高压特高压线路甚至采用负保护角,最大限度规避绕击故障。设计过程中需结合线路档距、杆塔高度、地形条件精准核算,通过调整避雷线架设高度与间距,适配不同电压等级线路的耐雷标准^[2]。(3)避雷线架设工艺直接决定线路屏蔽效果。施工中需严格把控架设张力,避免避雷线弛度不均、偏移错位等问题,保证全线屏蔽区域连续完整。同时可采用双避雷线架设方式,扩大线路横向屏蔽范围,针对山区、风口等易雷击区域,优化避雷线固定工艺,加装加固配件,杜绝避雷线晃动导致的屏蔽失效,全面提升线路整体防雷屏蔽性能。

2.2 避雷器防雷技术运用

(1)金属氧化物避雷器(MOA)核心元件为氧化锌电阻片,具备优异的非线性伏安特性。正常工频电压下电阻值极大,处于绝缘状态,不影响线路正常运行;当线路遭遇雷电过电压时,电阻值瞬间骤降,快速导通泄放雷电能量,钳制线路过电压幅值。其相较于传统碳化硅避雷器,无间隙、响应速度快、通流容量大、老化速率低,可有效抑制雷电冲击过电压,大幅降低线路闪络跳闸概率。(2)线路避雷器选型需依据线路电压等级、雷电活动强度、绝缘水平精准匹配,优先选用适配工频续流、耐冲击性能强的型号。安装位置遵循差异化设计规范,普通平原线路重点安装于杆塔三相导线位置,均衡各相防雷能力;雷击高发区段需逐塔配置,常规区段可采用隔塔安装模式。安装时严格把控固定间距、绝缘配合距离,避免安装偏差引发的绝缘隐患^[3]。(3)山区、高海拔线路空气密度低、绝缘强度下降、雷电活动频繁,常规避雷器适配性较差。针对该复杂工况,需选用高海拔专用抗老化、大通流容量避雷器,优化安装间距,增加薄弱杆塔避雷器配置数量。同时结合山区地形遮挡、雷电绕击多发特点,调整安装角度,配合避雷线形成协同防护体系,解决复杂环境下线路过电压防护不足的问题。

2.3 接地装置防雷优化技术

(1)输电线路常规杆塔接地装置以水平接地体为主、垂直接地极为辅,主要包括环形接地、放射形接地、方框形接地等结构。平原地区多采用方框形与放射形接地结构,施工便捷、散流均匀;普通丘陵线路采用环形接地装置,可适配简单地形,满足常规雷电流散流需求,是输电线路最基础、应用最广泛的接地形式。

(2)高土壤电阻率地区土壤导电性能差,常规接地装置难以达标,需采用专项降阻改造技术。常用方式包括

换土降阻,更换接地区域低电阻率改良土壤;敷设降阻剂,在接地体周边包裹导电降阻材料,降低接触电阻;同时可采用外延接地、深井接地技术,深入地下低阻土层,有效降低杆塔接地电阻,提升雷电流散流效率。

(3)接地装置长期埋于地下,易发生腐蚀、断裂,影响长效运行。优化设计可采用热镀锌、防腐涂层等防腐工艺,提升接地体抗腐蚀能力;定期对接地装置开挖检测、除锈补漆,修复破损部位。同时优化接地体敷设工艺,避免接头锈蚀松动,提升接地系统稳定性,保障长期稳定的泄流防雷性能^[4]。

2.4 外绝缘配合防雷技术

(1)线路绝缘子选型需遵循绝缘匹配、工况适配、稳定耐用的原则,结合线路电压等级、运行环境、雷电参数配置绝缘类型。高压线路优先选用盘形悬式绝缘子、复合绝缘子,兼顾绝缘性能与机械强度;常规工况选用瓷、玻璃绝缘子,污秽、潮湿工况选用耐污复合绝缘子,保证线路基础绝缘水平适配防雷需求。(2)增加绝缘子片数是提升线路耐雷水平的简易有效手段。通过增加绝缘子串片数,可有效延长绝缘闪络距离,提升线路工频耐压与雷电冲击耐压水平,降低雷击闪络概率。针对雷击高发区段,可在标准配置基础上增设1~2片绝缘子,适配区域雷电强度,精准提升线路耐雷性能,适配高频雷击工况。(3)污秽环境下绝缘子表面易沉积粉尘、盐碱,受潮后会形成导电膜,大幅降低绝缘性能,诱发雷击闪络。优化策略主要包括选用耐污型绝缘子,提升本体抗污能力;定期开展绝缘子清扫、冲洗作业,清除表面污秽;同时优化外绝缘爬电距离配置,增大爬电比距,抑制污秽闪络与雷电过电压叠加引发的线路故障。

3 复杂工况下输电线路设计中线路防雷技术优化与工程应用展望

3.1 输电线路防雷效果主要影响因素

(1)地形气候是影响线路防雷效果的外部核心因素。山区、丘陵区域地形起伏大,杆塔多坐落于山顶、山脊凸起位置,对地高度高,雷电引雷效应显著,绕击、反击故障频发。同时山区气流复杂、云雾多、空气湿度大,绝缘间隙耐压强度降低,易诱发雷击闪络。雷雨多发区年雷暴日数高,雷电能量大、落雷密度大,常规防雷配置难以适配高频雷击工况,整体防雷压力远高于平原常规线路。(2)线路自身结构参数直接决定基础耐雷性能。杆塔高度越高,引雷范围越大,雷击概率显著提升,同时会增大杆塔电位抬升幅度,极易引发反击闪络。线路排布方式影响屏蔽效果,多回路并行线路存在电磁耦合干扰,屏蔽防护易出现盲区。此外,不同电

压等级线路绝缘配置、耐雷标准差异较大,高压线路绝缘跨度大,虽耐雷水平更高,但雷击故障造成的停电损失与设备损坏程度更为严重。(3)运维管理是保障防雷系统长效运行的关键因素。线路长期运行过程中,避雷线、避雷器等防雷设备会出现老化、性能衰减问题,导致过电压抑制、雷电拦截能力下降。同时,接地装置长期受土壤腐蚀、地质沉降影响,易出现接地电阻增大、接地体断裂失效等问题,雷电流无法有效泄放,形成严重防雷隐患,大幅提升线路雷击跳闸风险。

3.2 典型复杂场景防雷技术优化方案

(1)山区输电线路需采用综合防雷优化设计方案。针对山顶、山脊易雷击杆塔,优化避雷线保护角,采用小保护角或负保护角设计,规避绕击故障。对高杆塔增设线路避雷器,补强过电压抑制能力。同时改造接地系统,采用深井接地、外延接地结合降阻剂的方式,解决山区土壤电阻率不均、散流困难的问题,构建屏蔽、泄流、稳压一体化防雷体系。(2)高海拔、强雷雨地区需采用多技术组合防雷策略。高海拔地区空气稀薄,绝缘强度下降,需适当增加绝缘子片数,提升外绝缘耐雷水平。强雷雨区域落雷密集,可全域布设高性能大通流容量避雷器,配合双避雷线强化屏蔽效果。结合区域雷暴监测数据,差异化优化杆塔接地电阻标准,严控接地阻值,实现多级防护叠加,适配极端雷雨工况。(3)老旧输电线路需实施针对性防雷改造。老旧线路普遍存在绝缘老化、接地锈蚀、防雷设备失效等问题,改造中优先更换老化破损绝缘子,优化外绝缘配置。替换性能衰减的避雷器与锈蚀接地体,重新规整接地布局,降低接地电阻。同时优化避雷线架设结构,修复屏蔽缺陷,补齐老旧线路防雷短板,提升整体运行稳定性^[5]。

3.3 输电线路智能防雷新技术发展应用

(1)雷电在线监测与预警技术已广泛应用于输电线路运维。该技术依托分布式监测终端,实时采集线路雷击次数、过电压幅值、杆塔电位等数据,精准捕捉雷击故障信息。结合大数据分析实现雷电活动预判与故障定位,可提前排查高危区段隐患,改变传统被动运维模

式,大幅提升线路雷击故障应急处置效率。(2)智能防雷设备具备自适应、自监测、可预警的技术优势,相较于传统防雷设备,可实时监测自身运行状态、温湿度、通流损耗,及时反馈老化、故障隐患。设备具备自适应稳压、智能泄流功能,可根据雷电能量自动调节工作状态,适配复杂工况。其工程推广价值极高,可有效降低运维成本,减少雷击跳闸率,适配智能电网建设发展需求。(3)多技术融合综合防雷体系是未来线路防雷的核心发展方向。通过融合雷电监测技术、智能防雷设备、大数据分析、远程运维技术,整合屏蔽防护、过电压抑制、智能监测、故障预警等功能,打破单一防雷技术的局限性。构建全天候、全时段的主动式综合防雷体系,实现复杂工况下输电线路防雷的精准防护、智能运维与长效稳定运行。

结束语

综上,输电线路防雷是电网设计与运维的关键工作,需依托屏蔽防护、过电压抑制、雷电流泄放、外绝缘适配的综合体系开展建设。常规防雷技术可满足基础防护需求,而复杂工况需采用差异化、组合式防雷优化方案。随着智能电网发展,雷电监测预警、智能防雷设备的应用愈发重要。未来需持续推进多技术融合,构建主动式智能防雷体系,全面提升输电线路抗雷击能力与长效运行稳定性。

参考文献

- [1]蔡德.输电线路设计中线路防雷技术的运用[J].新型工业化,2022,12(9):128-131.
- [2]周文钧.输电线路设计中线路防雷技术的运用[J].设备管理与维修,2021,9(16):102-105.
- [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,2021,20(16):90-96.
- [4]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,2023,15(9):71-74.
- [5]吴艾.输电线路防雷要点及运维管控措施[J].电力系统装备,2021,6(19):87-89.