

架空输电线路防雷设计

毛文泽 李 博

内蒙古电力（集团）有限责任公司呼和浩特供电分公司 内蒙古 呼和浩特 010000

摘 要：雷电侵害是造成架空输电线路故障、影响电网稳定运行的核心诱因，各类雷击形式会通过电位骤升、感应过电压等方式破坏线路绝缘结构。本文系统剖析输电线路雷击作用机理与防雷设计核心影响因素，搭建层级化、差异化的线路防雷防护体系，针对性完成地线、绝缘子、接地装置及辅助防雷器件的结构设计，同时结合地形、气象等外部条件优化防雷方案，完善多结构协同防护模式，有效提升复杂工况下输电线路的雷电抵御能力与运行稳定性。

关键词：架空输电线路；雷击机理；防雷结构；防护体系；设计优化

引言：架空输电线路长期露天布设，覆盖范围广、架设高度大，极易受大气雷电活动干扰，雷电引发的闪络、设备损伤及供电故障问题频发，严重制约高压输电系统的安全稳定运行。自然地形、气象环境与线路自身结构参数的差异化，让线路雷击风险呈现区域化、场景化特征，传统单一防雷模式难以适配复杂运行工况。依托雷电放电规律与线路运行电气特性，开展系统化、精细化的防雷设计与优化，是提升输电线路抗雷击能力、筑牢电网运行安全屏障的关键举措。

1 输电线路雷击作用机理与防雷设计基础分析

1.1 架空输电线路结构与运行电气特性

架空输电线路由杆塔、导线、避雷线、绝缘子及接地装置等部件组成，各部件协同构成户外高压电能传输载体。导线承担电能输送功能，长期处于高压带电运行状态，裸露的架设方式使其直接暴露于大气环境中。绝缘子实现导线与杆塔本体的电气隔离，阻断高压电荷向塔身传导路径。杆塔作为支撑结构，维持线路架设高度与整体空间布局。线路整体具备长距离露天布设的特点，空间覆盖范围广，架设高度跨度大^[1]。运行过程中，线路保持稳定的电场分布，周边空气介质会形成固定的绝缘缓冲层。大气环境变化会改变线路周边电场分布状态，间接影响电气运行稳定性。

1.2 雷电放电基本形式与线路雷击作用类型

雷电放电起源于云层电荷累积产生的强电场，电场强度突破空气绝缘阈值后会形成击穿放电现象。大气雷电放电包含云间放电、云内放电、地闪放电多种形式，能够作用于输电线路的主要为地闪放电。地闪放电会形成定向电荷传导通道，对地释放高强度脉冲电能。依据放电落点差异，线路雷击作用可分为导线直接雷击、杆塔雷击、避雷线雷击等形式。不同雷击形式的电荷注入位置不同，对线路结构的作用方式存在明显区别。脉冲

电能的传导路径、作用范围均会随雷击落点发生改变，形成差异化的电气作用形式。

1.3 雷电对输电线路的侵害作用机制

雷电脉冲携带极高电压与瞬时能量，击中线路构件后会快速抬升构件电位。塔身或导线电位骤升会击穿绝缘子的绝缘耐受能力，引发绝缘闪络现象。闪络会形成临时导电通道，造成高压线路对地导通，破坏正常运行工况。雷电脉冲传播过程中会在线路周边产生瞬变电磁场，电磁场变化会在导线内部感应出额外过电压。感应过电压会叠加线路运行电压，进一步增大绝缘承压负荷。持续的电气冲击会损伤绝缘子表层结构，弱化绝缘介质耐受性能，埋下长期运行隐患。

1.4 输电线路防雷设计的基础影响因素

线路架设区域的大气环境会改变空气绝缘性能，间接影响雷电击穿与放电概率。杆塔高度、导线排布方式、绝缘配置等级，决定线路自身的雷电耐受能力。土壤电阻率制约接地装置的电荷泄放效率，干扰雷电能量的疏导过程。空间地形的起伏变化改变局部电场分布，造成区域雷电活动强度出现差异。线路自身结构参数、外部环境条件共同构成防雷设计的基础约束条件，左右各类防雷结构的布设形式与参数选取。

2 架空输电线路防雷设计体系构建

2.1 防雷设计的基本原则与设计思路

架空输电线路防雷设计需要依托线路运行特征与雷电作用规律开展搭建。设计工作优先保障输电系统运行稳定，规避雷电能量冲击引发的绝缘损坏与供电异常。设计工作兼顾结构适配性与运行实用性，依托线路原有架构完成防雷设施布设，减少多余结构改动带来的运维负担^[2]。围绕雷电能量导入、疏导、泄放的完整过程确立设计逻辑，针对雷电直击、感应过电压等不同电气危害制定对应设计逻辑。结合线路绝缘耐受水平、场地环境

条件、结构布置特征,确立分层防护、分级抵御的设计思维,为整体防雷架构搭建提供理论支撑。

2.2 线路整体防雷架构设计规划

输电线路整体防雷架构围绕线路全结构防护需求搭建,覆盖导线、杆塔、绝缘部件、接地系统全部核心构件。依托雷电侵入线路的不同路径,划分外部防护、中间隔离、末端泄放的层级化架构。外部层级依托避雷构件拦截雷电电荷,阻断雷电直接作用于导线主体。中间层级依靠绝缘结构隔离异常电压,抑制过电压对线路设备的损伤。末端层级通过接地结构疏导残余雷电能量,弱化雷电滞留电荷带来的持续电气影响。

2.3 差异化防雷设计方案适配设计

不同架设环境与线路结构的雷电危害形式存在区别,统一的防雷模式无法适配全部线路场景。针对高地势、空旷地带、植被密集区域的线路环境差异,调整防雷设施的布置密度与结构参数。依据杆塔高度、导线电压等级、绝缘配置规格的不同,更改防护层级的配置标准。针对直击雷电与感应过电压的不同破坏特征,匹配针对性的防护结构与设计参数。通过个性化方案调整,弱化单一防雷设计模式的局限性。

2.4 多维度防雷设计技术路径整合

单一防雷技术手段仅能应对局部雷电侵害形式,无法覆盖线路全部防雷短板。整合避雷布设、绝缘优化、接地改造等多项防雷技术手段,搭建多角度的防护技术体系。梳理各类防雷技术的作用原理与防护侧重,理顺不同技术手段的应用顺序与布设逻辑。统筹结构改造、参数调整、布局优化的技术路径,填补单一防护技术存在的防护盲区。规范各类防雷技术的适配场景,实现不同技术手段的互补搭配,筑牢输电线路的雷电防护基础。

3 输电线路关键防雷结构与装置设计

3.1 架空地线防雷结构设计研究

架空地线作为输电线路直面雷电直击的核心防护结构,布置于导线上方区域,依靠物理遮蔽屏障削弱雷电放电对输电导线的冲击作用。地线架设高度、杆塔悬挂点位、跨中架设弧度、线间排布间距等参数,能够直接改变空间遮蔽范围,干预雷电放电的落点分布^[1]。结合高压输电线路的导线排布形式、杆塔跨距大小与线路走向特征,针对性调整地线空间布设参数,提升全域遮蔽水平。地线本体的材质选型、导线截面规格决定电荷传导效率,优良的导电材质可以加速雷电电荷的轴向传输,减少电荷堆积引发的电位抬升。针对长距离架空线路易出现的结构形变问题,优化地线金具连接方式与接续结构,提升整体结构稳固度。结合线路空间电场畸变特征

调整架设高差,降低雷电绕击导线的发生概率,夯实基础防雷能力。

3.2 线路绝缘子防雷适配设计

绝缘子是保障输电线路电气隔离的核心构件,耐受雷电冲击的能力直接决定线路防雷水平。不同材质的绝缘子具备差异化的闪络耐受阈值、电弧抵御能力与户外环境适应能力,各类材质的性能优势与适用场景存在明显区分。结合输电线路运行电压等级、户外复杂气象条件,筛选适配性更强的绝缘子品类。通过调整绝缘子串的片数、组装方式与排列结构,提升整体绝缘耐受上限,抵御雷电过电压引发的击穿闪络问题。雷电冲击作用下,绝缘子串各部位电压分布存在不均现象,合理优化串体结构排布,可均衡单体绝缘子的承压负荷,规避局部过压损坏。配套专用绝缘防护配件,削弱雷电电弧灼烧、风雨侵蚀带来的结构损伤,延长绝缘构件服役周期。

3.3 防雷接地装置结构设计

防雷接地装置承担雷电能量疏导泄放的核心职能,可将线路杆塔承接的雷电能量快速导入地层内部。接地体的布设形态、埋深尺度、平面延展范围,都会对雷电散流效率产生直接影响。结合线路架设区域的土壤质地、土层结构与电阻率分布特征,灵活设计放射型、环形或复合式接地结构。优选高导电性能的接地材质,搭配合理的截面规格,降低雷电电荷传输过程中的阻抗阻力。规范接地体埋设施工工艺,压实周边回填土层,强化接地体与土壤的接触紧密性,削减接触电阻带来的散流阻碍。针对土层电阻率分层不均的区域,适度拓展接地体延展长度,保障雷电能量快速向深层土壤扩散,规避电荷滞留堆积。

3.4 辅助防雷器件的选型与结构设计

基础防雷结构存在一定防护盲区,辅助防雷器件可针对性弥补防护短板,完善线路防雷体系。常用辅助防雷器件涵盖线路避雷器、固定防雷间隙、电场均压环等关键构件,各类器件的防护原理与作用场景各有侧重。结合线路电压等级、区域雷电活动强度、杆塔结构特征,科学筛选适配的器件规格型号。优化避雷器的安装位置与固定结构,缩短过电压响应路径,强化对异常电压的抑制效果。精准设定防雷间隙的几何间距,匹配线路绝缘耐受标准,杜绝间隙误击穿或失效问题。优化均压环的外形尺寸与装配位置,改善杆塔端部、导线端头的电场集中现象,缓解局部电场畸变程度,减少雷电感应诱发的过电压故障。

4 防雷设计优化与适配性完善

4.1 线路地形环境下防雷设计优化

输电线路架设路径涵盖多种地形地貌,山地、丘陵、平原、沟壑等地貌形态会改变局部空间电场分布,改变雷电放电的活动规律。高地凸起地形会强化空间电场畸变程度,提升雷电放电频次,低洼封闭地形易积聚潮湿空气,降低空气绝缘强度^[4]。针对不同地形的电气环境特征,对现有防雷布设参数进行针对性优化。调整高地杆塔的接地结构延展规模,强化雷电能量泄放效率。优化山地区段地线遮蔽角度与布设密度,减少绕击问题发生。改造低洼区域线路的绝缘配置规格,提升潮湿环境下的绝缘耐受能力。根据地形起伏特征调整防雷器件安装布局,消除特殊地形带来的防护薄弱区域。

4.2 气象条件适配的防雷设计调整

大气气象要素的动态变化会持续影响输电线路防雷性能,温湿度变化、阴雨天气、风沙覆尘都会改变线路外部绝缘环境。高湿环境会降低空气击穿阈值,提升闪络发生概率。沙尘、雾霭会在绝缘子表层形成附着层,破坏绝缘表面均匀性,诱发局部放电问题。结合各类气象工况对线路防雷体系的影响规律,调整防雷结构适配参数。优化绝缘子表层防护配置,提升污秽、潮湿环境下的绝缘稳定性。调整接地装置埋设深度,规避低温冻土、雨季土壤含水率变化带来的电阻波动。根据区域气象特征调整防雷器件的耐受参数,增强防雷结构对复杂气象环境的耐受能力。

4.3 输电线路防雷结构协同性优化

架空地线、绝缘构件、接地装置与辅助防雷器件各司其职,单一结构参数偏差会影响整体防雷体系的运行效果。部分防雷结构参数单独满足设计标准,但组合布设后会出现防护衔接断层、防护能力不均衡的问题。梳理各防雷结构的作用区间与防护范围,排查结构搭配中存在的防护盲区。调整地线遮蔽范围与避雷器防护区间,实现防护区域的有效衔接。匹配接地散流速率与绝缘闪络耐受参数,规避能量泄放速度不匹配引发的设备损伤。优化各防雷构件的参数配比与布设间距,强化多

类防雷结构的互补能力,提升整体防护均衡度。

4.4 防雷设计方案的通用性完善

现有防雷设计多针对特定线路工况制定,参数适配范围狭窄,难以适配不同电压等级、不同架设场景的输电线路。部分设计方案对环境变化、线路结构改动的包容度较低,适用场景存在明显局限。梳理不同类型输电线路的防雷设计共性需求,统一基础防雷布设标准与参数选取依据。拓宽防雷结构参数的适配区间,弱化工况差异对防护效果的影响。规整不同场景下的防雷设计流程,统一器件选型、结构布设、参数校准的执行标准^[5]。完善防雷设计的适配逻辑,提升设计方案对各类输电线路工况的兼容能力,形成适用性更广的防雷设计体系。

结束语

输电线路防雷防护是一项多维度、系统性的工程,需要统筹线路结构、自然环境、防护装置等多重要素。通过梳理雷击侵害机制,构建分层分级的防雷体系,优化各类核心防雷结构与辅助器件的布设参数,针对性适配不同地形与气象工况,可有效弥补单一防护技术的短板。多结构协同优化与通用化设计的完善,能够均衡线路全域防护能力,减少雷电引发的输电故障,为架空输电线路安全、长效、稳定运行提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]陈耿宾.架空输电线路防雷设计探析[J].通信电源技术,2023,40(3):71-73.
- [2]张越.基于电网防雷技术的架空输电线路设计[J].光源与照明,2026(1):230-232.
- [3]蒋鹏,文勇.架空输电线路防雷与接地协同优化设计路径研究[J].通信电源技术,2026,43(3):100-102.
- [4]张小玉,王宇墨.电网防雷技术在架空输电线路设计中的应用[J].光源与照明,2025(9):206-208.
- [5]倪仁鑫.架空输电线路防雷与接地的设计分析[J].电力设备管理,2022(17):56-58.