

# 探析输电线路设计中线路防雷技术的运用

郭超 柴渊恒

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:** 输电线路作为电网核心构成,其防雷设计对保障电力供应稳定性至关重要。雷电通过直击雷过电压、感应雷过电压及雷电波侵入三种形式威胁线路安全,可能引发绝缘子闪络、导线熔断甚至变电站设备损毁。线路防雷技术通过架设避雷线、优化接地电阻、加装避雷器、设置耦合地线及屏蔽装置等综合措施,有效拦截、疏导并削弱雷电能量,实现从源头防护到末端抑制的全链条雷电风险管控。

**关键词:** 输电线路设计;线路防雷技术;运用

引言:输电线路是电力系统的“动脉”,其安全稳定运行直接关系到社会经济发展与民生保障。然而,雷电活动作为自然界的强干扰源,易通过直击雷、感应雷及雷电波侵入等形式对线路造成过电压冲击,引发绝缘子闪络、设备损毁甚至大面积停电事故。因此,科学运用线路防雷技术,构建“拦截-疏导-屏蔽”协同防护体系,成为提升输电线路耐雷水平、降低雷击故障率的关键,对保障电网安全具有重要意义。

## 1 雷电对输电线路的危害机理与防雷技术原理

### 1.1 雷电危害的主要形式

(1) 直击雷过电压:当雷电直接击中输电线路导线或杆塔时,会瞬间产生极高的过电压。此过电压远超线路绝缘子的耐受水平,极易引发绝缘子闪络,导致线路短路跳闸;同时,强大的雷电流会使导线局部温度急剧升高,若电流超过导线耐受极限,将造成导线熔断,中断电力传输。(2) 感应雷过电压:雷电放电过程中会产生强烈的变化电磁场,该磁场会在输电线路导线上感应出高电压,即感应雷过电压。这种过电压虽幅值通常低于直击雷过电压,但仍会对线路上的变压器、互感器等电气设备造成损害,影响设备正常功能,甚至引发设备故障。(3) 雷电波侵入:雷电击中线路或附近物体后,会生成沿线路传播的雷电波。当雷电波侵入变电站时,会对变电站内的开关设备、电容器等精密设备产生冲击,若设备绝缘性能不足,将导致设备绝缘击穿,造成重大设备损坏和停电事故。

### 1.2 防雷技术核心原理

(1) 拦截技术:通过在输电线路上方架设避雷线,以及在变电站等关键场所安装避雷器,实现对雷电的主动拦截。避雷线可将大部分雷电引向自身,避免雷电直接击中导线;避雷器则能在雷电波侵入时迅速动作,限制过电压幅值,保护设备绝缘。(2) 疏导技术:接地装

置是疏导雷电流的关键设施,包括杆塔接地、设备接地等。当避雷线或避雷器拦截到雷电流后,接地装置能将雷电流安全、快速地导入大地,防止雷电流在设备或线路上积聚,降低过电压危害。(3) 屏蔽技术:采用金属屏蔽层包裹电缆、在设备周围设置屏蔽网等方式,构建电磁屏蔽屏障。该技术可有效阻挡雷电产生的变化电磁场,降低电磁感应强度,减少感应雷过电压对线路和设备的影响<sup>[1]</sup>。

### 1.3 雷电参数对防雷设计的影响

(1) 雷电流幅值、波形、陡度与绝缘配合的关系:雷电流幅值越大,产生的过电压越高,对线路绝缘的要求也越高;雷电流波形(如波前时间、半峰值时间)会影响过电压的上升速度和持续时间,波前越陡,过电压上升越快,设备绝缘面临的冲击越大。在防雷设计中,需根据当地雷电流的幅值、波形和陡度等参数,合理选择绝缘子类型、数量以及避雷器的额定电压等,确保绝缘配合满足防雷要求。(2) 地面落雷密度与线路耐雷水平的关联性:地面落雷密度指单位面积、单位时间内的落雷次数,其值越大,线路遭受雷击的概率越高。线路耐雷水平是衡量线路抵御雷击能力的指标,耐雷水平越高,线路在雷击时跳闸的概率越低。设计时需结合线路途经区域的地面落雷密度,通过优化避雷线保护角、改善接地电阻等措施,提高线路耐雷水平,使线路防雷能力与当地雷电活动强度相匹配。

## 2 输电线路设计中线路防雷关键技术

### 2.1 路径选择与地形优化

(1) 避开雷暴高发区:雷暴高发区因雷电活动频繁,线路遭受雷击的风险显著升高。设计时需结合当地气象数据与雷电活动规律,优先避开山顶、山脊、河流交汇处、空旷高地等区域—山顶与山脊易成为雷电放电的“靶点”,河流交汇处因水汽充足、电场强度易集

中,均会增加线路被雷击的可能性,避开这些区域可直接减少雷击事件发生频次。(2)利用地形屏蔽效应:山谷、森林覆盖区域等具有天然的地形屏蔽优势。山谷两侧的山体可阻挡部分雷电,减少雷电直接击中线路的概率;茂密的森林能削弱雷电能量,同时其高大树木可作为“自然避雷体”,间接保护线路免受雷击。设计中可优先选择此类地形敷设线路,借助自然环境提升线路防雷基础能力。

## 2.2 杆塔结构与绝缘配置

(1)杆塔高度与呼称高的优化:杆塔高度过高会增加雷电绕击的概率—雷电易绕过避雷线直接击中导线。设计时需根据线路电压等级与当地雷暴强度,合理控制杆塔高度;同时优化呼称高(导线悬挂点至地面的高度),避免因呼称高过高导致导线暴露范围扩大,通过降低杆塔整体“暴露度”减少绕击风险。(2)绝缘子串型选择:不同串型绝缘子的防雷与耐污性能差异显著。复合绝缘子具有重量轻、耐老化、抗雷击闪络能力强的特点,适合雷暴频发区域;防污型绝缘子则能在潮湿、多污染环境减少表面闪络,避免因绝缘子绝缘性能下降导致雷击后跳闸,需根据线路途经区域的环境特点选择适配串型<sup>[2]</sup>。(3)绝缘子片数与耐雷水平的匹配计算:绝缘子片数直接影响线路的绝缘强度,片数不足会导致雷电过电压击穿绝缘子。设计中需根据当地雷电流幅值、线路额定电压,通过公式计算确定最小绝缘子片数,确保绝缘子串的耐受电压高于雷电过电压峰值,实现绝缘子片数与线路耐雷水平的精准匹配。

## 2.3 接地系统设计

(1)接地电阻的降低方法:接地电阻过高会导致雷电流泄放受阻,引发杆塔电位升高,进而造成绝缘子闪络。实际设计中可采用多种降阻手段:在土壤电阻率较高区域添加降阻剂,改善土壤导电性能;采用深井接地技术,将接地极深入地下低电阻率土层;应用模块化接地装置,通过多极并联增大接地面积,从多角度降低接地电阻至设计标准值以下。(2)接地网布局优化:合理的接地网布局可提升雷电流泄放效率。水平放射式接地网通过多根水平接地极向四周辐射,适合面积开阔区域,能快速分散雷电流;环形接地网则围绕杆塔形成闭合回路,可均衡杆塔各点电位,避免局部电位过高,需根据杆塔所处地形与土壤条件选择最优布局形式。(3)土壤电阻率测试与接地材料选择:土壤电阻率是接地设计的基础参数,需通过现场测试获取准确数据,为接地电阻计算与降阻方案制定提供依据。接地材料需兼顾导电性与耐腐蚀性:铜包钢材料导电性能优异、耐锈蚀,

适合潮湿或腐蚀性环境;镀锌钢成本较低、机械强度高,适用于一般干燥区域,确保接地材料性能与土壤环境适配,延长接地系统使用寿命<sup>[3]</sup>。

## 2.4 避雷装置的应用

(1)避雷线的保护角设计:避雷线的保护角(避雷线与导线之间的夹角)直接影响保护范围,保护角过大易出现保护盲区,导致导线被绕击。设计中一般要求保护角不大于 $25^{\circ}$ ,对于500kV及以上高压线路,保护角需控制在 $15^{\circ}$ 以内,通过缩小保护角确保避雷线能全面覆盖导线,阻挡雷电直接击中导线。(2)避雷器的安装位置与类型选择:避雷器需安装在雷电波易侵入的关键节点,如线路分段处、变电站入口处,可有效限制雷电波幅值。类型选择需结合场景:线路型避雷器适合安装在输电线路杆塔上,用于保护绝缘子与导线;电站型避雷器则用于变电站内,保护变压器、开关等核心设备,实现不同场景下的精准防雷保护。(3)耦合地线与负保护角技术:耦合地线平行敷设于导线下方,可通过与导线的电容耦合作用,降低导线感应过电压,同时能分流部分雷电流,增强防雷效果;负保护角技术(避雷线位于导线下方,保护角为负值)则适用于高杆塔线路,可进一步扩大避雷线保护范围,减少绕击概率,尤其适合山区高压线路。

## 2.5 智能监测与预警技术

(1)雷电定位系统:通过部署多站式雷电定位设备,可实时监测线路沿线的落雷位置、雷电流幅值、陡度等参数,形成雷电活动动态地图。运维人员能通过系统快速定位雷击故障点,缩短故障排查时间;同时积累区域雷电数据,为后续线路防雷改造提供数据支撑。(2)动态调整避雷策略:结合气象部门的雷暴预警数据与线路实时监测信息,可动态优化避雷措施。例如,在雷暴来临前,通过远程控制调整线路保护装置参数,增强线路耐受能力;对雷暴高发区段的杆塔接地系统进行实时监测,发现接地电阻异常时及时发出预警,提前采取整改措施,避免雷击引发故障。

## 3 防雷技术在线路设计中的综合应用策略

### 3.1 差异化防雷设计

(1)根据线路电压等级、地理环境划分防雷等级:线路电压等级越高,雷击造成的停电影响范围越广、损失越大,因此需按电压等级梯度提升防雷标准—500kV及以上超高压线路需采用更高耐雷水平的设计,而110kV及以下线路可结合实际需求适当降低防护强度。同时,地理环境是划分防雷等级的关键依据:途经山顶、空旷高地、多雷区的线路划为高防雷等级,需强化防护措施;

位于平原、低雷暴频次区域的线路划为普通防雷等级，可采用基础防雷方案，实现资源的合理分配。（2）高风险区段加强措施：对于已划定的高风险区段，需通过针对性措施提升防雷能力。例如，缩短避雷器安装间距，将常规5km的间距缩小至2-3km，确保雷电波侵入时能快速被抑制；采用深井接地、添加降阻剂等组合手段，将接地电阻从普通区段的 $10\Omega$ 以下进一步降至 $5\Omega$ 以下，加速雷电流泄放；同时可增加避雷线数量，从单避雷线改为双避雷线，扩大保护范围，减少绕击概率，全方位降低高风险区段的雷击故障风险<sup>[4]</sup>。

### 3.2 多技术协同防护

（1）避雷线+避雷器+接地装置的联合应用：三者构成防雷核心协同体系—避雷线作为第一道防线，拦截大部分直击雷，避免雷电直接击中导线；若有少量雷电波突破防线，线路上安装的避雷器会迅速动作，限制过电压幅值，保护绝缘子与设备绝缘；接地装置则作为最后一道保障，将避雷线与避雷器引导的雷电流快速导入大地，防止雷电流积聚产生二次危害。三者协同作用，可覆盖直击雷、感应雷、雷电波侵入等多种危害形式，形成全方位防护。（2）屏蔽环与均压环的配合使用：屏蔽环能阻挡雷电产生的电磁辐射，减少感应雷过电压对线路的影响；均压环则可均衡绝缘子串各片绝缘子的电压分布，避免因局部电压过高导致绝缘子闪络。二者配合使用，既能削弱电磁感应危害，又能优化绝缘性能，减少杆塔与导线间的电位差，进一步提升线路在雷击时的稳定性，尤其适用于高电压等级线路与多雷区段。

### 3.3 经济性与可靠性平衡

（1）防雷措施的全生命周期成本分析：全生命周期成本涵盖防雷措施的初始建设成本、运行维护成本与故障修复成本。例如，复合绝缘子初始成本高于普通瓷绝缘子，但具有更长的使用寿命与更低的维护需求，长期来看全生命周期成本更低；深井接地虽建设成本较高，

但能显著降低接地电阻，减少雷击故障频次，降低后续故障修复成本。设计时需综合测算不同防雷方案的全生命周期成本，优先选择成本效益比更高的方案，避免仅关注初始成本而忽视长期投入。（2）故障率与维修成本的优化模型：通过建立数学模型，量化不同防雷措施下线路的预期故障率与对应维修成本。例如，提升避雷线保护角精度可降低10%的绕击故障率，但需增加5%的建设成本；缩短避雷器间距可降低15%的雷电波侵入故障率，但需增加8%的设备成本。模型通过计算“故障率降低带来的维修成本节约”与“防雷措施新增成本”的差值，找到最优平衡点—当新增成本小于维修成本节约时，该防雷措施具有经济可行性，从而实现线路可靠性与经济性的协同优化。

### 结束语

输电线路防雷技术是保障电网安全运行的核心环节，通过路径优化、杆塔结构改进、接地系统强化、避雷装置精准配置及智能监测预警等综合措施，可显著提升线路耐雷性能。未来，随着新材料、智能传感与大数据分析技术的发展，防雷设计将向精细化、动态化方向演进，实现雷击风险的全生命周期管理。持续创新防雷技术体系，对降低雷害损失、构建高可靠性电网具有重要战略意义。

### 参考文献

- [1]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,(10):90-91.
- [2]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,(09):87-88.
- [3]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):107-109.
- [4]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,(11):128-130.