

输电线路防雷设计与输电线路运维技术

申时其

昭通博源电力勘察设计有限公司 云南 昭通 657000

摘要：输电线路雷击故障频发，严重威胁电力系统安全稳定运行。其故障源于直击雷与感应雷对线路绝缘系统的破坏，受自然环境、线路设计及电气特性等因素综合影响。传统防雷与运维技术存在防护效能局限、运维效率偏低等问题。本文系统分析输电线路雷击故障成因及关键影响因素，详细探讨防雷设计关键技术与运维技术，提出结合智能化手段的优化方向，为提升输电线路防雷水平与运维管理效能、保障电力系统可靠供电提供参考。

关键词：输电线路；防雷设计；运维技术

引言：电力系统中输电线路是能源输送的关键载体，但其暴露于自然环境中易受雷击影响，导致跳闸故障，威胁供电可靠性。随着电网规模扩大与电压等级提升，雷击故障造成的经济损失愈发显著。目前，直击雷与感应雷引发的绝缘闪络是主要故障形式，而雷电活动强度、地形、避雷线配置等因素加剧故障风险。因此，深入研究雷击故障成因及影响因素，研发高效防雷设计与运维技术，成为电力行业亟待解决的问题，对推动电网安全稳定发展具有重要现实意义。

1 输电线路雷击故障成因及影响因素

1.1 输电线路雷击故障成因

输电线路雷击故障主要源于雷电能量对线路绝缘系统的破坏，具体表现为直击雷和感应雷两种形式。直击雷是指雷电直接击中线路的导线、避雷线或杆塔，瞬间产生的巨大雷电流会在击中部位形成极高电位，当电位超过线路绝缘耐受极限时，便会引发绝缘子闪络。闪络发生后，若电弧在工频电压作用下持续燃烧形成稳定工频电弧，将直接导致线路跳闸。感应雷则是雷电击中线路附近地面或物体时，在导线上感应出的过电压波，虽然其能量较直击雷弱，但对于绝缘水平较低的线路仍可能造成绝缘击穿，尤其在雷电活动密集区域，感应雷引发的故障概率显著增加。

1.2 影响雷击故障的关键因素

影响输电线路雷击故障的关键因素可分为自然环境、线路设计及电气特性三类。（1）自然环境方面，雷电活动强度是核心影响因子，雷暴日数多的区域线路遭遇雷击的频次更高。地形条件同样重要，山区因地形起伏加剧雷电活动集中性，且山坡走向会改变导线暴露角度，使绕击风险上升；潮湿盆地、山顶等突出地形易成为雷电击中的目标，进一步增加故障概率。（2）线路设计因素中，避雷线配置直接关系到防直击雷效果，保护

角过大或单避雷线设计会削弱屏蔽作用，导致雷电绕击导线的可能性增加；双避雷线配合小保护角能显著提升屏蔽效能。杆塔接地电阻是影响反击故障的关键，接地电阻过高会使雷电流泄放受阻，杆塔电位骤升，进而对导线形成反击放电。绝缘子串的绝缘水平也至关重要，其长度和类型决定了线路的耐雷水平，绝缘配置不足会降低线路抵御过电压的能力^[1]。（3）电气特性方面，系统中性点接地方式影响建弧率，不同接地方式下，冲击闪络转化为稳定工频电弧的概率存在差异，直接关系到跳闸故障的形成。此外，导线弧垂、塔头间隙尺寸等参数会影响线路的电气间隙，不合理的参数设置可能在雷击时导致间隙击穿，诱发故障。这些因素相互作用，共同决定了输电线路雷击故障的发生概率和严重程度。

2 输电线路防雷设计关键技术

2.1 防雷设计原则

输电线路防雷设计需遵循系统性、适应性与经济性的核心原则，构建多层次防护体系。（1）系统性原则要求从雷电入侵的全路径出发，整合接地、避雷器、绝缘配合等技术手段，形成协同防护机制，避免单一环节薄弱导致整体防护失效。在设计过程中，需综合考虑雷电活动规律、线路电压等级及系统运行特性，确保各防护措施在工频电压、操作过电压及雷电过电压等不同工况下均能发挥有效作用。（2）适应性原则强调防雷方案需与具体环境条件相匹配。不同区域的雷电活动强度、地形地貌及土壤特性存在显著差异，设计时应根据实际情况调整防护策略。例如，雷电活动频繁地区需强化雷电流泄流与过电压抑制能力，高海拔地区需考虑低气压对绝缘强度的影响，污秽地区则需提升设备的防污闪性能。通过因地制宜的设计，可确保防雷系统在复杂环境下的可靠性。（3）经济性原则要求在保障防护效果的前提下，实现全生命周期成本优化。设计过程中需平衡初

期投资与长期运维成本,避免过度设计或防护不足。通过技术经济比较,选择性性价比最优的方案,例如在雷电活动轻微区域可适当简化防护措施,在关键路段则需采用高性能防护设备,以实现资源的合理配置^[2]。

2.2 接地装置优化设计

接地装置是输电线路防雷的基础,其核心功能是快速泄放雷电流,降低杆塔电位升高,避免绝缘闪络。接地装置优化设计需从导体材料、结构形式及降阻措施三方面入手。(1)导体材料选择需兼顾导电性与耐腐蚀性,常用的铜覆钢接地极具有导电性能好、抗腐蚀能力强的特点,可适用于多种土壤环境;在高污染或沿海地区,还需采用防腐涂层进一步提升使用寿命。(2)结构形式优化需根据土壤电阻率调整。在低电阻率区域,可采用简单的放射形接地体;在高电阻率区域,则需通过延长接地体长度、增加接地极数量或采用网状结构,扩大接地体与土壤的接触面积,同时接地体的布置还需考虑地形条件。(3)降阻措施是高电阻率区域接地设计的关键。可采用长效降阻剂改善土壤导电性能,其通过渗透、凝胶等作用降低接地体周围土壤电阻率,且具有稳定性好、有效期长的特点。对于极端高阻土壤,还可采用深井接地或换土等方式,将接地电阻控制在合理范围内。接地引下线需短而直,减少电感效应,确保雷电流快速传导至接地体。

2.3 避雷器配置技术

避雷器是抑制雷电过电压的关键设备,其配置需满足技术参数匹配、安装位置优化及环境适应性要求。

(1)技术参数匹配方面,避雷器的额定电压应与系统标称电压一致,确保正常运行时不损坏;残压需低于被保护设备的绝缘耐受电压,并留有足够裕度,以实现有效保护;通流容量需大于系统预期雷电流,避免避雷器因过流损坏。并且响应时间也是重要参数,氧化锌避雷器的纳秒级响应速度可快速抑制陡峭过电压波形。(2)安装位置优化需遵循就近保护原则,避雷器应尽可能靠近被保护设备,减少引线电感对保护效果的影响。典型安装位置包括变电站进线处、母线及架空进线、对过电压敏感的设备旁等,形成多级防护体系。安装方式上,通常采用垂直安装,倾斜角度不超过15度,确保内部元件正常工作。还需保证避雷器带电部分与周围物体的安全距离,避免间隙放电。(3)环境适应性要求避雷器根据使用场景选择合适的外套类型。复合外套避雷器采用硅橡胶材料,具有抗紫外线、耐污秽性能好的特点,适用于沿海或化工等高污染环境;瓷外套避雷器则需通过增加爬电比距提升防污能力,适用于内陆干燥地区。在高

海拔地区,需选用增强绝缘性能的避雷器,以应对低气压导致的绝缘强度下降问题。

2.4 绝缘配合与杆塔结构优化

绝缘配合是确保输电线路在各种电压条件下安全运行的重要环节,需合理选择绝缘子片数与空气间隙。

(1)绝缘子片数选择需满足工频电压、操作过电压及雷电过电压的要求,耐张绝缘子串的绝缘子片数应比悬垂绝缘子串适当增加,以补偿受力差异导致的绝缘性能变化。对于全高超过40m的杆塔,需根据高度增加绝缘子片数,同时相应增大雷电过电压最小间隙。(2)空气间隙优化需考虑风偏条件,确保带电部分与杆塔构件的最小间隙符合要求。不同电压等级的线路对间隙值有不同规定,设计时需结合海拔高度进行修正,高海拔地区需适当增大间隙。相间操作过电压相间最小间隙和档距中相间最小间隙也需按规范要求设计,避免间隙击穿导致故障^[3]。(3)杆塔结构优化可从防雷性能与机械强度两方面入手。防雷性能方面,杆塔上地线对边导线的保护角需符合要求,单回路线路与同塔双回或多回路线路的保护角取值不同,以确保地线对导线的有效屏蔽。杆塔接地系统需与接地装置优化设计相结合,确保雷电流快速泄放。机械强度方面,杆塔需满足风荷载、冰荷载等要求,轻量化防雷装置的应用可降低杆塔承重压力。

3 输电线路运维技术

3.1 输电线路状态监测技术

输电线路状态监测技术是保障线路安全稳定运行的重要基础。(1)通过实时采集线路关键参数,实现对线路运行状态的精准掌控,该技术借助各类传感器和监测设备,对线路的电气参数、机械参数以及环境参数进行全方位监测。电气参数监测主要包括线路的电压、电流、功率因数等,通过这些参数的变化可以及时发现线路是否存在过载、短路等异常情况,监测响应时间可控制在50ms以内,能第一时间捕捉参数突变信号。机械参数监测则聚焦于杆塔的倾斜度、导线的弧垂、张力以及绝缘子的泄漏电流等,这些参数直接反映了线路的结构稳定性,一旦杆塔倾斜度超过3°、导线张力波动幅度大于15%,就可能导致杆塔倒塌、导线断裂等严重事故。环境参数监测涵盖了风速、风向、温度、湿度、覆冰厚度、舞动情况等,极端天气条件是输电线路故障的主要诱因之一,数据显示覆冰厚度超过10mm时,线路故障发生率会提升至日常的8倍以上,准确监测环境参数能够为线路的风险预警提供有力支持。(2)随着技术的不断发展,状态监测技术正朝着智能化、一体化的方向迈进。传统的监测方式往往需要人工现场巡检,不仅效率低下,而

且在复杂地形和恶劣天气条件下存在较大的安全隐患。目前远程监测系统得到广泛应用,通过安装在杆塔上的摄像头、传感器等设备,将监测数据实时传输到监控中心,数据传输时延不超过2s,运维人员可以在室内实现对线路的全天候、全方位监控。无人机巡检技术也成为状态监测的重要补充,无人机能够快速穿越复杂地形,对线路进行高清航拍和数据采集,巡检效率可达人工巡检的20倍以上,尤其适用于山区、丘陵等人员难以到达的区域。红外热成像技术的应用可以精准检测出线路设备的发热故障,温度识别精度可达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$,为运维人员及时排查隐患提供了重要依据^[4]。

3.2 输电线路检修维护技术

输电线路检修维护技术是保障线路长期可靠运行的核心手段,按线路运行状态与故障情况分为预防性检修和故障检修两类。(1)预防性检修以“预防为主”为原则,通过定期作业消除潜在隐患,具体涵盖杆塔基础沉降开裂、结构腐蚀变形的检查与加固防腐,导线地线断股磨损腐蚀的修补或更换,绝缘子清洗更换及金具检查紧固等内容。(2)故障检修是线路故障后的应急处置措施,需依托故障定位系统快速锁定故障点,组织人员携设备赴现场抢修,根据短路、接地等故障类型采取对应修复方案。目前模块化检修技术因可快速更换故障模块、缩短检修时长得到广泛应用;带电作业技术则能在不断电的前提下开展检修,显著提升了供电可靠性。

3.3 输电线路智能化运维管理技术

随着信息技术的飞速发展,输电线路运维管理正逐步向智能化方向转型。(1)智能化运维管理技术通过整合状态监测数据、检修维护记录等信息,实现对线路运维的精细化管理。该技术以大数据、云计算、人工智能等先进技术为支撑,构建输电线路运维管理平台,对海量的监测数据进行分析 and 挖掘,为运维决策提供科学依据。大数据分析技术可对线路的运行数据、环境数据等进行综合分析,识别线路运行的规律和潜在的风险因素,预测线路可能发生的故障,提前制定运维计划^[5]。

(2)人工智能技术在智能化运维管理中发挥着重要作用,通过机器学习算法对历史故障数据进行训练,建立故障诊断模型,能够快速准确地识别故障类型和故障原因。智能巡检机器人的应用也进一步提升了运维管理的智能化水平,巡检机器人可以沿着线路自主行走,进行全方位的巡检和数据采集,不仅提高了巡检效率,还可以在恶劣环境下持续工作。云计算技术则为运维管理平台提供了强大的计算和存储能力,实现了数据的集中管理和共享,运维人员可以通过不同的终端设备访问平台,获取线路的运行状态和运维信息。数字孪生技术也开始应用于输电线路运维管理中,通过构建线路的数字孪生模型,实现对线路的虚拟仿真和可视化管理,为运维方案的制定和优化提供了直观的参考。

结束语:输电线路雷击故障防控与运维管理是保障电力系统可靠运行的核心环节。文中系统梳理了故障成因、影响因素及防雷运维技术,强调多技术协同与智能化转型的重要性。未来,需进一步结合新型材料、数字技术优化防雷设计,提升状态监测的精准度与运维管理的智能化水平。通过持续技术创新与实践应用,可有效降低雷击故障概率,减少停电损失。这不仅能增强电网抵御自然灾害的能力,也为构建现代化电力系统提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1]耿野,沈金林,赵辉.输电线路雷击故障影响因素及算法分析[J].电力设备管理,2023(21):175-177.
- [2]丁功国,邓雪花.浅析输电线路防雷设计与输电线路运维技术[J].百科论坛电子杂志,2022(23):121-123.
- [3]李玥,徐泽华.浅析输电线路的防雷设计与运维技术[J].百科论坛电子杂志,2022(15):4-6.
- [4]赵建明.探究输电线路的防雷设计与运维技术[J].百科论坛电子杂志,2021(14):2831.
- [5]卢政合,周宥池.220kV输电线路运维中的防雷保护与性能优化研究[J].电力设备管理,2024(9):29-31.