

电力工程输电线路设计中的 防雷技术与优化

武雨辰

(山东锐邦电力设计有限公司, 山东 青岛 266000)

摘要 本文针对输电线路防雷技术展开研究, 系统分析了雷电危害机理、防雷基本原理及现有措施, 并提出了多维度优化策略, 以期复杂环境下的输电线路防雷设计提供参考。研究表明, 直击雷与感应雷是导致线路故障的主要原因, 其产生的过电压幅值可达数百千伏, 而接地电阻超过 $15\ \Omega$ (110 kV 线路) 或 $10\ \Omega$ (500 kV 线路) 时, 反击风险显著增加。在防雷措施优化方面, 提出接地装置应采用深井接地或纳米碳降阻材料 (降阻率 $\geq 60\%$), 避雷器选型需满足 $8/20\ \mu\text{s}$ 波形下 20 kA 放电电流及 800 A 方波通流容量要求, 并建议山区线路避雷器布置间距 $\leq 500\ \text{m}$ 。综合应用避雷线 (保护角 $\leq 30^\circ$)、智能避雷器 (响应时间 $\leq 100\ \text{ms}$) 及加强绝缘 (复合绝缘子耐压 550 kV/m) 等组合措施, 可使 500 kV 线路雷击跳闸率降低 75% 以上。

关键词 输电线路; 防雷技术; 接地装置; 避雷器; 绝缘配合

中图分类号: TM863

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.04.038

0 引言

输电线路是电力系统的重要部分, 其能否安全稳定运行直接关系到供电的可靠性。然而雷电作为一种常见的自然灾害, 对输电线路威胁巨大, 可能会让线路跳闸、设备损坏, 甚至造成大面积停电^[1]。据国家电网 2025 年统计数据显示, 我国每年因雷击造成的输电线路跳闸事故约 2 300 起, 直接经济损失超 8 亿元。国际大电网会议 (CIGRE) 报告指出, 雷击故障在 110 kV 及以上线路故障中占比高达 40% ~ 70%。因此, 深入研究输电线路的防雷技术, 找到更有效的防护办法, 对保障电力系统的安全至关重要。

1 输电线路防雷技术分析

1.1 雷电对输电线路的危害

雷电是自然界中常见的强放电现象, 对输电线路的安全运行威胁巨大。雷电击中输电线路会产生极高的过电压, 可能直接把绝缘子或者导线击穿让线路跳闸, 甚至损坏设备。就算线路没有直接被雷击, 雷电感应电压也会产生并影响电力系统的稳定。雷电的危害不仅是即时的破坏本身, 还可能让绝缘材料老化加剧, 增加后续的维护成本。对于高压输电线路, 雷电事故可能导致大面积停电, 影响社会生产和群众的正常生活。具体来说, 直击雷和感应雷是让线路出故障

的主要原因。根据雷电过电压计算公式:

$$U = IR + L \frac{di}{dt} \quad (1)$$

式 (1) 中, U 为过电压峰值 (kV), I 为雷电流幅值 (kA), R 为冲击接地电阻 (Ω), L 为导体电感 ($\mu\text{H}/\text{m}$), di/dt 为雷电流波前陡度 ($\text{kA}/\mu\text{s}$)。由此可见, 直击雷能量大、破坏力强, 如直接击中杆塔或者导线会产生很高的雷电流, 可引起绝缘子串闪络或者让线路短路跳闸。感应雷虽然电压幅值相对低一些, 但是出现的次数更多, 它通过电磁感应在输电线路产生过电压也可能把一些绝缘比较弱的设备击穿。而且雷电冲击波的传播特点会让过电压沿着线路扩散, 影响变电站等重要设备的安全。所以研究雷电对输电线路的影响, 是优化防雷技术的基础。

1.2 输电线路防雷的基本原理

输电线路防雷的主要目的是降低被雷击的可能性, 减少雷击造成的损失。防雷的基本原理可以概括成“疏导”和“限制”。疏导就是通过合理设计接地装置和避雷设施, 把雷电电流引到大地里去, 不让它在输电设备上积累 too 高的电压。限制则是用避雷器、绝缘配合等方法, 把雷电过电压的幅值控制住, 让它不超过设备能够承受的范围。根据《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》(DL/T 620-2025) 标准要求, 110 kV 线路杆塔接地电阻应 $\leq 15\ \Omega$, 500 kV 线路应 $\leq 10\ \Omega$,

作者简介: 武雨辰 (1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 电力工程工程技术。

这是确保雷电流有效泄放的关键参数。诚然，防雷技术不是只靠一种方法就能一劳永逸的，要结合线路的结构、地理环境等因素采取综合的防护措施。

1.3 常见防雷措施及其应用

在实际的工程中，输电线路的防雷方法众多，主要有避雷线、避雷器、接地装置或改善绝缘配置等。避雷线是最常用的防雷手段，工程实践表明，当保护角 $\leq 30^\circ$ 时避雷线屏蔽失效概率可控制在 5% 以下；复合外套避雷器的 8/20 μs 标称放电电流需达 20 kA 以上才能满足 500 kV 线路防护需求。避雷器主要是用来限制雷电过电压的，通常安装在变电站或者一些关键的节点，保证过电压不会对设备造成损害。接地装置则能有效降低雷电流泄放时的电阻，减少反击的风险^[2]。适当增加绝缘子串的长度，或者用防污闪绝缘子，也能提高线路的防雷能力。具体采取哪些措施要根据工程的实际需求来组合，这样才能达到最好的防雷效果。

2 输电线路防雷技术的关键问题分析

2.1 接地电阻对防雷效果的影响

接地电阻是衡量输电线路防雷性能的一个重要指标，它直接影响着雷电流能不能顺利地泄放到大地中去。当雷电击中输电线路或者避雷线的时候，雷电流通过接地装置快速地导入大地。若接地电阻太大，雷电流就没办法有效地泄放，会在接地极附近形成很高的电位，这就就会出现“反击”现象^[3]，也就是说，这个高电位会反过来把绝缘子或者设备击穿，让线路出故障。所以降低接地电阻是提高防雷效果的一个关键办法。

在实际的工程中，接地电阻的大小会受到很多因素的影响，如土壤电阻率、接地体材料、接地网结构等。土壤电阻率是决定接地电阻大小的主要因素，根据《交流电气装置的接地设计规范》(GB/T 50065-2025)规定，当土壤电阻率 $> 2\ 000\ \Omega \cdot \text{m}$ 时，需采用深井接地（深度 $\geq 15\ \text{m}$ ）或添加石墨基降阻剂（降阻率 $\geq 60\%$ ）等特殊措施。不同地方的土壤导电性能差别巨大。如岩石地区或者干燥的沙地，土壤的电阻率就比较高；而湿润的黏土地区，土壤的电阻率就比较低。为了降低接地电阻，一般要采取一些措施，如把接地极埋得深一些、扩大接地网的面积，或者使用降阻剂等。在选择接地体材料时，铜质接地体的导电性能比钢材好但成本相对较高，需根据工程实际情况来选择。

2.2 绝缘配合与防雷保护的关系

绝缘配合指的是输电线路的绝缘强度和系统过电压之间的匹配关系。合理的绝缘配合能有效提高线路的防雷能力。在防雷设计中，绝缘配合的主要目的是让绝缘子、空气间隙等绝缘介质能够承受住雷电过电

压，不会发生闪络现象。例如：绝缘强度不够，雷电过电压可能会把绝缘击穿，引发短路故障；但过度提高绝缘强度又会增加建设成本，甚至影响线路的其他性能。输电线路的绝缘配合涉及很多方面，比如绝缘子串的长度、类型，还有导线和杆塔之间空气间隙的设计。绝缘子串的长度直接影响它的耐压能力，绝缘子串越长，能承受的过电压就越高，不过也会让杆塔承受更大的机械负荷。不同类型的绝缘子（如瓷绝缘子、玻璃绝缘子、复合绝缘子）的防雷性能不同^[4]，复合绝缘子因为憎水性好，抗污闪能力强，在雷电多的地区更有优势。试验数据表明，复合绝缘子雷电冲击耐受电压可达 550 kV/m（标准雷电波 1.2/50 μs ），比同长度瓷绝缘子提高 15%~20%。另外，导线和杆塔之间的空气间隙也应设计合理，以保证在雷电过电压的情况下不会发生闪络。在正常运行时绝缘子要承受工频电压，而在被雷击的时候就要承受瞬间的高电压。所以绝缘配合既要满足雷电冲击时的耐压要求，又要考虑长期运行中的电气性能和机械强度。

2.3 地形与气象条件对防雷设计的影响

输电线路的防雷设计应重点考虑实际环境，地形和气象条件对防雷措施的选择和效果影响很大。山区、丘陵这些区域因为地形起伏大，雷电活动通常更频繁，且雷击点分布得也不均匀。山顶或者地势高的地方的输电线路更容易被直击雷击中，而山谷地区可能因为地形的屏蔽作用，雷电感应电压会增强。所以，在山区架设输电线路时，要特别注意避雷线的安装高度和覆盖范围，必要的时候可以增加避雷线的数量或者采用双避雷线的设计提高拦截雷电的可能性^[5]。

气象条件也给防雷设计带来了挑战。在雷暴多的地区（如热带或者亚热带），输电线路需要更高的防雷标准；而在干旱地区，因为土壤电阻率高，对接地装置的设计要求就更严格。另外，强风、冰雪等气象因素也会间接影响防雷效果。比如强风可能会让导线晃动，当风速超过 30 m/s 时，导线风偏角可能超过设计值（通常控制在 55° 以内），需校核动态空气间隙是否满足操作过电压要求的 2.5 m/100 kV 标准^[6]；冰雪覆盖会降低绝缘子的绝缘性能，让它在被雷击时更容易闪络。所以，防雷设计要结合当地的气象数据，采取有针对性的措施，比如提高绝缘子防冰闪的能力或优化导线的布置方式。

3 输电线路防雷技术的优化策略

3.1 接地装置的优化设计

接地装置作为防雷系统的重要组成部分，其性能直接影响着整个输电线路的防雷效果。在实际工程应

用中,接地装置的优化需要从多个维度进行考量。首先需要考虑的是土壤特性的影响,不同地区的土壤电阻率差异较大,这就要求在接地装置设计时进行详细的土壤勘测。对于高电阻率地区,可以采用深井接地或爆破接地等特殊工艺来降低接地电阻。同时,接地体的材料选择也至关重要,铜包钢接地体因其良好的导电性和抗腐蚀性,在重要输电线路中得到广泛应用,直径14 mm的铜包钢接地体在 $\rho=100 \Omega \cdot \text{m}$ 土壤中,单根垂直接地极的工频接地电阻可控制在28 Ω 以下,满足110 kV线路要求。

在布置方式上,传统的辐射状接地网虽然结构简单,但在某些特殊地形条件下可能效果不佳。此时可以考虑采用网状接地或立体接地等新型布置方式。值得注意的是,接地装置的优化不仅要考虑降低接地电阻,还要兼顾经济性和施工便利性^[7]。例如:在山区等施工困难区域,可以采用模块化接地装置,既保证了施工质量,又提高了施工效率。随着新材料技术的发展,一些新型降阻材料如导电混凝土、纳米碳材料等也开始在接地工程中得到应用,为接地装置的优化提供了更多可能性。

3.2 避雷器选型与布置优化

在选型方面需要综合考虑线路电压等级、绝缘配合要求以及当地雷电活动特点等因素。目前常用的氧化锌避雷器因其优异的非线性特性和快速响应能力,已经成为输电线路防雷的首选设备^[8]。但在实际应用中,还需要特别注意避雷器的持续运行电压、标称放电电流等关键参数的选择,确保其能够适应线路运行的各种工况。对于500 kV线路,避雷器8/20 μs 波形下的标称放电电流应 $\geq 20 \text{ kA}$,2 ms方波通流容量需达800 A以上。需要注意的是,传统的布置方式往往只在变电站进出线端安装避雷器,这种布置对线路中段的保护效果有限。现代优化方案提倡采用“重点防护+均匀布置”的策略,即在雷电多发区段、重要跨越点等关键位置增加避雷器密度,同时在整条线路上保持合理的间隔布置。这种布置方式既能保证重点区域的防护效果,又能兼顾整体线路的防雷需求。近年来,智能电网技术发展迅速,带有监测功能的智能避雷器开始得到应用,可以实时监测避雷器工作状态,为防雷系统的维护提供重要依据。

3.3 综合防雷措施的应用与改进

如今,现代输电线路的防雷工作已成为一个系统工程,需要多种防雷措施相互配合。在实际的工程中,如果只采用某一种防雷措施,通常很难达到理想的防

护效果,所以必须采用综合防雷的策略。关键在于要根据输电线路的具体情况,把避雷线、避雷器、接地装置等多种防雷手段合理地组合起来,形成一个多层次的防护体系。例如:在雷电活动特别厉害的地区,可以采用“避雷线+避雷器+加强绝缘”这样的组合方案,运行数据表明,该组合方案可将500 kV线路雷击跳闸率从1.2次/(百公里·年)降至0.3次/(百公里·年)以下,综合防护效率提升75%^[9]。

防雷措施的改进主要有两个方向。一方面是让防护手段更智能化,通过安装雷电监测系统、智能避雷器等设备,可实现 $\pm 5\%$ 的泄漏电流监测精度,并能通过IED装置以 $\leq 100 \text{ ms}$ 的响应速度触发保护动作,能够实时监测雷电活动,还能对防护设备进行智能调控。另一方面是让防护方案更个性化,利用大数据分析和数值模拟技术,针对不同线路的特点制定专门的防雷方案。

4 结束语

本文明确了接地电阻、绝缘配合以及地形气象等因素对防雷效果有着非常重要的影响。随着新材料、新技术的不断出现,未来输电线路的防雷技术会朝着更智能、更高效的方向发展。未来,防雷技术的完善还需要在实际应用中不断地探索和创新,这样才能适应电力系统发展的新要求。

参考文献:

- [1] 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(09):206-208.
- [2] 叶尔达那·哈德勒,阿尔恒·切尔子扎提,夏丽达·木那提别克,等.输电线路施工技术在电力工程中的应用研究[J].光源与照明,2024(10):171-173.
- [3] 薛苗苗,许雪明,段俊秀.电力工程输电线路设计中的防雷技术与改进措施[J].微型计算机,2025(09):106-108.
- [4] 刘宝涛.电力工程10kV配电线路的施工技术研究[J].前卫,2023(28):171-173.
- [5] 魏家干.电力工程中常见设备安装的安全技术措施[J].电力系统装备,2022(12):59-62.
- [6] 吴学浩,张磊,叶赞,等.电力线路故障定位技术在防雷系统中的应用研究[J].电气技术与经济,2025(11):71-73.
- [7] 张琦.发电厂电力设备防雷接地装置安装技术研究[J].电气技术与经济,2025(04):96-98.
- [8] 林晶.电力设备防雷接地系统腐蚀机理及防护技术创新[J].电力系统装备,2025(09):119-121.
- [9] 姚涛.电力通信线路施工中防雷防护技术分析[J].行车指南,2023(10):104-105.