

高压直流输电线路防雷策略研究

周欣

(中国电建集团重庆工程有限公司, 重庆 400060)

摘要 高压直流输电技术因其输电效率高、线路损耗小、调节灵活等优点,在现代电力系统中得到了广泛应用。然而,随着输电电压等级的提升和输电线路长度的增加,防雷问题也日益凸显。本研究针对高压直流输电线路的防雷问题,通过分析线路的结构、运行、雷电特性,归纳总结了高压直流输电线路防雷策略,并提出加强线路绝缘配置、完善防雷设施、强化理论与实践研究,构建综合防雷体系等优化对策,旨在为高压直流输电线路的防雷设计及运行维护提供理论依据和实践指导。

关键词 高压直流输电; 防雷策略; 新型防雷技术; 绝缘配置

中图分类号: TM86; TM726

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.02.036

0 引言

雷电灾害对电力系统尤其是高压直流输电线路的安全运行构成了严重威胁。雷电不仅可能直接击中输电线路,引发线路跳闸、设备损坏,甚至可能通过感应雷等形式对附近的电气设备造成间接影响,导致大规模停电事故。因此,深入探讨高压直流输电线路的防雷策略,对于提升电力系统的整体防雷能力、保障电网的安全稳定运行具有重要意义。

1 高压直流输电线路特性研究

高压直流输电线路具有结构简单、大容量、远距离输电、系统稳定性好以及调节快速等特点。同时,高压直流输电线路的雷电特性也是确保线路安全稳定运行的重要考虑因素之一。为了保障线路的安全运行,需要采取有效的防雷措施来降低雷击风险。

1.1 高压直流输电线路的结构特点

高压直流输电线路的结构特点对防雷策略的制定具有决定性影响。首先,线路走廊小。与交流线路相比,直流线路走廊较小,杆塔结构简单,线路造价相对较低。这主要是因为直流线路不存在电容电流,沿线电压分布均匀,因此不需装设并联电抗器。其次,电缆线路具备明显优势。直流电缆线路输送容量大、造价低、损耗小,且不易老化、寿命长。此外,直流电缆的输送距离不受限制,有利于远距离送电。最后,换流站设备复杂。虽然直流线路本身结构简单,但换流站设备相对复杂,包括换流器、平波电抗器、交流滤波器、直流滤波器、无功补偿设备以及各种类型的交流和直流避雷器等。

1.2 高压直流输电线路的运行特点

(1) 适用于大容量、远距离输电。高压直流输电技术具有大容量、远距离输电的能力,特别适用于大型水电站和火电厂的电力输出。(2) 系统稳定性好。直流输电相较于交流输电有着更为强大的系统,能保障电网的非同期互联,有利于远距离大容量送电,且不会因系统稳定问题而受限。(3) 调节快速、运行可靠。直流输电通过可控硅换流器能快速调整有功功率,实现“潮流反转”(功率流动方向的改变)^[1]。在正常时能保证稳定输出,在事故情况下可实现健全系统对故障系统的紧急支援。(4) 限制短路电流。当用直流输电线路连接两个交流系统时,直流系统的“定电流控制”将快速把短路电流限制在额定功率附近,短路容量不因互联而增大^[2]。

1.3 高压直流输电线路的雷电特性

高压直流输电线路的雷电特性是制定有效防雷策略的关键因素,雷电特性主要包括雷电流的幅值、波形、持续时间以及雷击点的随机性,雷电流的幅值大,能量集中,能够在短时间内对输电线路造成严重的破坏。雷电流的波形陡峭,上升时间短,对线路的瞬态响应能力提出了较高要求。雷击的持续时间虽然短暂,但因无预兆性,使得防雷措施的实施面临挑战。雷击点的随机性导致线路不同区段的雷电风险差异显著,增加了防雷工作的复杂性。

2 高压直流输电线路防雷策略现存问题

2.1 绝缘配置不合理

在高压直流输电线路的运行中,绝缘配置的合理性对于线路的安全稳定至关重要,然而当前绝缘配置

存在不合理的地方。首先,绝缘水平的选择未能充分考虑到线路所在地区的雷电活动强度、地形地貌特征以及线路本身的运行特性,导致绝缘配置与实际需求存在偏差。绝缘配置的均匀性不足,部分区段的绝缘水平过高,造成资源浪费,而另一些区段则可能因绝缘水平不足而成为雷击事故的高风险区域。其次,绝缘配合不当。绝缘配合是指线路中各种绝缘设备(如绝缘子、避雷器等)之间的配合关系。如果绝缘配合不当,可能导致在雷电冲击下,部分绝缘设备承受过高的电压而损坏。例如,如果避雷器的保护水平与绝缘子的绝缘水平不匹配,可能导致避雷器无法有效保护绝缘子免受雷电冲击^[3]。最后,绝缘配置的更新维护不及时,随着线路运行年限的增加,绝缘材料的老化问题日益突出,而未能及时进行更换或升级,进一步加剧了绝缘配置的不合理性。这种绝缘配置不合理的问题,不仅影响了高压直流输电线路的防雷性能,还可能对线路的长期运行安全构成威胁,增加运维成本。在绝缘配置过程中,工程师应当综合考虑线路的电气特性、环境因素、雷电活动规律等多方面因素,确保绝缘配置的科学性和合理性。对于绝缘配置的研究和设计,需要建立起一套完善的评估体系,以实现绝缘配置效果的前期预测和后期评价。

2.2 防雷设施不完善

在高压直流输电线路的防雷保护领域,防雷设施的完善程度直接关系到线路的雷击抵御能力,当前防雷设施不完善主要体现在以下几个方面:首先,防雷设施的布局存在缺陷,未能根据线路的实际路径和地形地貌特点进行科学规划,部分关键区域防雷设施不足。例如,避雷线(架空地线)设置不足。避雷线是高压输电线路防雷的基本措施之一,但在一些地区或线路上,避雷线的设置无法有效覆盖所有需要保护的区域。避雷线的保护角设置不合理,也会导致防雷效果不佳。保护角的大小会直接影响避雷线的防绕击能力,如果保护角过大,则避雷线的防绕击效果会减弱^[4]。避雷器也是限制雷电过电压的重要设备,配置不足会导致无法有效保护所有需要保护的设备。其次,防雷设施的设计与实际需求不匹配,部分设施的性能参数未能达到预期的防雷效果,难以有效抵御强雷电的冲击。例如,一些地区接地装置存在腐蚀、施工质量差等问题,导致接地电阻升高,影响防雷效果。又如,部分地区的避雷器选型不当,导致其无法适应线路的实际运行条件和雷电活动情况。最后,防雷设施的维护管理不到位^[5],长期运行中的磨损、老化问题未能得到及时解决,影响了防雷设施的稳定性和可靠性,

使得高压直流输电线路在面临雷电威胁时,防护能力大打折扣,不仅增加了线路故障的风险,还可能引发连锁反应,导致更为严重的电力系统事故。在防雷设施设计和建设中,需要充分考虑线路的运行环境、雷电活动特征以及防雷技术的最新发展,确保防雷设施的合理布局 and 高效运行,加强对防雷设施的日常维护与管理,建立健全的监测和检修制度,是提升防雷设施性能、保障线路安全的关键所在。

2.3 防雷技术研究不足

在高压直流输电线路的防雷领域,技术研究的不足已经成为制约线路安全运行的重要因素。当前防雷技术研究不足主要体现在以下几个方面:(1)防雷措施的针对性不强。高压直流输电线路的防雷措施往往缺乏针对性,没有充分考虑线路所在地区的气象条件、地形地貌和线路特性等因素。例如,在一些雷电活动频繁且地形复杂的地区,可能需要更加复杂的防雷措施来确保线路的安全运行。然而,现有的防雷措施往往过于简单或过于依赖传统的避雷线、避雷器等设备,而没有根据具体情况进行定制化设计。(2)防雷技术应用的创新性不足。防雷新技术、新材料的研发与应用相对滞后。例如,现有的防雷措施主要依赖于传统的物理屏障和接地装置,而在新材料、新技术和新方法的应用方面相对滞后。随着科技的不断进步,一些新型的防雷材料和技术(如纳米材料、超导材料等)已经逐渐崭露头角,但在高压直流输电线路防雷领域的应用仍然相对较少。防雷技术的集成创新不足,现有研究多侧重于单一技术的改进,缺乏对多种防雷技术综合应用的研究,难以实现防雷效果的全面提升。(3)防雷设施的维护和更新滞后。一些地区的防雷设施可能由于年久失修或技术更新滞后而无法满足当前的防雷需求。此外,新型的防雷设施和技术在推广和应用过程中也面临着一些挑战,如成本高昂、技术成熟度不足等问题。(4)差异化防雷技术的研究和应用不足。差异化防雷技术是一种根据线路特性、气象条件和地形地貌等因素进行定制化设计的防雷方法。然而,在高压直流输电线路防雷领域,差异化防雷技术的研究和应用仍然相对较少。这可能是由于对线路特性和气象条件的了解不够深入,以及缺乏足够的经验和数据支持等原因导致的。这种研究不足的现状,不仅限制了高压直流输电线路防雷能力的提升,还可能影响电力系统的稳定性和供电可靠性,加强防雷技术研究显得尤为迫切。应当着重于雷电活动的基础理论研究,为防雷措施的制定提供更为坚实的科学基础,加大新型防雷技术和材料的研发力度,推动防雷技术的创新与升级。

3 高压直流输电线路防雷策略优化对策

3.1 加强绝缘老化检测与维护, 优化绝缘配置

首先, 要优化绝缘子选型。工程师要确定应用场景, 了解绝缘子将用于哪种类型的输电线路或变电站, 以及特定的环境条件, 如海拔高度、污秽程度^[6]、气候条件等; 还要了解电气要求: 确定所需的绝缘电阻、耐击穿电压等电气参数, 以确保绝缘子在工作状态下能够保持足够的绝缘性能。根据线路所在地区的雷电活动情况和线路的重要性等因素, 选择合适的绝缘子类型和数量。例如, 在雷电高发区, 应优先考虑使用抗雷水平较高的绝缘子。其次, 要加强绝缘配合。对线路中的绝缘设备进行合理的配合, 确保在雷电冲击下, 各绝缘设备能够共同承受电压, 避免单一设备承受过高电压而损坏。最后, 提高运维管理水平。在高压直流输电线路的防雷策略中, 绝缘老化检测与维护是确保线路安全运行的关键环节, 必须使用定期检测、在线监测和故障后检测等多种手段, 以实现绝缘状态的全面评估。为了提高维护效率, 应充分利用大数据和人工智能技术, 对绝缘老化数据进行深度分析, 预测绝缘老化趋势, 从而实现精准维护。加强绝缘老化检测与维护的技术培训, 提高运维人员的技术水平, 确保防雷策略的有效实施, 提升高压直流输电线路的防雷能力, 保障电力系统的稳定运行。

3.2 完善防雷设施, 推广应用新型防雷技术

针对高压直流输电线路的防雷需求, 完善防雷设施是提高线路抗雷击能力的重要策略。(1) 应优化线路的防雷设计, 包括合理选择避雷线、接地装置和绝缘配置, 避雷线的选择应考虑线路所在地区的雷电活动特性, 采用具有较高耐雷性能的材料。(2) 接地装置的设计应确保接地电阻满足规范要求, 以提高雷电流的泄放效率, 绝缘配置则需要根据线路的电压等级和运行环境进行优化, 以提高绝缘水平。(3) 应加强对防雷设施的定期检查与维护, 确保始终处于良好的工作状态。这包括对接地装置的腐蚀情况进行检查, 对避雷线进行机械性能检测, 以及对绝缘子进行清洁和更换。(4) 应推广使用新型防雷技术, 如采用氧化锌避雷器、可控硅阀式避雷器等, 这些技术能够有效降低雷击事故的发生概率, 提高线路的防雷性能, 结合线路实际运行情况, 开展防雷设施的适应性改造, 针对不同地形和气候条件, 采取差异化防雷措施。通过这些措施可以构建一个多层次、全方位的防雷保护体系。

3.3 提升高压直流输电线路防雷技术研究的针对性

高压直流输电线路防雷技术研究不足的问题需要引起足够的重视。通过加强理论研究、提高防雷措施的针对性、推动技术创新和进步、加强设施维护和更新以及加强对差异化防雷技术的研究和应用等措施。高压直流输电线路防雷理论研究应充分考虑线路特性、气象条件和地形地貌等因素, 建立更加完善的防雷设计体系; 提高防雷措施的针对性, 即根据具体情况进行定制化设计, 确保防雷措施的有效性和经济性; 加强新材料、新技术和新方法在高压直流输电线路防雷领域的应用研究, 推动防雷技术的创新和进步; 加强防雷设施的维护和更新工作, 确保设施的可靠性和有效性; 加强对差异化防雷技术的研究和应用, 提高防雷措施的针对性和适应性。上述策略的实施, 可以显著提高高压直流输电线路的防雷水平, 为电力系统的安全运行提供有力保障。

4 结束语

新型防雷技术在提高高压直流输电线路防雷性能方面具有显著优势, 应加大研发和推广力度, 优化线路绝缘配置是提高防雷能力的关键环节, 需根据线路特点进行合理设计。构建综合防雷体系, 实现多措施相结合, 是确保高压直流输电线路安全稳定运行的有效途径, 可为高压直流输电线路的防雷设计及运行维护提供参考, 对提高电力系统的防雷水平具有一定的指导意义, 然而防雷技术仍需不断创新发展, 以适应不断变化的电力系统需求。

参考文献:

- [1] 杨佳财. 直流输电线路对环境影响探究[J]. 环境科学与管理, 2007(11):177-182.
- [2] 陈曦. 特高压直流输电的技术特点和工程应用[J]. 华北电业, 2013(03):68-69.
- [3] 刘辉, 孙家祥, 沈庆河, 等. 高压直流输电线路复合绝缘子的积污特性研究[J]. 绝缘材料, 2016, 49(60):51-55, 61.
- [4] 陈雅芳. 基于EMTP的35 kV线路架设避雷线提高耐雷水平的研究[J]. 电工技术, 2023(01):155-158.
- [5] 李莉, 伍星. 浅谈防雷设施的日常管理和维护[C]//广东省气象学会. 广东省气象学会2012年学术年会论文摘要文集. 开平市气象局, 2012.
- [6] 王欣伟, 俞华, 刘星廷, 等. 超重污秽环境下输电线路绝缘配置校核及优化方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(07):3161-3171.