

雷电活动对输电线路的影响及防雷措施研究

郭书玮 代旅潘 王金祥

中国南方电网有限责任公司超高压输电公司昆明局 云南 昆明 650000

摘要: 雷电活动对输电线路构成显著威胁,通过直击或电磁感应导致绝缘损坏、跳闸事故频发。研究分析了雷电活动特征与危害,提出包括架设避雷线、改造接地装置、安装线路避雷器及自动重合闸等措施。这些措施旨在降低雷击概率、增强线路耐雷水平,有效减少雷击事故,确保输电线路在雷电频发的环境下仍能安全稳定运行,保障电力供应可靠性。

关键词: 雷电活动;输电线路的影响;防雷措施

引言:雷电活动作为一种自然现象,对电力系统尤其是输电线路的安全运行构成了严重威胁。随着电网规模的扩大和电力需求的增长,确保输电线路在雷电环境下的稳定运行显得尤为重要。本文旨在深入探讨雷电活动对输电线路的影响,并提出有效的防雷措施,以期为提高电力系统的抗雷能力和保障电力供应的稳定性提供理论支持和实践指导。

1 雷电活动的特征与影响

1.1 雷电活动的成因与类型

(1) 雷电的产生机制。雷电是大气中剧烈的放电现象,由积雨云中电荷分离与积累引发。大气对流使水滴、冰晶碰撞摩擦,正电荷向云顶聚集,负电荷在云底累积,当电荷差突破空气绝缘极限时,便产生强烈放电,伴随光(闪电)和声(雷声)。(2) 积雨云的形成与电荷分布。积雨云由强烈对流运动形成,水汽上升冷却凝结成云体。其电荷分布呈垂直分层,顶部多正电荷,底部以负电荷为主,底部局部区域可能有正电荷中心,这种分布为雷电产生提供了电荷基础。

1.2 雷电活动的季节性与地域性特征

(1) 雷电日的定义与分布规律。雷电日指一年中听到雷声的天数,是衡量雷电活动的指标。我国雷电日分布呈现季节性,夏季最多,春秋次之,冬季最少,这与夏季强对流天气频发密切相关。(2) 我国雷电活动的地域性差异。地域上,南方多于北方,山区多于平原,沿海多于内陆。华南地区年均雷电日达80-100天,青藏高原因地形抬升对流旺盛,也是雷电高发区,而西北干旱地区则较少。

1.3 雷电对输电线路的影响

(1) 直接雷击与间接雷击的危害。直接雷击击中线路导线或杆塔,巨大能量会损坏设备;间接雷击是雷电击中线路附近物体,产生的电磁感应在导线感应过电

压,威胁线路绝缘。(2) 大气过电压的产生与影响。雷电放电引发大气过电压,其幅值高、波前陡,会沿线路传播,击穿绝缘子、损坏变压器等设备。(3) 雷击导致的绝缘子闪络、线路跳闸等事故分析。雷击时过电压超过绝缘子耐受值会发生闪络,造成线路短路跳闸。闪络还可能灼伤绝缘子,降低其绝缘性能,增加后续事故风险,严重影响电力系统稳定运行^[1]。

2 输电线路防雷措施的基本原理

2.1 防雷措施的基本目标

(1) 降低雷击概率。通过优化线路路径、增设屏蔽装置等方式,减少雷电直接击中导线或杆塔的可能性。例如避开雷电高发区、架设避雷线形成保护范围,从源头降低雷击事件的发生频率。(2) 减少雷击对线路的影响。当雷击不可避免时,采取措施削弱雷电产生的破坏能量。如通过接地装置快速泄放雷电流,避免过电压积聚;利用设备的保护功能阻断过电压传播,减轻对线路元件的冲击。(3) 提高线路的耐雷水平。增强线路自身抵御雷击的能力,使线路在遭遇雷击时不易发生绝缘闪络、跳闸等故障。通过改进绝缘子性能、优化杆塔结构等,提升线路耐受过电压的阈值。

2.2 防雷措施的基本原理

(1) 接地电阻的作用与降低方法。接地电阻是雷电流流入大地的关键通道,其阻值越小,雷电流泄放速度越快,能有效降低杆塔电位和反击电压。降低方法包括采用多极接地体、换用降阻剂填充接地沟、扩大接地网面积等,通过改善土壤导电性能和增加电流散流路径,实现接地电阻的降低。(2) 避雷线的架设与耦合作用。避雷线架设在导线上方,通过“引雷入地”减少导线直接受雷击的概率。同时,避雷线与导线之间存在电容耦合,能分流部分雷电流,并降低导线上的感应过电压,削弱雷击产生的过电压幅值,起到保护导线绝缘的作

用。(3) 线路避雷器的保护与工作原理。线路避雷器并联在绝缘子两端, 正常运行时呈高阻状态不影响线路工作。当雷击产生的过电压超过其动作阈值时, 避雷器迅速击穿转为低阻, 将过电压限制在安全范围内, 并将雷电流导入大地。过电压消失后, 避雷器自动恢复高阻状态, 确保线路正常供电, 实现对线路绝缘的有效保护。

3 输电线路的常规防雷措施

3.1 改造线路杆塔接地装置

(1) 接地电阻的测量与改造方法。接地电阻测量多采用三极法或四极法, 通过专业接地电阻测试仪, 将电流极、电压极按规定距离布置, 施加测试电流后读取数值, 以此判断接地装置是否达标。若电阻值超标, 常用改造方法有: 对于土壤电阻率较低的区域, 可延长水平接地体, 增加其与大地的接触面积; 在高土壤电阻率地区, 可采用垂直接地极打入地下, 配合降阻剂填充接地沟, 利用降阻剂的导电性能降低土壤电阻, 增强雷电流的泄放能力。此外, 还可采用深井接地, 通过钻孔将接地极深埋至低电阻率地层, 大幅提升接地效果。(2) 针对不同地形、地质的接地体改造策略。山地地形因地势陡峭、岩石较多, 接地体改造需采用阶梯式布置, 沿山坡分层设置水平接地体, 并与垂直接地极相连, 确保接地体与土壤紧密接触; 岩石地质区域, 需先进行爆破钻孔, 放入接地极后灌注降阻砂浆, 使接地极与岩石层形成良好导电通道。平原沙质土壤易受雨水冲刷, 应采用深埋式接地体, 深度通常在0.8米以上, 并包裹防腐层, 防止接地体被腐蚀; 沼泽地带则需选用耐腐蚀的镀锌钢管作为接地体, 同时换填低电阻率的细土或砂石, 围绕接地体形成导电层, 减少水分对电阻的影响^[2]。

3.2 架设避雷线与耦合地线

(1) 避雷线的架设要求与效果分析。避雷线架设需满足保护角要求, 对于110kV及以上线路, 保护角一般控制在 20° - 30° 之间, 以确保导线处于避雷线的有效屏蔽范围内; 双避雷线的间距应合理设置, 通常为杆塔高度的0.7-1.0倍, 避免出现屏蔽死角。从效果来看, 架设避雷线能显著降低线路遭受直接雷击的概率, 一般可使直接雷击次数减少70%-80%。在雷电活动频繁的区域, 如南方多雷地区, 安装避雷线后, 线路因直击雷导致的跳闸事故可大幅减少, 极大提升了线路运行的稳定性。(2) 耦合地线在防雷中的作用与安装方法。耦合地线的主要作用是通过与导线之间的电容耦合, 降低雷击杆塔时导线上的感应过电压, 同时能分流一部分雷电流, 减轻接地装置的负担。安装时, 耦合地线应平行架设在导线下方, 距离导线0.6-1.2米, 且需与杆塔的接地装置

可靠连接, 确保雷电流能顺利泄入大地。对于未架设避雷线的10kV配电线路, 安装耦合地线后, 感应雷过电压可降低50%左右, 有效减少了因感应雷引发的绝缘子闪络和线路跳闸事故, 尤其在多雷山区的支线线路中应用效果显著^[3]。

3.3 安装自动重合闸

(1) 自动重合闸的原理与防雷效果。自动重合闸的工作原理是当线路因雷击等原因发生跳闸后, 装置能迅速检测到故障信号, 经过短暂延时(通常为0.5-1.5秒), 自动发出合闸指令, 使断路器重新合闸。由于雷击造成的故障多为瞬时性故障, 如绝缘子闪络在雷电流消失后绝缘可快速恢复, 因此自动重合闸能有效恢复线路供电。其防雷效果十分明显, 安装后线路的供电可靠性可提升60%-80%, 大大缩短了因雷击停电的时间, 减少了对用户的影响。(2) 实际运行中的重合闸成功率分析。在实际运行中, 自动重合闸的成功率受多种因素影响。在干燥少雨地区, 由于空气绝缘恢复较快, 成功率可达85%以上; 而在潮湿、多雾地区, 因绝缘子表面易残留导电物质, 成功率相对较低, 约为70%-75%。对于瞬时性雷击故障, 重合闸成功率通常超过90%; 但如果是永久性故障, 如绝缘子击穿、导线断线等, 重合闸则会失败, 需要人工排查处理。总体而言, 自动重合闸能显著提高线路的供电连续性, 是防雷措施中不可或缺的一环。

3.4 其他常规防雷措施

安装消雷器、预放电棒等防雷装置。消雷器通过尖端放电释放雷云电荷, 降低雷云与线路之间的电场强度, 从而减少雷击发生的概率, 在多雷平原地区应用时, 可使线路雷击次数减少30%-40%。预放电棒则利用其提前放电特性, 在雷电来临前主动与雷云形成放电通道, 将雷击引导至自身并通过接地装置泄入大地, 其响应速度比普通避雷器快20%-30%, 能有效保护线路免受直击雷侵害, 尤其适用于雷电活动剧烈的线路关键区段。更换合成绝缘子提高线路绝缘强度。合成绝缘子由硅橡胶等复合材料制成, 具有良好的憎水性和耐污性能, 其绝缘强度比传统瓷绝缘子高20%-30%。在污秽严重或潮湿的环境中, 合成绝缘子表面不易形成导电水膜, 能有效抵抗雷击引发的污闪和湿闪。更换合成绝缘子后, 线路的耐雷水平可提升15%-25%, 在沿海、工业区等污染较严重的地区应用效果尤为显著, 能大幅减少因雷击导致的绝缘子闪络事故, 提高线路运行的安全性和可靠性。

4 输电线路的新技术防雷措施

4.1 安装线路型氧化锌避雷器

(1) 氧化锌避雷器的工作原理与优势。氧化锌避雷器以氧化锌阀片为核心元件,其电阻值随电压变化呈非线性特征。正常运行时,阀片呈高阻状态,几乎不导通电流;当雷击产生的过电压超过动作阈值时,阀片迅速转为低阻,将过电压限制在设备耐受范围内,并将雷电流安全导入大地。与传统避雷器相比,它无间隙、响应速度快(动作时间小于20纳秒),且能耐受多次雷击冲击,无需频繁维护。同时,其通流容量大,可适应不同强度的雷电流,在限制过电压方面更高效。(2) 在山区等复杂地形中的应用效果分析。山区地形陡峭、雷电活动频繁,且杆塔接地电阻难以降低,传统防雷措施效果受限。线路型氧化锌避雷器在此类环境中表现突出:通过直接并联在绝缘子两端,可有效抑制雷击产生的过电压,避免绝缘子闪络。某山区220kV线路安装后,雷击跳闸率下降72%,尤其在多雷季节,线路运行稳定性显著提升。此外,其小巧的结构适合山区狭窄场地安装,且耐候性强,能适应山区温差大、湿度高的环境,长期运行可靠性达95%以上^[4]。

4.2 安装引弧间隙

(1) 引弧间隙的防雷机理与实际应用。引弧间隙由两个电极构成,电极间保持特定空气间隙,与绝缘子并联安装。当雷击导致过电压时,间隙先于绝缘子击穿放电,形成电弧通道,将雷电流引向杆塔接地装置。同时,电弧在电动力作用下被拉长,最终自行熄灭,避免线路跳闸。实际应用中,引弧间隙需根据线路电压等级调整间隙距离,110kV线路通常设置15-20厘米间隙。它安装简便,可直接加装在现有杆塔上,尤其适用于老旧线路的防雷改造,无需大规模更换设备。(2) 引弧间隙对跳闸率的影响及可靠性分析。在多雷地区的35kV线路试点中,安装引弧间隙后,雷击跳闸率降低55%-65%,效果优于传统避雷器。其可靠性体现在:间隙击穿后电弧熄灭时间短(通常小于0.1秒),不影响线路重合闸动作;且电极采用耐弧材料,可耐受多次电弧灼烧,使用寿命达10年以上。但在污秽严重地区,需定期清理电极表面,避免因积污导致间隙误动作,否则可能使可靠性下降至80%以下。

4.3 不平衡绝缘方式的研究

(1) 不平衡绝缘的原理与防雷效果。不平衡绝缘通过设计同杆塔不同回路绝缘子的绝缘水平差异,使雷击时绝缘较弱的回路先闪络,释放雷电流,保护绝缘较强的回路不发生故障。例如,同杆双回线路中,一回线路采用14片绝缘子,另一回采用12片,雷击时12片绝缘子的回路先闪络,通过接地装置泄流,避免两回线路同时跳闸。该方式利用绝缘差异实现“牺牲一回保护另一回”,可使线路总跳闸率降低40%-50%,尤其减少多回路同时停运的风险。(2) 在同杆架设线路中的应用前景。随着城市电网密度增加,同杆多回线路广泛应用,但雷击易导致多回同时跳闸,影响供电可靠性。不平衡绝缘方式无需额外设备,仅通过调整绝缘子配置即可实现防雷,改造成本低。在500kV同杆双回线路试验中,采用该方式后,双回同时跳闸次数从年均3次降至0.5次,供电可靠性提升83%。未来结合智能监测技术,动态调整绝缘差异(如根据雷电预警临时切换绝缘子配置),其应用前景将进一步扩大,尤其适合负荷密集区域的输电线路。

结束语

综上所述,雷电活动对输电线路的安全构成重大挑战,但通过深入研究并采取有效的防雷措施,我们可以显著提升电力系统的抗雷能力。本研究提出的策略,如优化避雷线设计、强化接地系统、应用先进避雷技术等,为降低雷击跳闸率、保障电网稳定运行提供了科学依据。未来,我们将继续探索更为高效的防雷方法,以应对不断变化的雷电挑战。

参考文献

- [1]钟家兴.高压输电线路综合防雷措施的分析与探讨[J].电力系统装备,2020,(10):92-93.
- [2]石文琪.高压输电线路防雷措施分析及改进方法[J].化学工程与装备,2020,(06):58-59.
- [3]向开榜.输电线路防雷接地措施的重要性及其维护[J].电工材料,2023,(08):80-81.
- [4]时志明.架空输电线路的防雷及运维措施[J].产业创新研究,2023,(14):144-146.