

山地光伏电缆敷设防雨水冲刷防护技术研究

刘俊峰 刘继峰 何 旭 宋佳乐 陈俊州

中建八局西南建设工程有限公司 四川 成都 615500

摘 要: 随着我国“双碳”战略目标的深入推进,光伏发电作为清洁能源的重要组成部分,其开发重心正逐步从平坦的戈壁、荒漠向地形复杂的山地丘陵区域转移。然而,山地环境特有的强降雨、陡坡度和复杂地质条件,对光伏电站的核心“血脉”——电缆系统构成了严峻挑战,其中雨水冲刷导致的电缆外护套磨损、位移乃至断裂,已成为影响电站长期安全稳定运行的关键隐患。本文旨在系统性地研究山地光伏电缆敷设过程中,针对雨水冲刷问题的综合防护技术体系。论文首先深入剖析了山地环境下雨水冲刷对电缆的危害机理与影响因素;其次,从电缆本体选型、敷设路径规划、物理防护结构及生态协同防护四个维度,全面梳理并构建了多层次的防护技术框架。本研究旨在为山地光伏项目的高质量建设与长周期可靠运行提供理论支撑与技术参考,推动光伏产业在复杂地形下的健康、可持续发展。

关键词: 山地光伏; 电缆敷设; 雨水冲刷; 防护技术; 综合防护体系

引言

在全球能源转型与“双碳”目标下,我国光伏发电产业蓬勃发展,中西部山地因太阳能资源丰富,成为大型地面光伏电站建设的新兴区域。但山地地形起伏大、地质复杂、降雨集中,给光伏电站建设运维带来难题,尤其是电缆系统敷设安全面临考验。雨水冲刷是山地光伏电缆面临的主要威胁,高速水流会冲击电缆外护套,掏空土壤,导致电缆悬空、绝缘层破损等,引发安全事故,造成发电量损失,增加运维成本。目前,行业对光伏电缆研究多集中于材料、电气性能及常规工艺,针对山地防雨水冲刷的系统性防护技术研究不足,许多项目缺乏科学依据和成体系方案。因此,开展“山地光伏电缆敷设防雨水冲刷防护技术研究”意义重大,本文将立足工程实践,分析致灾机理,构建综合防护技术体系,为解决行业难题提供思路与方法。

1 山地环境雨水冲刷对电缆的危害机理与影响因素

1.1 危害机理分析

雨水冲刷对电缆的危害主要体现在以下几个方面:

(1) 直接机械磨损: 高速流动的地表径流携带着泥沙、碎石等固体颗粒,对暴露在外的电缆外护套进行持续的摩擦和撞击。这种磨蚀作用会逐渐削薄护套厚度,破坏其完整性,降低其抵御紫外线、化学腐蚀和机械损伤的能力,最终可能导致绝缘层暴露。(2) 间接掏蚀与悬空: 这是更为隐蔽且危险的破坏形式。雨水沿坡面流动时,会优先侵蚀松软的土壤或回填土,尤其是在电缆沟或直埋电缆的下方和侧方。随着时间的推移,电缆下方的支撑土壤被水流带走,形成空洞或沟壑,导致电缆局部悬空。悬空的电缆在自重和风载作用下会产生弯曲应

力,长期交变应力会导致金属导体疲劳、绝缘层开裂。一旦遭遇强降雨或大风,极易发生断裂。(3) 水力拖拽与位移: 在极端暴雨情况下,形成的强大水流会产生显著的拖拽力。对于固定不牢或敷设在浅层的电缆,这股力量足以使其发生横向或纵向的位移。电缆的非预期移动会拉扯接线端子,破坏密封,甚至导致连接点脱落,造成系统故障^[1]。(4) 加速老化与腐蚀: 持续的雨水浸泡会加速电缆护套材料的老化进程,特别是对于非专用的普通电缆。同时,雨水本身或其溶解的土壤中的化学物质,可能对电缆的金属铠装层或屏蔽层产生电化学腐蚀,进一步削弱其防护能力。

1.2 关键影响因素

雨水冲刷的强度和破坏效果受到多种因素的共同影响:(1) 地形坡度与坡长: 坡度越陡,水流速度越快,动能越大,冲刷力也越强。同时,坡长决定了汇水面积和径流累积效应,长坡面汇集的水量更大,冲刷能力更强。(2) 降雨特性: 包括降雨强度、历时和频率。短历时、高强度的暴雨是造成突发性冲刷灾害的主要原因。年降雨总量则决定了长期累积的侵蚀效应。(3) 土壤性质: 土壤的类型(如砂土、黏土、砾石土)、密实度、渗透性和抗剪强度直接影响其抵抗水流侵蚀的能力。松散、透水性差的土壤更容易被冲刷。(4) 植被覆盖: 良好的植被覆盖能有效拦截雨滴,减缓地表径流速度,其根系还能固结土壤,是天然的水土保持屏障。反之,裸露的地表则极易遭受冲刷。(5) 电缆敷设方式与深度: 直埋、穿管、桥架或电缆沟等不同敷设方式,其暴露程度和抗冲刷能力差异巨大。敷设深度不足是导致电缆易受冲刷影响的关键人为因素。深刻理解这些机理和影响

因素,是制定针对性防护策略的前提。

2 电缆本体选型与强化:构筑第一道防线

2.1 选用专用光伏电缆

必须严格杜绝使用普通电力电缆替代。山地光伏项目应选用符合国际标准(如EN50618)和国内行业标准(如T/CEEIA262-2017《坡地用光伏电缆》)的专用光伏电缆。这类电缆的核心优势在于其优异的耐候性、高机械强度和可靠的电气性能。其护套材料通常采用交联聚烯烃(XLPO)或辐照交联聚氯乙烯(XLPE),能长期耐受强烈的紫外线辐射、剧烈的高低温循环(-40℃至+90℃甚至更高)以及臭氧侵蚀,确保在户外25年以上的使用寿命内性能稳定。同时,它们具备良好的抗拉、抗压和耐磨性能,能够承受一定的外部机械应力,并且拥有高绝缘电阻和良好的介电强度,能适应光伏系统直流高压(如1500V)的工作环境。

2.2 采用铠装电缆

在雨水冲刷风险极高的陡坡、冲沟或地质不稳定区域,应优先考虑采用带金属铠装层的光伏电缆。铠装层(通常为钢带或钢丝)为电缆提供了额外的、坚固的物理屏障,使其具备卓越的抗冲击与抗压能力,能有效抵御落石、施工机械碾压以及水流携带的硬物冲击^[2]。同时,铠装层赋予了电缆强大的抗拉强度,对于需要长距离跨越或在斜坡上敷设的电缆,可以分担部分张力,防止因自重导致的过度伸长或断裂。此外,在部分山区,铠装层还能有效防止鼠类等动物的啃咬破坏,进一步提升了电缆的可靠性。

2.3 优化导体材料

在满足载流量和电压降要求的前提下,可考虑选用铝合金导体光伏电缆。相比传统的铜芯电缆,铝合金电缆重量更轻,在山地运输和敷设过程中更为便捷,能减轻对支架和固定装置的负荷,间接降低了因安装应力过大而导致的潜在风险,这对于地形崎岖、施工难度大的山地项目而言,是一项具有实际价值的优化措施。

2.4 接头与终端的强化密封

电缆接头和终端是整个线路中最薄弱的环节。在山地环境中,必须采用专为户外恶劣环境设计的防水接线盒和MC4连接器,并严格按照工艺要求进行密封处理。近期,中国电建等企业申请的“山地光伏电缆接头防水密封制备工艺”专利,通过多层密封胶、应力缓冲层和形状记忆护套等技术,实现了动态、长期的密封保障,代表了该领域的技术发展方向,值得在高风险区域推广应用,以彻底解决接头处进水失效的顽疾。

3 敷设路径规划与方式优化:规避风险源头

3.1 路径规划原则

电缆路径的规划应与光伏阵列的整体布局、场内道路和排水系统统筹考虑,遵循“避、绕、顺”的原则。所谓“避”,即尽可能避开已知的冲沟、汇水线、陡坎、滑坡体等地质灾害高风险区,从根本上消除隐患。“绕”是指当无法完全避开时,应采取绕行方案,例如沿等高线布设,避免与主径流方向垂直交叉,从而减少正面迎击水流的机会。“顺”则是在必须穿越坡面时,应尽量使电缆走向与自然径流方向平行或小角度相交,以最大限度地减少水流对电缆的直接冲刷力。

3.2 敷设方式比选与应用

针对山地环境,常见的敷设方式各有优劣,需根据具体场景灵活选用:(1)电缆沟敷设:这是在山地光伏电站中,特别是汇流箱至逆变器、升压站等主干线路的首选方案。电缆沟(或预制式电缆槽盒)能将电缆完全包裹起来,与外界环境隔离,提供最佳的物理防护。关键在于电缆沟自身的设计必须具备良好的排水能力,沟底应设置不小于0.5%的纵向排水坡度,并在低洼处设置集水井或与主排水系统连通,严防沟内积水。沟体结构应稳固,可采用混凝土浇筑或高强度复合材料预制件^[3]。

(2)穿管敷设:对于局部穿越道路、陡坡或需要额外保护的区段,可采用穿管敷设。保护管材可选用热浸锌钢管、CPVC电力管或HDPE双壁波纹管。钢管机械强度最高,但重量大、成本高;塑料管轻便、耐腐蚀、内壁光滑利于穿线,是更常用的选择。管道接口必须密封良好,防止水流灌入。(3)桥架敷设:在场区内部相对平缓或有固定支架的区域,可采用桥架敷设。应选用耐候性好的热浸锌钢制或铝合金桥架,并确保桥架内部无积水、无杂物。桥架的固定间距要加密,特别是在斜坡上,以防止桥架变形或位移。(4)直埋敷设:应作为最后的选择,仅适用于风险极低、土壤条件稳定的缓坡区域。若采用直埋,必须保证足够的埋设深度(通常要求冻土层以下且不小于0.7米),并在电缆上下方铺设不少于100mm厚的细沙或软土作为缓冲垫层,上方再覆盖保护盖板或警示带。

4 物理防护结构设计:构建刚性屏障

4.1 电缆沟/槽的加固与排水

如前所述,电缆沟是核心防护载体。其加固措施至关重要,在土质松软或坡度较大的地段,电缆沟侧壁应采用混凝土或浆砌片石进行支护,防止塌方。同时,应选用承重能力强、密封性好的盖板,盖板间缝隙应做防水处理,并确保盖板与沟体之间有可靠的锁定或固定措施,防止被水流冲走。电缆沟的排水设计更是重中之

重,除了沟内纵向坡度,还应在沟体外侧设置截水沟,拦截上方坡面来水,避免其直接流入电缆沟,沟内积水应通过预埋的排水管或渗水孔,有序排入电站的主排水系统,形成一个完整的、内外联动的排水体系^[4]。

4.2 局部挡墙与护坎

在电缆穿越小型冲沟、陡坎或坡脚等关键节点,可修建小型的浆砌石挡墙或混凝土护坎。这些结构的作用是多方面的,既能改变水流方向,引导水流平顺通过,避免直接冲击电缆,又能抬高电缆位置,将其敷设在挡墙之上或后方的安全区域,同时还为电缆及其保护结构提供一个稳固的平台,有效化解了局部高风险点的威胁。

4.3 专用防护装置

随着技术进步,市场上出现了越来越多的专用电缆防护产品。例如,深圳亨峰源科技有限公司取得的“一种光伏线缆防护装置”专利,通过铝合金防护壳和内部穿线机构,为电缆提供了模块化的防碰撞、防穿刺保护。东旭科技集团的“光伏电站电缆防护机构”专利,则通过可调节的防护板结构,简化了安装流程,提高了防护效率。这些创新产品为解决特定场景下的防护难题提供了新的工具,丰富了物理防护的技术手段。

5 生态协同防护技术:实现长效与可持续

5.1 生态护坡理念

生态护坡技术利用植物根系的锚固作用和茎叶的拦截、缓冲作用,来加固表层土壤,减缓径流速度,从根本上削减雨水冲刷的动力。这不仅能有效保护电缆,还能恢复和改善项目区的生态环境,实现“绿水青山”与“金山银山”的双赢,体现了绿色发展的先进理念。

5.2 具体技术应用

(1) 植被恢复:在电缆敷设完成后,应及时对施工扰动区域进行植被恢复。选择根系发达、适应当地气候、生长迅速的乡土草种或灌木进行播种或栽植。良好的植被覆盖是抵御面蚀最经济有效的手段。(2) 工程-植物复合措施:在冲刷风险较高的区域,可先实施一些微型的工程措施,如土工格室、三维植被网或生态袋,为

植物生长提供初期的稳定基盘和保水保肥条件。待植被成坪后,这些工程结构与植物根系共同构成一个稳定、有韧性的防护层。(3) 光伏组件导流设计:创新性地,可以借鉴交口县光煜光伏发电公司的“用于光伏组件的导流装置”专利技术。该装置能有效收集和引导光伏组件表面的雨水,使其有序流下,避免雨水从组件间隙无序滴落,直接冲刷下方的坡面和电缆,从源头上减少了局部冲刷源。

6 结语

山地光伏电缆敷设防雨水冲刷是一项系统工程,单一的技术手段难以应对复杂的自然挑战。本文通过系统研究,提出了一套涵盖“本体强化、路径优化、刚性防护、生态协同”四个层面的综合防护技术体系。该体系强调,首先应选用高性能的专用光伏电缆,必要时辅以铠装加强;其次,通过科学的路径规划和合理的敷设方式(优先推荐电缆沟),从源头上规避或弱化冲刷风险;再次,针对高风险节点,构建坚固可靠的物理防护结构;最终,通过生态护坡等绿色技术,实现防护效果的长效化与生态环境的和谐共生。未来,随着新材料、新工艺 and 智能监测技术的发展,山地光伏电缆的防护技术将朝着更智能、更韧性、更可持续的方向演进。例如,通过在电缆沿线布设土壤湿度、位移传感器,结合气象预报,实现对冲刷风险的实时预警和主动干预。这将为我国山地光伏产业的高质量、规模化发展奠定坚实的安全基石。

参考文献

- [1]胡衿滔.光伏工程项目电缆选型及敷设实践[J].电力设备管理,2025,(10):237-239.
- [2]孔德龙.光伏发电工程项目中电缆敷设和接线施工方法分析[J].中华建设,2024,(08):157-159.
- [3]王磊.山地光伏发电项目电缆敷设方案优化分析及关键技术[J].安装,2024,(05):79-80.
- [4]亢亚军.光伏发电场内电缆敷设要点研究[J].光源与照明,2023,(01):109-111.