

光伏发电项目电缆分层敷设与接线标准化施工技术探析

张石兵

山西启光发电有限公司 山西 晋中 031300

摘要：为解决光伏项目电缆施工层级混乱、接线不规范、防护不到位等行业痛点，保障光伏电站安全稳定运行，本文围绕电缆分层敷设与接线施工展开标准化技术研究。先阐述电缆分类特性与分层敷设核心原则、前期筹备要点，梳理不同场景标准化敷设工艺、防护技术及常见问题整改方法，规范电缆接线工序与全程质量管控体系。实践表明，标准化施工可降低故障与返工率、提升发电效益，可为光伏电缆施工提质增效提供技术参考。

关键词：光伏发电项目；电缆分层敷设；接线标准化；施工技术

引言：双碳目标推进下，光伏发电项目规模化落地，电缆敷设与接线作为电站施工核心环节，其施工质量直接决定系统发电效率与运行安全性。当前部分光伏工程存在电缆分层无序、强弱电干扰、接线工艺粗放、防护措施缺失等问题，易引发信号失真、设备故障、线路损耗超标等隐患。为统一施工标准、规范作业流程，本文结合地面、分布式屋面等多场景施工特点，系统化探究电缆分层敷设与接线标准化施工技术，构建完善质量管控体系，助力光伏工程施工标准化、规范化发展。

1 光伏电缆分层敷设基础理论与前期筹备

1.1 光伏电缆分类及敷设特性

(1) 直流电缆（光伏专用PV电缆）承载光伏组件直流电能，耐候、耐臭氧、抗紫外线，工作电压高（DC1500V），绝缘层厚实；交流电缆用于逆变器输出侧及并网传输，传输大电流，对绝缘耐压和载流量要求高；控制电缆用于传输信号与指令，截面小、屏蔽性能要求高，抗干扰能力是核心指标。(2) 直流电缆适用于室外暴晒、高温、潮湿环境，需选用耐候型PV电缆；交流电缆适宜敷设于桥架、沟道内，需考虑散热条件；控制电缆宜远离强电干扰源，敷设于屏蔽线槽或独立层位^[1]。(3) 交联聚乙烯绝缘电缆耐温等级高、机械强度高，适合多层敷设中的底层承重位；橡胶软电缆柔韧性好，适用于弯曲频繁的接线区域；PVC绝缘电缆耐热性相对较差，敷设时需远离高温管道并控制敷设密度，避免过热。

1.2 电缆分层敷设核心原则

(1) 强弱电分离敷设，控制电缆与电力电缆分层或分槽敷设，避免电磁干扰导致信号失真；交直流分离敷设，直流侧与交流侧电缆分开敷设，防止故障时交互影响，便于故障排查。(2) 电缆层间保持安全间距（规范要求不小于300mm），层级按电压等级从高到低、自上

而下排列，最上层为高压交流、中间为直流、下层为控制和通讯电缆；标识清晰，预留运维操作空间。(3) 优化电缆路径缩短长度以降低线路损耗；屏蔽层可靠接地抑制干扰；选用耐腐蚀桥架及防潮措施，在酸碱、盐雾环境中增加防腐涂层，确保系统长期可靠性。

1.3 施工前期筹备工作

(1) 现场勘察明确地下管线、障碍物及地质条件，结合光伏区布局优化路径，减少交叉与迂回，优先利用已有沟道，降低施工难度。(2) 按设计图纸对电缆规格、型号、长度及合格证进行核对，检查桥架镀锌层或涂层完好性，紧固件、连接片等配件数量准确且质量合格，不合格材料禁止入场。(3) 放线架、牵引机等设备试运行正常，测量仪表校准到位；技术交底内容涵盖分层顺序、间距控制、弯曲半径要求及安全操作规程，施工人员经考核合格方可上岗操作。

1.4 分层敷设常见施工场景适配方案

(1) 地面电站采用电缆沟敷设，沟内设支架分层排列，高压交流电缆置于最上层支架，直流电缆位于中间层，控制电缆敷设于最下层或专用槽盒内，沟底设排水坡度及集水井，支架接地可靠。(2) 分布式屋面采用桥架敷设，主桥架沿屋面结构走向布置，层间用隔板分隔；上层为交流动力电缆，下层为直流光伏电缆，控制电缆单独穿管保护；桥架与屋面防水层保持间距，支架固定于承重结构，避免破坏防水层。(3) 室内线槽敷设注重防火与散热，大截面动力电缆采用托盘式线槽分层布放，控制电缆选用带盖密闭线槽并远离热源；室外线槽需增加防水罩、防紫外线措施，进出线槽处做防火封堵，室内外衔接处设防水弯。

2 光伏发电项目电缆分层敷设标准化施工工艺

2.1 电缆分层排布标准化工艺

(1) 层级划分标准：自上而下依次为交流电力电缆层

(110kV/35kV/10kV)、直流电力电缆层(DC1500V)、控制与通讯电缆层(屏蔽线缆/光缆)。同一电压等级电缆按回路分区排列,不同回路间留设辨识间隔;直流正负极电缆并排敷设时保持50mm以上间距。(2)层间垂直间距不小于300mm(桥架敷设时层间净距不小于250mm),水平固定支架间距:水平敷设为0.8~1.0m,垂直敷设为1.0~1.5m。固定夹具采用非磁性材料(不锈钢或尼龙),单芯电缆夹具严禁形成闭合磁路,紧固扭矩控制在规范值 $\pm 5\%$ 范围内^[2]。(3)大电流电缆置于下层支架(靠近承重结构)以减少振动传导,三相电缆按“品”字形或水平排列以均衡电抗;弱电电缆布置于最上层或独立密封槽盒内,与强电电缆水平净距不小于500mm,无法满足时增设金属隔板屏蔽,屏蔽层单端接地。

2.2 不同敷设方式标准化施工流程

(1)电缆沟直埋分层敷设流程:沟槽开挖→基底夯实→铺设细砂垫层(厚100mm)→下层电缆敷设(交流)→覆砂掩埋→中层敷设(直流)→覆砂→上层支架敷设(控制电缆)→覆盖保护板→回填夯实→埋设标识桩。工艺要点:电缆上下铺砂厚度不小于100mm,保护板覆盖宽度超出电缆两侧各50mm,直埋深度(冻土层以下)不小于0.7m。(2)桥架分层安装流程:定位放线→支吊架安装(间距1.5m)→下层桥架安装调平(水平度偏差 $\leq 2\%$)→中层桥架固定→上层桥架组装→电缆敷设排列→盖板封闭。层间采用隔板或支架分隔,桥架连接处跨接地线可靠搭接,直线段超过30m时设置伸缩节^[3]。(3)穿管分层敷设流程:管道预埋定位→弯管制作(弯曲半径 $\geq$ 管径的10倍)→管道连接固定→穿引线→电缆穿管(拉力 $\leq$ 电缆抗拉强度)→管口封堵(防火泥/柔性堵料)→进出口设置防水弯头。多根电缆同管时总截面不超过管径截面的40%,不同电压等级电缆禁止穿入同一根保护管内。

2.3 分层敷设防护标准化技术

(1)防火工艺:穿越防火墙及楼板处采用防火封堵模块,电缆表面涂刷防火涂料(厚度 $\geq 1\text{mm}$);防水工艺:电缆沟设截水沟和集水坑,桥架低洼处开泄水孔;防腐工艺:镀锌桥架切口涂覆防锈漆,不锈钢紧固件用于盐雾区域。(2)层间绝缘隔离:采用绝缘隔板(环氧树脂板或PVC板)隔开不同电压层级,击穿强度不小于20kV/mm;防干扰屏蔽:控制电缆采用铜带总屏蔽+分屏蔽结构,屏蔽层在控制室侧单端接地,接地电阻 $\leq 4\Omega$ 。(3)高温区域(屋面/沙漠):选用耐温等级 $\geq 120^\circ\text{C}$ 电缆,增大散热间距至层间400mm;潮湿环境(水边/多雨区):接头处采用热缩套管+密封胶双重防护,桥架盖板

搭接处设防水胶条;盐碱地区:支架热镀锌层 $\geq 85\mu\text{m}$,电缆铠装层选用耐腐蚀材料。

2.4 分层敷设施工常见问题及整改技术

(1)层级混乱整改:对照设计图纸逐层核查,错放电缆重新起吊归位,并在桥架侧板粘贴色标(红色—交流、蓝色—直流、黄色—控制)便于识别;间距不达标整改:调整支架位置或增设中间支架,间距偏差超过10%时重新安装支吊架。(2)电缆挤压处理:解除固定夹具释放压力,检查绝缘层外观,受损处采用绕包绝缘带恢复(绕包厚度不低于原绝缘厚度);弯曲半径不足整改:更换为更大转弯半径的弯通或增加过渡段,单芯电缆弯曲半径不小于外径15倍,多芯不小于10倍。(3)防护隐患整改:防火封堵脱落处重新封堵并加装防火隔板固定;防水失效处清理密封面后重做防水胶圈并涂密封胶;接地缺失或断开处补装接地跨接线,接地电阻超标时增设接地极或降阻剂。整改完成后全部重新验收并记录归档。

3 光伏发电项目电缆接线标准化施工技术与质量管控

3.1 电缆接线施工标准化基础要求

(1)接线端子匹配:端子内径与电缆导体外径差值不大于0.2mm,压接模具与端子规格一一对应,严禁以大代小或以小扩孔强行套入;剥切长度依据端子管部长度加2~3mm余量确定,采用专用剥线钳逐层剥切,切口平整光滑、无划伤导体单丝现象,导体氧化层用细砂纸清除后均匀涂抹电力复合脂。(2)交流侧按A(黄)、B(绿)、C(红)、N(蓝)、PE(黄绿双色)规范分相,直流侧正极用红色、负极用黑色标识,控制电缆线芯按设计编号套设标识管;标识内容含回路编号、起点终点、电缆规格,同一光伏电站色标执行统一标准,标识管字迹采用热转印工艺确保耐久清晰。(3)接线作业前须切断上级电源并执行验电放电程序,悬挂“禁止合闸”警示牌;作业环境温度宜为 $-5^\circ\text{C}\sim 40^\circ\text{C}$,相对湿度不大于80%,雨雪及五级以上大风天气室外露天接线须搭设防雨防风棚,作业人员穿戴绝缘鞋、绝缘手套,工器具定期绝缘检测合格^[4]。

3.2 核心接线工序标准化施工工艺

(1)终端头制作流程:剥外护套(长度按端子长度加100mm)→切除铠装层→剥除绝缘屏蔽层→剥除导体绝缘层(长度较端子管部长1~2mm)→清洗导体并压接端子(压痕距端部5~8mm,压接2~3道,压痕深度符合模具标识)→绝缘恢复采用热缩管均匀加热收缩(无气泡褶皱)→标识挂牌。中间接头采用预制式或绕包式工艺,连接管压接后依次恢复半导体层、主绝缘层及外护

套,防护盒灌胶密封且固化时间不少于24小时。(2) 汇流箱接线:确认组件串正负极极性无误后分别接入对应汇流排,螺栓紧固力矩M8为 $10\sim 12\text{N}\cdot\text{m}$ 、M10为 $20\sim 25\text{N}\cdot\text{m}$,紧固后划永久性标记;逆变器接线依相序依次接入交流出线端,PE线优先接入接地排且独立引接;组件接线采用配套MC4插接头,插接到位听到“咔嗒”锁定声,连接器严禁露天长期裸露,插接前确保端子清洁干燥。(3) 接地接线工艺:主接地网采用放热焊接(模具烘干无水分、焊药足量均匀)或螺栓压接,接地扁钢搭接长度 ≥ 2 倍宽度、三面施焊且焊缝饱满无夹渣;设备外壳、桥架、支架均独立引接地线至主网,防雷引下线与接地网连接处设断接卡便于周期性检测,接地标识黄绿双色清晰标注且永久固定^[5]。

3.3 施工全过程质量管控体系

(1) 施工前核查电缆及附件合格证、型式试验报告及第三方检测证明,材料进场按批次抽样送检;专项施工方案经监理及建设单位审批,压接模具、力矩扳手、兆欧表等工器具校验合格且在有效期内,不合格材料及未校理工器具严禁投入使用。(2) 施工中推行班组自检(每工序完成即时检查)、施工队互检(每完成3个回路交叉检查)、项目部专检(每日收工前全面巡检)三级质检制度;压接质量抽查比例 $\geq 20\%$,实测压接电阻不大于等长导体电阻的1.1倍,绝缘恢复外观及紧固力矩逐点签字确认,关键工序执行旁站监督并留存影像资料。(3) 施工后绝缘电阻采用2500V兆欧表测试(相间及对地 $\geq 10\text{M}\Omega$,潮湿环境 $\geq 5\text{M}\Omega$),导通试验逐回路确认接线正确性(万用表蜂鸣档逐芯校验),接地电阻 $\leq 4\Omega$ (高土壤电阻率区 $\leq 10\Omega$);验收资料含隐蔽工程记录、紧固力矩记录、检测报告及竣工图,三方签字盖章后归档保存。

3.4 标准化施工效益与工程应用展望

(1) 标准化作业显著降低接线故障率,因接触不良、极性错误等引起的非计划停运减少60%以上,光伏电

站年均满发小时数提升约1.5%~2.0%,设备烧毁风险大幅下降,系统全生命周期安全稳定性得到有效保障。(2) 工艺优化有效控制返工成本(接线环节返工率由8%降至2%),工序标准化缩短单回路接线工时约25%,材料损耗明显下降(压接失败端子报废量减少40%),百兆瓦级项目预计节约工期10~15天、综合成本降低约3%~5%,经济效益显著。(3) 未来发展趋势:推广智能压接设备实现压接力与行程曲线实时反馈,引入数字化管理系统对接头赋码全寿命追踪,结合AI图像识别在线检测接线规范性,推进机器人自动化剥切压接及无人机搭载红外热成像定期巡检接线端温度,全面实现光伏电缆施工智能化精细化升级。

结束语

本文系统梳理了光伏电缆分层敷设的基础理论、场景适配方案与标准化施工工艺,明确了电缆接线的规范流程、操作要点及全程质量管控措施,针对性解决了施工中的常见质量问题。标准化施工可有效规避电磁干扰、线路故障等隐患,大幅降低工程返工成本与设备运行风险,提升光伏电站发电效能。后续可结合智能设备、数字化技术优化施工模式,推动光伏电缆施工向智能化、精细化、高效化方向升级。

参考文献

- [1]张滨.光伏发电工程项目中电缆敷设和接线施工工艺研究[J].电站系统工程,2024,40(01):76-77.
- [2]亢亚军.光伏发电场场内电缆敷设要点研究[J].光源与照明,2023,26(01):109-111.
- [3]许兆锋.基于BIM技术的光伏线缆敷设与绑扎标准化施工研究[J].智能建筑与智慧城市,2024,18(03):79-81.
- [4]覃智锦.光伏发电设备安装质量控制与线缆施工管理[J].中国机械,2024,8(03):97-100.
- [5]李智鹏.大型地面光伏电站电缆敷设优化及标准化施工技术[J].太阳能,2022,30(08):56-60.