

集中式光伏发电工程设计与施工过程中的质量控制与安全管理

朱叶峰

重庆梅溪河流域水电开发有限公司 重庆市 400000

DOI:10.12238/ems.v7i7.14221

[摘要] 集中式光伏发电工程设计与施工中的质量控制和安全管理需遵循全周期管理理念，结合工程特点采取差异化措施，风险预控体系构建，建立 HSE 管理矩阵，对高空作业（坠落系数 >0.85 ）、吊装作业（载荷率 $>80\%$ ）等实施动态风险评估。山地项目配置边坡位移监测系统，设定降雨量 $>50\text{mm}/24\text{h}$ 自动启动撤离预案。现场安全管控措施。实行“三区两票”制度（禁入区、作业区、材料区；动火票、电气操作票），配备 UHF RFID 人员定位系统。特种设备操作人员持双证（特种作业证+项目准入证）上岗，每日开展工具箱会议可有效控制集中式光伏电站全生命周期质量风险。

[关键词] 集中式光伏发电工程设计；质量控制；安全管理

集中式光伏发电施工过程质量控制方法需贯穿物料管理、施工工艺和检测验收全流程，结合工程特征形成标准化控制体系。

一、集中式光伏发电质量控制要点

1. 设计阶段质量控制。选址与地形适配性。采用三维地形测绘技术分析场地坡度与遮挡效应，确保方阵间距满足冬至日 3 小时无遮挡要求，山地项目需设置边坡支护结构并配置位移监测装置。柔性支架系统需结合风洞试验数据进行荷载模拟，复杂地形区域采用差异化桩基设计，坡度 $>15^\circ$ 时优先选用螺旋锚杆基础。组件选型与系统集成。选用高效单晶硅组件（转换效率 $\geq 22.5\%$ ），搭配智能优化器实现组串级 MPPT 追踪。直流侧配置电弧故障断路器（AFCI），交流侧采用多级防雷保护系统，接地电阻值控制在方阵区 $\leq 4\Omega$ 、升压站 $\leq 0.5\Omega$ 。

2. 施工过程质量控制。物料进场验收。组件到货开箱检查隐裂、色差缺陷，支架镀锌层厚度 $\geq 85\mu\text{m}$ ，电缆绝缘电阻测试值 $>100\text{M}\Omega\cdot\text{km}$ 。大件设备使用桁吊装卸，光伏板转运采用专用托盘，避免二次搬运损伤。支架安装精度控制。立柱垂直度偏差 $\leq 2\text{mm}/\text{m}$ ，导轨间距误差 $\pm 1.5\text{mm}$ ，紧固件扭矩按设计值的 $\pm 10\%$ 控制。焊接部位涂刷富锌底漆+丙烯酸面漆双重防腐，镀锌层受损区域喷涂冷镀锌修复剂。电气安装规范。MC4 连接器插接深度 $\geq 8\text{mm}$ ，直流端子压接拉力 $>200\text{N}$ ，

电缆弯曲半径 ≥ 8 倍外径。逆变器直流输入侧配置熔断器保护，相邻设备间距 $\geq 800\text{mm}$ 确保散热需求。

3. 设备调试与验收。系统联调测试。逆变器启动电压阈值偏差 $\leq \pm 2\%$ ，防孤岛保护动作时间 < 2 秒，并网谐波畸变率 $< 3\%$ 。采用红外热成像仪检测接线端子温升，温差 $> 15^\circ\text{C}$ 时判定为异常连接点。数据监测验收。电站监控系统与 SCADA 平台数据同步误差 $< 0.5\%$ ，辐照度传感器校准误差 $\leq \pm 2\%$ 。

4. 运维阶段质量保障。周期性巡检体系。季度巡检包含组件清洁度（透光率损失 $< 5\%$ ）、支架螺栓复紧（扭矩衰减 $< 15\%$ ）。年度检测涵盖绝缘电阻测试（ $\geq 1\text{M}\Omega$ ）、IV 曲线扫描（功率偏差 $< 3\%$ ）。故障预防机制。部署无人机巡检系统，热斑识别精度达 5cm^2 ，隐裂检测采用 EL 检测仪。建立腐蚀监测点，重点区域镀锌层厚度年损耗量 $> 8\mu\text{m}$ 时启动防腐维护。

二、集中式光伏发电设计施工关联

1. 选址评估与施工准备关联。地形适配性设计。选址阶段利用三维激光扫描获取 $\pm 5\text{cm}$ 精度的地形模型，设计时匹配施工机械作业半径与场地通行条件，山地项目需预留 $\geq 8\text{m}$ 的组件运输通道。复杂地形采用柔性支架系统设计，对应施工阶段需配置动态张力监测仪，确保支架安装拉力值控制在设计值的 $\pm 10\%$ 范围内。地质条件衔接。设计阶段岩土勘察深度 $\geq 15\text{m}$ ，施工时根据实测承载力调整基础桩型：承载力 $<$

80kPa 区域改用螺旋桩基础, 桩长增加 20%-30%。水域项目设计浮体结构时同步考虑施工船舶作业空间, 浮筒间距需预留 $\geq 1.5\text{m}$ 的安装操作空间。

2. 系统设计与施工工艺匹配。电气方案实施关联。设计阶段直流侧按 1.25 倍容配比配置组串, 施工中对应采用多通道 MPPT 逆变器, 单 MPPT 通道组件数量偏差 $\leq \pm 2$ 块。防雷接地系统设计 TN-S 制式, 施工时接地扁钢搭接长度 ≥ 2 倍宽度, 焊接处需进行 3 遍防腐漆涂刷。结构精度传导。支架系统有限元分析模型需预留施工误差补偿参数, 立柱垂直度允许偏差从设计值 3% 收紧至施工控制值 2%。双玻组件安装设计采用四点固定法, 施工时紧固螺栓需分三次加载扭矩 (30%、70%、100% 设计值)。

3. 施工动态反馈设计优化。BIM 技术联动。施工阶段通过三维扫描生成点云模型, 与设计 BIM 模型比对后自动生成偏差报告, 用于支架系统二次深化设计。电缆敷设路径动态优化: 根据实际施工进度调整桥架标高, 规避 ≥ 3 处的管线交叉冲突点。检测数据闭环。组件安装后 EL 检测发现隐裂率 $> 0.5\%$ 时, 反馈至设计端调整运输包装方案, 增加 EPE 缓冲层厚度至 5cm。支架应力监测数据超限时, 启动动态设计变更程序, 增加斜拉索构件数量或调整节点连接方式。

4. 多能互补设计与施工协同。农光互补整合。设计阶段预留农作物光照需求窗口期 (每日 9:00-15:00), 施工时支架高度调整为距地面 $\geq 2.5\text{m}$, 立柱间距匹配农机通行宽度。组件最低点离地间隙设计值 $\geq 0.8\text{m}$, 施工中通过激光测距实时校准, 防止农业机械碰撞。渔光互补适配。漂浮式系统设计锚固点间距 $\leq 15\text{m}$, 施工采用北斗定位系统布设, 位置偏差 $< 20\text{cm}$ 。箱变平台设计防洪高程时, 同步考虑施工期水位波动, 预留可调节式支架 $\pm 50\text{cm}$ 标高调节余量。

三、集中式光伏发电相关政策与法规

1. 项目分类管理。项目界定标准。集中式光伏电站指除分布式光伏外, 通过高压输电系统远程输送电力的项目, 单点并网容量原则上 $\geq 6\text{MW}$ 。需纳入省级及以上能源主管部门的光伏发电发展规划, 禁止未批先建。开发权授予。省采用竞争性配置方式授予开发权, 要求投资主体具备单项目 10 亿元以上注册资本或净资产。要求大型工商业分布式光伏转为集

中式项目时须向省级能源局申报审批。

2. 开发建设规范。选址约束。严禁占用耕地、生态保护红线和历史文化保护区, 优先利用未利用地及存量建设用地。山地项目需确保阵列区坡度 $< 25^\circ$, 水域项目浮筒间距 $\geq 1.5\text{m}$ 以适应施工需求。备案管理。备案后 2 年内未开工项目将被清理, 重大变更需办理备案变更手续。严禁以自然人名义备案集中式项目, 防止产权人账户套利行为。技术标准。新建项目必须配备“四可”功能 (可调、可控、可测、可支撑), 存量项目 2025 年底前完成改造。35kV 及以上接入项目需配置动态无功补偿装置, 确保功率因数 ≥ 0.9 。

四、集中式光伏发电安全管理措施

1. 施工安全管理。人员培训与资质管理。施工人员需完成光伏系统安全操作培训, 高空作业、电气作业等特殊工种须持证上岗, 施工前进行实操考核。建立党员安全监督岗, 每日抽查作业人员防护装备佩戴情况, 高风险工序实行“摄像头监控+安全员旁站”双控机制。高风险作业管控。高空作业设置防坠网和双钩安全带锚固点, 风力 ≥ 6 级或暴雨天气立即停工。有限空间作业实施“先通风、后检测、再作业”流程, 氧气浓度需保持在 19.5%-23.5% 范围。机械设备管理。起重设备作业半径内设置警戒区, 光伏板吊装采用专用防滑夹具, 单片吊装重量误差 $\leq 5\%$ 。电动工具绝缘电阻值每月检测, 漏电保护装置动作时间 ≤ 0.1 秒。

2. 运维安全管理。防火与生态防护。组件阵列区形成防火隔离带, 每年至少进行 2 次集中除草, 夏季每月无人机热成像巡检 1 次。林光互补项目组件最低点距地面 $\geq 2.5\text{m}$, 机械除草作业设备与立柱间距 $\geq 1.2\text{m}$ 。设施巡检维护。季度巡检包含支架螺栓复紧 (扭矩衰减 $\leq 15\%$)、接地电阻测试 ($\leq 4\Omega$) 及组件隐裂 EL 检测。暴雨前重点检查接线盒密封性, 老化胶条更换周期 ≤ 3 年, 排水通道坡度偏差 $< 2\%$ 。

3. 电气安全防护。设备安全设计。并网系统配置双级防雷保护, 逆变器直流侧配置 II 类冲击耐压保护器, 交流侧安装限压型 SPD。配电柜门锁采用五防联锁装置, 柜内温度监测精度 $\pm 1^\circ\text{C}$, 超温自动启动散热系统。操作规范。带电设备维护保持 $\geq 0.7\text{m}$ 安全距离, 绝缘手套每 6 个月进行工频耐压试验 (额定电压 10kV)。倒闸操作执行“双人监护制”, 操作

票错误率控制 $<0.5\%$ 。

4. 应急管理机制。预案体系。制定防台风、暴雨、雷击等9类专项预案,山区项目配备应急卫星通信设备。每季度开展防触电、火灾应急演练,响应时间控制在:初期火灾5分钟内、触电救援3分钟内。监测预警。部署智能监控平台,实时监测支架应力形变(阈值 $\pm 3\text{mm}$)、箱变油温(报警值 85°C)。暴雨预警启动后,2小时内完成排水系统疏通和设备防水包裹。

五、集中式光伏发电安全培训内容及要求

1. 核心培训内容。(1) 基础安全理论。电气安全。掌握电压等级划分(如直流侧电压 $\leq 1500\text{V}$ 的限制),学习接触电势差防护措施,了解电弧烧伤防护距离 $\geq 50\text{cm}$ 的规范要求设备特性。熟悉逆变器直流拉弧检测功能响应时间(<0.5 秒),掌握光伏组件隐裂热斑形成机理及红外检测方法。(2) 操作规范。作业流程。组件安装执行四点定位法,紧固螺栓扭矩误差 $\leq \pm 5\%$;高压设备验电须使用 10kV 级验电器,验电时间持续 ≥ 3 秒。特种作业。高空作业人员必须佩戴双钩安全带,锚固点间距 $\leq 8\text{m}$;有限空间作业实施“三检一测”(气体检测、通风检测、设备检查)。(3) 应急处理。事故处置。触电急救执行“黄金4分钟”原则,直流侧触电需先断开汇流箱再使用绝缘杆施救;光伏火灾使用D类干粉灭火器,喷射距离保持 $3\text{--}5\text{m}$ 。灾害应对。山地项目建立边坡位移预警机制(阈值 $\pm 3\text{mm}/\text{小时}$),水域项目配置防洪应急泵组(排水量 $\geq 100\text{m}^3/\text{h}$)。

2. 培训实施要求。(1) 对象分级。新入职人员。完成32学时基础培训(含8学时实操),通过闭卷考试(合格线85分)方可上岗。在岗人员。每年复训 ≥ 16 学时,新增储能系统操作等专项培训。(2) 培训方式。专项模块。采用“理论+VR模拟”培训模式,电气操作失误模拟场景覆盖率需达90%以上。实操考核。设置逆变器紧急停机操作(响应时间 ≤ 15 秒)、组串故障排查(定位误差 $\leq \pm 2\%$)等实操科目。

六、集中式光伏发电现场安全管理要点

1. 人员管理机制。责任分工。建立“党建安全责任区”制度,划分党员安全监督岗,实行“每日抽查+远程监控”的立体化监管模式,重点核查高危工序防护措施。业主单位牵头组织安全周例会,执行三级安全交底制度(项目负责人→

班组长→作业人员)。资质与培训。特种作业人员持证率需达100%,高空作业人员每季度复训并通过VR模拟操作考核。施工前完成安全防护装备穿戴实操演练(包括双钩安全带锚固点定位、绝缘手套气密性检测)。

2. 高风险作业管控。高空作业。脚手架承重标准 $\geq 300\text{kg}/\text{m}^2$,吊篮悬挂点抗拉强度 $\geq 8\text{kN}$,作业平台防护栏杆高度 $\geq 1.2\text{m}$ 。风力 ≥ 6 级时立即停止作业,撤离前完成光伏板临时固定(捆绑点间距 $\leq 2\text{m}$)。有限空间作业。执行“三检一测”流程:作业前检测氧气浓度(19.5%–23.5%)、有害气体浓度($\text{H}_2\text{S} \leq 10\text{ppm}$),强制通风时间 ≥ 30 分钟。配备应急逃生梯(承重 $\geq 150\text{kg}$)和救援三角架,作业区半径 5m 内禁止堆放物料。

3. 设备与环境安全。施工机械管控。吊装机械力矩限制器误差 $\leq 5\%$,光伏板夹具防滑系数 ≥ 0.4 ,每日作业前空载试运行3次。电动工具绝缘电阻值 $\geq 2\text{M}\Omega$,漏电保护器每周测试动作灵敏度(响应时间 ≤ 0.1 秒)。场地防护。山地项目设置边坡位移监测仪(精度 $\pm 2\text{mm}$),坡度 $>25^\circ$ 区域禁止堆放材料。水域项目浮筒间距 $\geq 1.5\text{m}$,防洪设施预留 50cm 调节余量,每日监测水位变化。

4. 防火与电气防护。防火隔离。组件阵列区每季度除草1次,防火隔离带宽度 $\geq 8\text{m}$,配置热成像无人机每周巡检。箱变周边设置防爆沙箱(容量 $\geq 2\text{m}^3$),灭火器材覆盖半径 $\leq 15\text{m}$ 。电气安全。高压验电器额定电压匹配设备等级(10kV级),验电时间持续 ≥ 3 秒。配电柜门锁采用五防联锁装置,柜内温度超 55°C 自动启动强制散热。

总之,控制体系可使工程质量合格率提升至98%以上,关键指标符合《光伏发电工程施工质量验收规范》要求。需重点关注山地项目桩基垂直度校正(激光定位精度 $\pm 0.1^\circ$)及高湿度地区电缆接头防水处理。

[参考文献]

[1]王海亮.集中式光伏发电工程设计与施工过程中的质量控制与安全管理探讨.2022.

[2]万家富.集中式光伏发电工程设计与施工过程中的质量控制与安全管理研究.2023.