山地分布式光伏支架设计研究及优化应用

王建兵

（中核华兴华南分公司阳江三山岛陆上集控中心项目部，广东 阳江 529500）

摘 要 “十四五”时期，我国“双碳”目标实现路径稳步落地，全国各地有序推进“双碳”的各项工作。传统化石能源污染较大，不可再生的弊端逐渐凸显，而太阳能具备清洁、可再生的优势，拥有非常广阔的应用前景和巨大的发展潜力。本文以某山地分布式光伏 EPC 项目为依托，再结合山地较复杂的地形特点，分析光伏支架、地基、接线、设备选型等核心的设计要点，对该分布式光伏 EPC 项目开展全流程优化管控，有效突破因山地特殊的施工环境带来的制约，旨在为大幅提升现场施工效率提供参考，最终实现该项目的提质增效、节能降碳目标。

关键词 光伏支架设计；地基处理；基础选型

中图分类号：TM615 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.27.041

0 引言

在丘陵山地光伏项目中，支架设计、施工与成本管理至关重要，这类场地多选用桩基基础搭配固定倾角支架。本文主要针对山地丘陵地形项目，探究地基处理、桩基选型与桩基长度优化，固定倾角式支架的倾角对标分析确定，整合逆变器支架结构，经技术验算证实优化可行。本文所采用的设计思路及优化措施适用于大型分布式光伏项目施工领域，尤其适用于地形复杂、地块分散且占地面积小、光照条件好的施工项目。

1 山地光伏支架基础选型

1.1 地基处理

（1）换填法：处理浅表层不良土质，用 3:7 灰土或级配砂石回填夯实，压实度≥ 97%，成本高、质量控制难度大；（2）强夯法：提升土体强度，仅适用于地势开阔区域，对施工温度与土体含水率要求高；（3）挤密法：成孔后夯填石灰土，优化土体结构、提升承载力，适用范围有限，对气温要求高[1]。

1.2 基础形式选型

现浇式基础土方开挖系数大、施工周期长、碳足迹高，山地项目淘汰率超 82%。当前主流为三大机械成孔体系：（1）机械钻孔灌注桩：桩径 Φ600 ～ Φ800，入中风化岩≥ 3D，混凝土水下 C35。适配复杂地层与陡坡作业，成孔快、环保，仅设备进场受地形限制；（2）螺旋钻孔灌注桩：适用于软至中硬地层，浅层施工便捷，遇卵石 / 岩层易卡钻，深度受限；（3）PHC 管桩：工厂预制、施工快、无泥浆污染，需大型设备，山地运输困难[2]。结合三种对比，旋挖钻孔灌注桩适配山地复杂地形，综合效益最优。

1.3 基础设计优化

项目支架设计使用年限 25 年，基础 50 年，抗震设防烈度 6°，固定倾角 20°，原设计桩长 2.5 m，结合地质重新验算优化[3]。场地土层含耕土、块石、黏土、中风化白云岩，各土层极限侧阻力、端阻力及抗拔系数按规范与勘测报告取值（如表 1 所示）。

2 山地光伏支架优化设计

支架按照 25 年结构重要系数取值 0.95，组件尺寸为 2 278 mm×1 134 mm×30 mm，单个光伏陈列（2×14 块组件）安装进行设计。

拟建项目采用了结构形式简单，施工难度相对较低的最佳倾角式固定支架，其上部由电池板、支架次梁、主梁、斜撑、立柱组成、根据《光伏发电站设计规范》附录 B 差（见表 2）得出拟建地区最佳倾角参考值[4]。还考虑山地地形条件下，山地光伏因地势异常复杂，山坡朝向各异、坡度各不相同，因此光伏方阵布置应满足各个地区，各子阵之间上午 9:00 ～下午 3:00 时间段内，前后左右互不遮挡原则优化设计。

引用规范文献并进行差值迭代计算法，考虑山地地形、施工安装难易程度，确定固定倾角式支架角度为 20°。（1）支架组串依山势顺坡向下依次布置；（2）因山体自遮挡效应显著，该区域在空间布局时被列为限制性用地；（3）依据坡向优先级序列（南坡→东南 / 西南坡→东 / 西坡→北坡）实施空间筛选，并通过坡

作者简介：王建兵（1989-），男，本科，工程师，研究方向：建筑工程、光伏工程。

表1 场地勘测岩土层主要物理力学指标建议使用值表

土层名称及代号	土层状态黏性土：I_L	桩型 钻孔灌注桩 桩的极限侧阻力标准值 Qsik（KPa）	桩的极限端阻力标准值 Qpk（KPa）	抗拔系数 λ	平均深度 m
耕土	/	/	/	/	0.36
②1块石	较硬岩	160	3 000	0.75	1.16
②2黏土	可塑	70	1 200	0.72	1.66
③中风化白云岩	较硬岩	260	6 000	/	
④中风化白云岩	较硬岩	280	7 000	/	

表2 摘录《光伏发电站设计标准（2024年版）》（GB 50797-2012）附表B

城市	纬度 Φ（°）	斜面日均辐射量（kJ/m²）	日辐射量（kJ/m²）	独立系统推荐倾角（°）	并网系统推荐倾角（°）
昆明	25.02	15 333	14 194	ϕ+0	ϕ-1
南宁	22.82	12 734	12 515	ϕ+5	ϕ-4
云南文山	23.92	14 034	13 355	ϕ+2.5	ϕ-2

度地形施工适应性分析排除高难度作业区域。

2.1 阵列方位角、倾角及间距设计

阵列方位角、倾角及间距是光伏产电能力至关重要的影响因素。(1)阵列方位角：在山地光伏排布设计时，主要有三种思路。一是我国处于北半球地区，房屋采光及光伏组件朝向大多面向正南方向区域；二是根据山地坡度自然地势顺坡布置；三是为了在日间AM9:00～PM5:00，尽可能多地布置组件朝向设置在最大光照强度出现时刻或太阳辐射量直射最大时刻；（2）方向倾角：由于山坡地形地质构造较为复杂，区块面积小，呈散落分布，要按照最优倾角布置后，既要满足太阳能组件最大限度地接受太阳直射辐射量，又要满足现场施工可行性，降低安装难度，可以遵循理论公式计算和“化零为整”的总体原则，全光伏区采用了统一陈列安装倾角；（3）组串之间间距：太阳能组串并联最小间距，使前后排、左右排组串之间互不遮挡。当太阳辐射量直射最大时，组串之间相互遮挡对发电组件输出功率影响大，当太阳辐射量直射弱而漫反射最大时，组串之间相互遮挡对发电输出功率基本无影响。因此需要统筹考虑各种因素：一是土地资源充裕，用地审批量大且过审率高时，可以适度加大组串之间间距，以此提升整个项目发电；二是土地资源匮乏，用地审批难度大且过审率不高时，按照项目规模装机容量，统筹考虑组串之间间距。

目前光伏阵列方位角、倾角及间距采用Pvsyst陈列建模进行模拟仿真设计，同时考虑项目整体成本、投资回报率、利润等多重因素进行设计计算，最终选定了统一固定式角度安装方案。

2.2 光伏组串接线设计

单个PV模块因输出电流/电压较低，需经串并联集成后方可并网。理想光照下，子方阵总功率等于各模块功率代数和；但当组件间存在遮挡、损坏或辐照差异时，异常模块会形成热斑，其输出功率下降并反向耗能，导致整体效率降低及设备损伤风险，从而降低整个子方阵发电效能。

热斑效应目前采用的是利用二极管的单向导通性，在组串接线旁边接入二极管。被遮挡的组件在低电流、低功率运行时，正常光照辐射组件产生的大电流会通过旁路的二极管导通，相当于被遮挡光伏组件此时处于短路状态，保护了组件，又不影响子方阵其他正常工作组件发电总功率，二极管压降低，损耗功率可以忽略不计。

当各个组件均正常工作时，电流均相等，旁路二极管处于截止状态，通过在各子阵旁路设计单向导通二极管，可有效解决山地光伏区子方阵间部分组件因遮挡而损坏其他组件，进而降低子方阵整体发电效能的问题。

为平衡阴影遮挡、线缆成本与山地施工适配性，光伏子阵列采用双竖排模块化布局，组串单元数≤2，并以C型回路连接模式构建低损耗电气网络，满足以下设计目标：阴影覆盖面积减少30%～40%；线缆总长度较传统星型布线可以节省25%以上；山地坡度适应性提升至35°。

2.3 逆变器选型设计

逆变器作为光伏厂区的核心设备，逆变器的选择影响到光伏系统发电效率光伏电站安全可靠性的运行。

以下参数指标为逆变器选型使用的关键：（1）宽域电压适应性光伏组串输出电压受辐照强度、气象参数及负载特性影响呈宽幅波动（±25%Vdc），要求设备具备动态电压匹配能力（DC 输入范围覆盖 Vmpp_min ～ Voc_max），并维持交流侧电压稳态误差≤ ±2%；（2）能效等级阈值：建立功率—效率分段标准。大功率型（＞ 100 kW）：额定负载 η ≥95%，低载工况（10%Pn）η ≥ 90%；中小功率型（≤ 100 kW）：额定负载 η ≥90%，低载 η ≥85%；能效测试需符合相应标准；（3）电能质量管控输出特性需满足并网同步要求：电压谐波畸变率（THDv）＜ 3%；频率波动范围 ±0.5 Hz；相位偏差＜ 1°；（4）动态 MPPT 优化：集成自适应 MPPT 算法（如扰动观察法 / 电导增量法），实现光伏阵列动态阻抗匹配，追踪精度≥ 99.5%，响应时间＜ 200 ms；（5）智能保护体系：构建多级防护机制。故障穿越：175%Un 持续 0.5 s 不脱网；功率限制：过载 110% 时自动调整工作点至 I-V 曲线安全区；保护模块：集成孤岛保护（UL 1741）、直流注入抑制（＜ 0.5%In）；（6）数字化监测架构：配置 RS485 以太网通信接口，支持 Modbus/TCP 协议，扩展外置传感器通道（辐照度、组件温度），数据采集周期≤ 1 s，满足 IEC 61850 规约[5]。

组串式逆变器主要适用范围较广，可用于用户、大、中、小型屋顶及地形复杂的丘地带等分布式电站以及大型荒漠电站。集中式逆变器只适用于大型荒漠电站。集散式逆变器的应用范围较广，集合了两种逆变器的方案特点，但此种逆变器在实际应用中较少，技术上较集中式逆变器和组串式逆变器成熟度低，故本工程目前暂不建议选用集散式逆变器；集中式和组串式逆变器都能满足电网接入的指标要求。在可靠性方面，组串逆变器防护等级高，故障影响面小；整体效率与发电量方面组串式可提升 3% 以上发电量；场地布置方面：本工程所处山地地形起伏较大，集中式逆变器占用平地面积较大，带来较高的场地平整和土方开挖费用；在初始投资方面：由于近几年组串式逆变器技术成熟，慢慢市场占有率扩大，设备价格有所下降，虽然逆变器设备成本比集中地单瓦造价高，但组串逆变器减少了相对的电缆和土建成本，与整体集中式逆变器方案建站成本几乎持平；在后期运维中组串式逆变器具有检测精度高，故障定位精确，配合智能化的管理系统更能实现智能化运维，可减少运维人员及运维成本，因此本项目建议选择组串式逆变器方案。

2.4 光伏支架的优化

由于选定逆变器方案为组串式逆变器，通过对安装逆变器位置的光伏支架进行了局部优化，通过在光伏支架底部增加了安装逆变器的双排横担支架，横担利用了光伏支架主梁，两端均采用抱箍固定的方式与支架立柱相连接。光伏支架底部加装逆变器进行优化时，还考虑以下相关问题：（1）为便于逆变器安装，同时考虑底部进风和后续维护，600 mm ≤底部距离≤ 800 mm。优化措施：后逆变器离地距离不小于 1.2 m；（2）底部空间需同时满足交流线缆垂直进入接线舱的要求。优化措施：底部空间预留 1.2 m，满足逆变器安装作业人员作业半径要求；（3）为了便于逆变器散热，保证最佳性能，不推荐多排交错、背靠背和靠墙安装。优化措施：逆变器安装时优先考虑逆变器通风散热，安装时逆变器周围通风距离及间距均大于 800 mm；（4）若逆变器安装在杂草场所，需要例行除草，以免影响底部进风或造成外部风扇损坏，否则需要对其安装下方地面做硬化处理，面积 3 m×3 m。优化措施：通过优化逆变器安装位置后，由于光伏支架前期施工时已对原地面进行了清表施工，后期光伏组件安装后，逆变器在太阳能光伏组件的下方位置，因此植物在光照不足的环境生长缓慢，后期通过周期性电站运维管理可以避免植被影响问题。

3 结束语

山地光伏项目因为其特殊的地理环境因素，施工建设难度相比平原、戈壁难度较大，本文通过对某山地光伏项目为例，从基础选型、支架结构以及设备适配等方向开展设计优化，选用合适山地地质的旋挖钻孔灌注桩，采用组串式逆变器和支架一体化安装方案，有效解决了地形问题、施工效率低等问题，通过设计方案的优化，可以有效提高施工效率，降低建设难度与成本，为同类项目提供有效参考。

参考文献：

[1] 周淑贞 . 气象学与气候学 [M]. 北京 : 高等教育出版社 ,1997.
[2] 河海大学 , 三峡大学 , 中国工程建设标准化协会 . 输电线路杆塔带翼板螺旋桩基础技术规程 (T/CECS1755-2024)[S]. 北京 : 中国标准出版社 ,2024.
[3] 中国建筑科学研究院 . 建筑结构荷载规范 (GB50009-2012)[S]. 北京 : 中国建筑工业出版社 ,2012.
[4] 上海电力设计院有限公司 , 中国电力企业联合会 . 光伏发电站设计规范 (2024 年版):GB50797-2012[S]. 北京 : 中国计划出版社 ,2012.
[5] 中国建筑科学研究院 . 建筑桩基技术规范 (JGJ94-2008)[S]. 北京 : 中国建筑工业出版社 ,2008.