

高海拔平单轴跟踪式光伏支架质量控制要点

卢江波¹ 刘继峰¹ 晏陈露¹ 吕 森¹ 李佩童²

1. 中建八局西南建设工程有限公司 四川 成都 615500

2. 川投(乡城)新能源有限公司 四川 甘孜藏族自治州 626000

摘 要: 高海拔地区独特的低气压、强紫外线辐射、大温差、强风沙等极端环境因素,对光伏电站的核心支撑结构——光伏支架,尤其是结构更为复杂的平单轴跟踪式支架,提出了前所未有的质量挑战。本文以典型的高海拔光伏项目(如甘孜乡城贡札项目,海拔3850m~4250m)为背景,系统性地剖析了高海拔环境对平单轴跟踪支架在材料性能、结构强度、电气安全、防腐防雷及施工运维等方面带来的特殊影响。在此基础上,从设计源头、原材料与设备采购、工厂制造、现场施工到运行维护全生命周期,深入阐述了各阶段的关键质量控制要点,并提出了针对性的技术对策与管理措施。旨在为高海拔地区平单轴跟踪光伏电站的高质量、高可靠性建设与长期稳定运行提供理论依据和实践指导。

关键词: 高海拔;平单轴跟踪支架;光伏支架;质量控制

引言

全球能源结构转型下,中国西部高原地区因太阳能资源丰富,成为大型光伏基地建设理想地。但这些地区普遍海拔高,形成独特“高海拔”生态环境,如贡札光伏发电项目场址海拔3850m至4250m。高海拔地区虽光照资源优越,但严酷自然环境对光伏电站设备尤其是光伏支架系统构成严峻考验。平单轴跟踪式支架因其能够通过单轴旋转跟随太阳东西向轨迹,能提升发电量,是大型地面电站主流选择之一,但因部件复杂,可靠性和稳定性风险更大,且高海拔环境下,低气压、强紫外线、巨大昼夜温差、频繁强劲风荷载等进一步放大了这种风险。因此,确保高海拔平单轴跟踪式光伏支架在设计寿命内安全、稳定、高效运行是项目成败关键,需超越常规思维,建立全生命周期、针对特殊工况的精细化质量管理体系。本文将详述其质量控制要点。

1 高海拔环境对平单轴跟踪支架的特殊影响

1.1 低气压(空气稀薄)的影响

海拔每升高1000米,大气压力约下降12%。在4000米海拔,大气压力仅为海平面的60%左右。这直接导致:

(1) 散热能力下降,空气密度降低,对流换热系数减小,使得支架上的驱动电机、控制器等电气设备散热困难,工作温度升高,加速绝缘材料老化,缩短元器件寿命,甚至引发过热保护停机或烧毁。(2) 电气间隙与爬电距离要求提高,空气绝缘强度随气压降低而减弱。为防止电气设备在高电压下发生击穿放电,必须增大电气部件间的间隙和沿绝缘表面的爬电距离,这对电气设备的选型和布局设计提出了更高要求。

1.2 强紫外线辐射的影响

高海拔地区空气稀薄、洁净,对太阳紫外线的吸收和散射作用减弱,导致地表紫外线辐射强度远高于平原地区。强烈的UV辐射会:(1) 加速材料老化,对于支架系统中使用的电缆护套、密封圈、传感器外壳等高分子聚合物材料,会导致其变脆、开裂、粉化,丧失原有的机械和绝缘性能^[1]。(2) 破坏防腐涂层,普通的油漆或粉末涂层在长期强UV照射下容易失光、粉化、剥落,使其失去对金属基材的保护作用,加速腐蚀进程。

1.3 大温差与低温的影响

高海拔地区普遍具有“一天有四季”的气候特点,昼夜温差极大,冬季极端低温可低至-30℃甚至更低。这种剧烈的温度变化带来:(1) 材料冷脆性,普通碳钢在低温下韧性急剧下降,变得脆硬,抗冲击能力减弱,在遭遇强风或冰雹等外力时,易发生脆性断裂。(2) 热胀冷缩应力,巨大的温差导致金属构件反复膨胀收缩,若结构设计不合理或连接方式不当,会在焊缝、螺栓连接处产生交变应力,引发疲劳裂纹。(3) 润滑失效,低温会使常规润滑油/脂粘度剧增甚至凝固,导致转动轴承、齿轮等运动部件卡滞,增加驱动电机负载,甚至造成系统无法正常跟踪。

1.4 强风与风沙的影响

高原地区地势开阔,缺乏遮挡,常年风力强劲,且常伴有风沙。这对支架构成直接的力学挑战:(1) 风荷载增大,根据相关规范,高海拔地区的风压高度变化系数和体型系数需进行修正,实际风荷载可能远超常规设计值。平单轴支架在不同跟踪角度下,迎风面积和风阻系

数变化很大,尤其在大风预警模式下的“抗风姿态”设计至关重要。(2)风沙磨蚀,携带沙粒的强风会对支架表面、转动部件、传感器镜头等造成持续的磨蚀,破坏表面光洁度和防护层,影响设备精度和寿命。

1.5 其他因素

(1)运输与施工困难,高海拔地区交通不便,大型构件运输受限;同时,缺氧环境对现场施工人员的身体素质和工作效率构成挑战,间接影响施工质量。(2)冻土问题,部分高海拔地区存在季节性冻土或多年冻土,对支架基础的稳定性构成威胁,可能导致不均匀沉降。

2 全生命周期质量控制要点

针对上述特殊影响,必须将质量控制贯穿于项目的全生命周期,形成闭环管理。

2.1 设计源头控制

2.1.1 精准的环境数据输入与分析

设计工作的起点是对项目所在地自然环境的精准把握。必须收集并分析至少十年以上的当地气象历史数据,包括但不限于极端最大风速及其主导风向、历史最低与最高气温、年均紫外线辐射指数、最大积雪深度、地震基本烈度等关键参数。这些经过统计分析的真实数据,是后续所有针对性设计决策的根本依据,任何脱离实际环境数据的“经验主义”设计都可能为项目带来灾难性后果。

2.1.2 针对性的结构与材料设计

主承力结构应优先选用Q355及以上牌号的低合金高强度结构钢,并在技术规格书中明确要求其在-40℃低温下的冲击功(Akv)必须满足国家标准,以从根本上保证材料的低温韧性,防止脆断。在抗风设计方面,应摒弃简单的查表法,转而采用计算流体动力学(CFD)数值模拟技术,精确分析支架在0°至90°全角度范围内的风荷载分布和气动稳定性,从而优化杆件截面、壁厚及布置形式^[2]。尤为重要的是,必须设计一套逻辑严密、响应迅速的大风保护策略,确保当风速传感器检测到风速超过安全阈值时,控制系统能立即指令所有支架单元在极短时间内同步旋转至预设的、经过CFD验证的最稳定抗风角度,并通过可靠的机械或电磁方式锁定,以抵御强风的正面冲击。

2.1.3 电气与防护系统专项设计

电气系统设计要充分考虑高海拔特殊性。户外电气设备外壳防护等级不低于IP65,关键设备建议达IP67或更高;电气绝缘按高海拔修正系数核算并加大电气间隙和爬电距离,必要时选专用元器件;电子元器件选工业级宽温域产品。防护上,防腐采用热浸镀锌,锌层平均

厚度不低于80微米,有更高要求用重防腐涂层体系且通过2000小时QUV测试;防雷构建完整体系,确保接地电阻值小于10欧姆。

2.2 原材料与设备采购控制

2.2.1 供应商筛选与资质审查

应优先选择那些拥有在类似高海拔、高寒、高风沙等严苛环境下成功交付光伏支架项目业绩的制造商。对其生产规模、质量管理体系认证(如ISO9001)、技术研发能力和售后服务网络进行全面评估,确保其具备满足本项目特殊要求的综合实力。

2.2.2 编制详尽的技术规格书

一份清晰、量化、无歧义的技术规格书(Specification)是采购成功的保障。在招标和采购文件中,必须清晰、量化地写明所有针对高海拔环境的特殊要求,如材料的低温冲击韧性、涂层的QUV老化测试小时数、电气设备的高海拔认证证书(如GB/T 20641或IEC 60060-1)、电机的宽温域工作范围等。

2.2.3 严格的入厂与到货检验

对到货的钢材、紧固件、电机、控制器、电缆等关键物料,除常规尺寸、外观检查外,必须进行专项检测。例如,对钢材进行材质光谱分析和力学性能复验;对涂层进行厚度和附着力测试;对电机进行高低温循环和湿热老化试验。

2.3 工厂制造过程控制

2.3.1 焊接与装配工艺管控

对于以焊接为主要连接方式的钢结构支架,必须建立完善的焊接质量控制体系。所有焊接工艺都需事先完成焊接工艺评定(WPS/PQR),焊工必须持有效的特种作业操作证上岗。在生产过程中,质检人员应对所有主受力焊缝进行100%的外观检查,杜绝咬边、气孔、夹渣等缺陷,并按规范要求的比例对关键焊缝进行超声波(UT)或磁粉(MT)无损探伤,确保内部质量^[3]。在装配环节,必须使用高精度的工装夹具来保证主梁、扭矩管、立柱等大型构件的相对位置精度,特别是轴承座的同轴度和驱动连接点的位置公差,这些都直接影响到支架转动的顺畅性和长期运行的稳定性。

2.3.2 防腐处理与成品保护

无论是热浸镀锌还是喷涂,都必须对前处理(脱脂、酸洗、磷化等)进行严格监控,确保钢材表面达到Sa2.5级或St3级的清洁度和粗糙度要求,这是保证镀层或涂层附着力的前提。在镀锌槽或喷漆房内,要实时监控工艺参数,确保最终形成的防护层厚度均匀且达标。产品完成后,必须采取有效的成品保护措施,如使用专用

护角、缠绕膜包裹易损部位,并在装卸和运输过程中轻拿轻放,避免任何可能损伤防腐层的磕碰和刮擦。

2.3.3 出厂前的功能测试

在支架部件发往现场之前,应在工厂内进行必要的功能测试。对于完整的跟踪单元或关键分段,应通电模拟其转动过程,检查从 0° 到 90° 的全程是否平稳、无异响,限位开关是否能准确触发,驱动电机的电流曲线是否正常。这一步骤可以在工厂受控环境下提前发现潜在的装配或部件质量问题,避免将故障带到遥远且条件艰苦的高海拔施工现场,从而大大节省后期的返工成本和时间。

2.4 现场施工与安装控制

2.4.1 基础工程的质量保障

在高海拔地区,混凝土的浇筑和养护面临低温、大风等不利条件。必须严格控制混凝土的配合比,必要时掺加防冻剂,并采取有效的保温保湿措施(如覆盖棉被、搭设暖棚)进行养护,确保混凝土强度能按预期发展。对于存在冻土的区域,基础设计必须深入到最大冻结深度以下,或采用其他工程措施(如换填、保温板隔离)来消除冻胀力的影响,防止基础因冻融循环而发生位移或破坏。

2.4.2 高精度的测量与放线

必须使用高精度的全站仪或RTK GPS进行全场控制网的建立和桩位的精确放样。在立柱安装过程中,要随时用水准仪和经纬仪校核其垂直度和顶面标高;在安装扭矩管时,要确保同一跟踪单元内所有立柱上的轴承座中心点在一条直线上,以保证扭矩管能顺畅转动^[4]。任何微小的安装偏差,在长达数百米的阵列长度上都会被累积放大,最终导致系统卡滞或磨损加剧。

2.4.3 规范化的安装作业流程

所有高强螺栓的紧固必须使用经过校准的扭矩扳手,严格按照设计规定的扭矩值分初拧、终拧两步进行,并做好防松标记。严禁在现场随意替换未经认证的普通螺栓。电气接线必须由专业电工完成,电缆敷设要留有“ Ω ”形余量以适应热胀冷缩,所有接线端子必须压接牢固,防水接头必须按厂家说明正确安装以确保密封。接地系统是生命线,所有支架立柱、电气设备外壳都必须通过焊接或专用端子可靠地连接到主接地网上,形成一个完整的等电位体。此外,必须使用项目规格书中指定的、适用于当地极端低温的特种润滑脂,对所有

转动轴承和齿轮进行足量、均匀的加注。

2.5 调试验收与运行维护控制

2.5.1 全面的系统调试与性能验收

调试工作应先从单机开始,逐台检查支架的转动灵活性、传感器信号反馈的准确性以及驱动系统的响应速度。随后进行联动调试,模拟晴天、阴天、大风、雨雪等各种工况,验证整个跟踪阵列的动作逻辑是否正确、协同是否一致。在试运行期间,应采集实际发电数据,并与基于当地气象数据的理论发电量模拟结果进行对比分析。只有当系统功能完备、性能指标达标,才能签署最终的验收文件。

2.5.2 制定并执行预防性维护计划

应依厂家建议和当地气候,制定年度预防性维护计划。计划含定期全面巡检,极端天气后重点查支架结构、螺栓、转动部件;建立润滑保养周期,补充或更换老化润滑脂;每年评估防腐涂层,修补破损处;对电气系统,定期清洁散热片、紧固电气连接,用专业仪器测接地电阻和SPD状态,确保良好运行。

3 结语

高海拔平单轴跟踪式光伏支架质量控制是系统工程,需项目各方树立全生命周期质量意识,理解高海拔环境复合挑战,将针对性措施融入各环节。本文以甘孜乡城贡札等项目为背景,梳理低气压、强UV等因素对支架系统的影响,提出设计、采购等五大阶段质量控制要点,核心是“预防为主、源头控制、过程精细、持续改进”。全方位精细管理可规避风险,确保支架可靠稳定发电。未来,新材料等发展将推动其质量控制水平再上新台阶。

参考文献

- [1]覃妍妍,陈海东.光伏电站平单轴跟踪系统支架安装关键技术[C]//中国土木工程学会总工程师工作委员会.中国土木工程学会总工程师工作委员会2021年度学术年会暨首届总工程师论坛会议论文集.广西建工第五建筑工程集团有限公司,2021:323-326.
- [2]顾文兵,杨福胜.基于单轴跟踪式光伏支架的光伏阵列优化设计[J].太阳能,2024,(12):97-104.
- [3]王志豪,牛宝峰.光伏跟踪支架技术分类与典型产品对比研究[J].电站系统工程,2026,42(02):67-69.
- [4]王龙威,李如,豆红强,等.平单轴光伏跟踪支架-基础受荷特性与优化设计[J].太阳能学报,2024,45(10):345-353.