

风电场吊装作业安全操作规范优化研究

刘夏青

国核电力规划设计研究院有限公司 北京 100095

摘要: 风电工程吊装作业多处于野外复杂场地, 高空重载施工模式存在较高安全管控难度。野外多变环境、设备运行状态及人员操作方式都会影响施工稳定性, 现有安全操作规范对特殊工况的适配能力存在明显不足。本文结合风电场吊装的场景特征与作业特点, 系统梳理现场施工存在的安全隐患及偏差产生的各类成因, 从场地布设、工序流程、人员行为、特殊工况四个维度完善优化方案, 能够有效补齐规范体系短板, 提升风电吊装作业的整体安全管控质量。

关键词: 风电场; 吊装作业; 施工安全; 操作规范; 现场管控

引言: 风电行业规模化建设进程持续推进, 大型风电设备吊装施工频次稳步提升, 野外特殊作业场景给现场安全管理带来全新挑战。吊装作业具备高空、重载、高动态风险的施工属性, 环境波动、设备磨损锈蚀及不规范操作都会诱发安全问题。传统通用操作规范难以完全适配复杂山地、强风天气等特殊施工场景, 管控漏洞容易转化为现场施工隐患。完善吊装安全操作规范体系, 细化全流程作业管控标准, 可以有效规避施工风险, 保障风电场建设施工平稳推进。

1 风电场吊装作业场景与操作特征分析

1.1 风电场吊装典型施工场景分类

风电场建设选址多分布于山地、丘陵、旷野等开阔区域, 施工场景依托场地地形条件呈现明显区分。山地风场施工区域地势起伏较大, 作业平台平整范围有限, 吊装设备布设空间受到地形约束。丘陵风场坡面错落, 施工区域分散, 机组点位跨度较远, 场内转运与吊装作业的衔接节奏更为分散。平原旷野风场作业空间开阔, 但大面积露天场地缺乏遮挡, 外界气象条件对施工开展的影响更为直接^[1]。不同场地的地形条件、作业空间与施工布局存在明显差异, 施工场景的差异化特点, 对吊装作业的实施方式、设备布置和安全管控模式形成直接约束。

1.2 大型风电设备吊装工艺特征

风电吊装主要针对塔筒、机舱、轮毂、叶片等超大尺寸、超大重量构件开展作业, 单件构件体积庞大、重心偏高, 吊装过程稳定控制难度较大。整体施工多采用分段吊装、逐级对接的作业模式, 工序衔接紧密, 单步操作精度会影响整体安装质量及安全。部分风机构件外形不规则, 叶片等设备受风面面积大, 空中姿态容易出现偏移晃动, 对吊装操作的精细程度有着较高要求。吊

装工艺执行流程具备较强的系统性, 每一段吊装有对应的操作步骤与姿态控制要求, 施工过程需要保持平稳、缓慢的作业节奏, 规避突发位移引发吊装安全事件。

1.3 野外风场作业环境独有特征

野外风场远离城区遮蔽建筑, 空域气流流动不受限制, 现场风速、风向变化频繁且无规律, 容易干扰高空吊装构件的稳定状态。山地、高地风场昼夜温差明显, 晨间雾气、夜间低温等天气现象会改变现场作业条件, 降低人员设备操作的精细度。部分施工场地土质松软, 长期露天暴晒、雨水冲刷会改变地基承载状态, 吊车支腿受力环境存在不确定性。复杂多变的野外环境, 持续对吊装设备运行、构件姿态控制和现场安全作业形成强力外部干扰。

1.4 风电场吊装安全作业运行特征

风电场吊装多为高空重载作业, 作业高度跨度大, 人机交叉施工现象普遍, 现场安全管控压力突出。作业流程具备动态变化属性, 构件起升、空中悬停、对位落装各阶段风险点存在明显区别, 不同作业阶段的管控重点互不相同。高空作业人员操作视野受限, 地面指挥、设备操作与高空配合的衔接紧密, 操作细节偏差容易放大安全风险。全过程作业状态易受环境、设备、人工操作等多方面影响, 运行状态动态波动明显, 让风电场吊装安全作业具备更高的管控难度与专项作业属性。

2 风电场吊装作业现有安全操作规范体系

2.1 吊装设备进场布设操作规范

风电场吊装作业依托大型起重设备开展施工, 设备进场与场地布设是保障作业平稳推进的基础环节。现有操作规范针对起重设备、辅助吊装设备的进场核验划定明确操作要求, 聚焦设备整机状态、关键构件完好程度、机械运行性能开展进场核查工作。规范对作业场地

处理、起重设备站位选址、支腿铺设加固等环节设置标准化操作要求,结合风场地形特点划定设备布设区域。明确场地平整压实、垫层铺设、承载力核验的实施标准,规避松软场地、坡面地形带来的设备倾斜、沉降问题。整套布设规范围绕设备稳定就位展开,为后续高空重载吊装作业筑牢前期施工基础。

2.2 主体设备吊装工序操作规范

风电塔筒、机舱、叶片等核心构件的吊装工序,拥有成套规范化操作流程约束施工行为。现有规范覆盖构件起吊、空中转运、姿态调整、对位安装、落位固定等全施工环节,细化每一道工序的操作标准与施工要求。针对大型部件、大受风面积构件,规范限定起吊速度、空中停留状态、对位调整幅度,减少构件晃动、偏移引发的施工问题。明确构件对接校准、紧固固定的操作步骤,统一工序施工的质量与安全把控尺度,规避粗放施工带来的安装偏差与作业隐患,适配风电设备高精度吊装的施工需求。

2.3 现场人员岗位作业操作规范

风电场吊装现场岗位分工明确,不同作业岗位对应专属的操作约束标准。现有人员作业规范针对起重操作人员、高空安装人员、地面指挥人员、现场值守人员制定专项作业准则,明确各岗位的作业范围与操作边界。规范约束现场人员上岗操作条件、作业行为标准、工序配合要求,杜绝违规操作、随意简化作业流程等行为^[2]。针对高空作业、重载操作等高危岗位,细化作业过程中的操作禁忌与行为约束,规范人员作业姿态、操作动作与现场配合方式,提升整体作业行为的规整性与安全性。

2.4 吊装现场安全防护操作规范

野外风电场吊装作业风险因素繁杂,现场安全防护规范针对作业环境与施工风险搭建完整防护体系。现有规范明确现场隔离区域划分、危险区域围挡设置、警示标识布设的操作标准,阻隔无关人员进入高危作业范围。细化高空防护设施、设备安全防护装置的布设与使用要求,规范防护用品的佩戴与使用方式。针对大风、低温、雾气等常见野外不良工况,划定现场防护调整标准与作业管控要求。系统化的现场防护规范能够有效规避各类外在施工风险,搭建稳定安全的野外吊装作业环境。

3 风电场吊装作业安全隐患与操作偏差成因

3.1 复杂野外环境带来的作业隐患

风电场施工选址多为山地、旷野、丘陵等开阔区域,场地无固定遮挡结构,整体施工环境具备极强的不确定性。自然空域气流活动复杂,风速、风向会出现无

规律变化,突发阵风会直接作用于叶片、塔筒等大截面吊装构件,引发构件空中晃动、姿态偏移,大幅提升高空对位安装的操作难度。山地场地地形起伏错落,平整施工工作面稀缺,多处作业区域地基土质松散,压实程度不足,无法为大型起重设备提供稳固支撑。

3.2 吊装设备运维与操作的风险诱因

风电吊装施工依托大型起重机械、专用吊索具等设备开展,设备运行状态直接决定施工现场的安全等级。各类施工设备长期露天摆放,持续经受风雨、温差、风沙侵蚀,机械传动结构、制动部件及吊具会产生不可逆的磨损老化。日常检修养护工作流于形式,细微设备损耗难以被及时发现和处理,长期积累会转化为设备运行故障。施工阶段容易出现机械卡顿、制动不稳、受力失衡等问题,严重干扰吊装作业平稳推进。设备前期调试工作粗放随意,运行参数未结合场地工况、构件重量灵活调整,容易造成设备超负荷运行,持续滋生各类施工安全隐患。

3.3 人员作业行为不规范的隐患来源

风电高空重载吊装对操作精细度要求极高,施工全程容不得粗放操作与流程简化。一线作业人员长期从事同类施工,容易依赖固有施工经验开展作业,对现行标准化操作流程重视程度不足。部分人员对风电吊装高危属性认知不足,主观弱化施工风险,随意删减作业步骤、放宽施工管控标准。构件起吊姿态调整、空中精准对位、落地固定锁紧等关键环节,细微的人为操作误差会持续叠加,造成构件安装偏移、衔接不密实等施工问题。不规范的操作行为隐蔽性强,短期难以察觉,会持续降低施工现场安全冗余,积累各类隐性安全风险。

3.4 现行规范适配性局限成因

目前通用的吊装安全操作规范,仅能适配常规平地、常规设备的基础吊装施工场景,面对复杂风场施工条件存在明显短板。规范编制参考常规施工工况,针对山地陡坡、狭小作业平台、高频强风等特殊施工场景的专项管控内容较为匮乏。风电设备持续迭代升级,大尺寸轻量化构件广泛应用,构件吊装受力特性、空中运行状态发生改变,传统规范标准无法适配新型施工需求。通用化的规范条款内容宽泛笼统,缺少极端天气作业、特殊构件吊装的细化管控细则,现场施工管控缺少精准依据,无法有效约束非标作业行为,持续引发各类吊装操作偏差与安全问题。

4 风电场吊装作业安全操作规范优化路径

4.1 现场场地布设规范优化

野外风场复杂的地形与场地条件是影响吊装安全的

核心外部因素,针对性优化场地布设规范能够从源头规避环境带来的施工隐患。结合不同风场的地形特征制定差异化场地布设标准,细化山地、丘陵、旷野等不同场地的平整压实要求,明确起重设备作业区域的地基处理标准。对松软土质区域增设垫层铺设、地基加固等施工要求,提升作业场地整体承载能力,杜绝设备沉降、倾斜等问题。细化高危作业区域的划分标准,明确围挡隔离、警示标识布设的范围与布设要求,阻断无关人员进入施工区域。完善场地排水、防风、视线通透等配套布设要求,针对雾气、阴雨、大风等常见天气工况增设场地防护细则^[1]。精细化的场地布设标准可以适配各类野外施工场景,为吊装作业打造稳定、安全的施工环境。

4.2 设备吊装工序规范优化

风电吊装涉及的塔筒、机舱、叶片等构件体积庞大、受风面积宽阔,通用化的传统工序标准无法适配精细化、高难度的野外施工需求。依据各类构件的外形结构、自重荷载与空中受力特点,拆解细化吊装全流程施工步骤,制定分类、分层的专项工序操作标准,对每台风机吊装步骤进行差异化分析调整。施工前期落实设备整机调试与参数校准工作,结合现场地基荷载、构件自重、空域气流状态灵活调整设备运行参数,摒弃固定参数套用的粗放作业模式,减少硬性参数匹配不当产生的施工偏差。优化高空构件姿态调控模式,增设小幅度、慢节奏的动态微调操作要求,削弱野外气流扰动对构件稳定性的干扰。细化构件空中对位、精准对接、锁紧固定、质量核验以及设备有序撤场的各项操作细节,补齐工序衔接阶段的管控漏洞,让每一项施工操作都有明确执行依据,稳步提升吊装工序的标准化施工质量。

4.3 人员作业行为规范优化

现场人员不规范的操作行为,是风电吊装施工安全隐患滋生的核心诱因。完善人员作业行为规范,能够从人为管控层面减少施工失误,提升现场作业的规整度与安全性。针对吊装指挥、起重司机、高空安装等特种作业人员、辅助人员及现场安全监护等不同作业岗位,梳理细化专属操作准则与作业禁忌,明确各岗位的施工管控重点与操作边界。彻底摒弃依托老旧施工经验开展作业的粗放模式,纠正行业中长期存在的习惯性不规范操作。搭建常态化岗前实训机制,围绕新型风机机型吊装设备操作技巧及安全注意事项、大型风电构件施

工工艺、作业现场复杂野外场景作业要点开展针对性技能与安全管控教学,持续夯实一线作业人员的实操水平与风险辨识能力。强化施工现场全过程动态安全管控,严格约束随意简化工序、粗放操作、违规作业等不良行为,对违章作业行为及时制止,对违章人员及时进行教育学习,对屡教不改者及时进行清退,让现场所有施工动作都遵循标准化流程有序开展。

4.4 特殊工况专项规范优化

现行吊装规范大多基于平地常规施工场景编制,针对复杂野外特殊工况的管控条款较为匮乏,管控覆盖范围存在明显短板。针对山地陡坡、狭窄作业平台、高海拔强风区域等特殊施工场地,补充专属的吊装操作细则,填补特殊地形施工的管控空白。适配风电设备大型化、轻量化的行业发展趋势,结合新型构件的材质特性、受力规律与空中运行状态,更新对应的吊装操作管控标准,适配全新的施工工况。明确大风、浓雾、高温、阴雨等恶劣天气的作业启停判定标准,细化特殊天气下的设备防护、构件管控与现场防护操作要求。不断补充特殊工序的精细化管控内容,搭建可以覆盖常规场景与复杂特殊工况的完整规范体系,全面提升各类野外风场吊装作业的安全管控水平。

结束语

风电场吊装作业的复杂场景与动态风险特性,让常规施工规范难以实现全面有效的安全管控。通过梳理吊装作业的场景特征与工艺属性,总结环境、设备、人员及规范体系层面的各类问题,针对性搭建多维度的规范优化体系。细化场地布设标准、工序操作流程、人员行为准则及特殊工况管控要求,补齐现有制度的适配短板。规范化、精细化的作业标准可以有效减少施工偏差,消除隐性安全隐患,切实提升风电场吊装施工的安全稳定性与规范化水平。

参考文献

- [1]黄辉,徐浩,胡红亮,等.基于AHP-模糊综合评价法的海上风电场施工吊装作业安全风险评价[J].工业安全与环保,2023,49(11):15-19.
- [2]胡灵华.高山风电场风机吊装施工方案及管控要点分析[J].江西电力,2023,47(6):58-62.
- [3]张静.风电机组安装工程专项施工安全管控措施[J].云南水力发电,2025,41(12):175-179.