

大型双馈风力发电机组吊装项目的管理与控制研究

杜春

国电联合动力技术有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i5.16609

[摘要] 大型双馈风力发电机组吊装项目是风电工程建设的关键环节,其管理控制直接影响工程施工安全。基于此,本文将国内某山地风电项目作为主要研究对象,注重研究双馈机组吊装施工,系统总结了塔筒、机舱、叶片等大型构件的现场吊装技术方案。通过优化吊装工艺、加强大型履带吊机资源配置、实施全过程风险控制、数字化施工管理,有效应对高风速、复杂地形等挑战,全面保障了发电机组吊装精度。研究成果为大容量风电机组的高效、安全吊装提供了系统性技术支持,有助于提高风电工程建设水平。

[关键词] 大型双馈风力发电机组; 吊装项目; 管理; 控制

中图分类号: TB857+.3 **文献标识码:** A

Research on Management and Control of Lifting and Installation Projects for Large Doubly-Fed Wind Turbines

Chun Du

GUO DIAN UNITED POWER TECHNOLOGY COMPANGY LTD

[Abstract] The lifting and installation of large doubly-fed wind turbines is a critical phase in wind power project construction, and its management and control directly affect construction safety. Based on this, this study takes the 130 MW wind power project at Maguo Liangzi in Xide County, Liangshan Prefecture as the main research object, focusing on the lifting and installation of doubly-fed wind turbines. It systematically summarizes the technical solutions for the on-site hoisting of large components such as tower sections, nacelles, and blades. By optimizing lifting processes, enhancing the allocation of large crawler cranes, implementing full-process risk control, and adopting digital construction management, challenges such as high wind speeds and complex terrain were effectively addressed, ensuring the precision of turbine installation. The research findings provide systematic technical support for the efficient and safe lifting of high-capacity wind turbines, contributing to the advancement of wind power engineering construction.

[Key words] Large doubly-fed wind turbines; Lifting and installation project; Management; Control

1 前言

随着机组单机容量向6MW级以上进行快速发展,塔筒高度突破110米,叶轮直径超过190米,机舱、叶片等构件呈现超长、超重、大惯性等特征,吊装作业面临风载扰动、空间受限、吊装窗口期短等一系列挑战。而双馈机组由于其具有机舱结构复杂、重心分布特殊等特征,对于吊具选型、吊点布置、姿态控制提出了更高精度要求。在实际施工中,工作人员要综合考虑设备运输路径规划、现场拼装平台布置、大型履带式起重机选型、站位优化、气象条件监测、吊装工艺仿真、动态调整等方面因素,制定科学的施工组织设计,精细化发电机组吊装过程控制,开展数字化协同管理,是保证超大型风电设备高效就位的关键点。因此,深入研究其吊装技术体系和管理控制机制,对于提高我国大容

量风电工程建设水平具有重要价值。

2 工程概况

大型双馈风力发电机组吊装项目以国内某山地风电场吊装项目为背景,该项目安装单机容量6.25MW风电机组,其风轮直径达205米,轮毂中心高度115米,叶片单支长度近百米,属于典型的超大型双馈机组。目前,机组由塔筒、机舱、轮毂、叶片等大型部件构成,吊装作业对于起重设备性能、施工工艺精度、现场组织协调能力提出了较高要求,项目场址地形起伏,施工平台需要经过精细化平整,全面提高大型履带吊机站位的稳定性。在吊装过程中则需要综合考虑风速、风向等气象条件,严格控制吊装窗口期,通过BIM技术进行吊装模拟,控制各部件在高空精准对接。

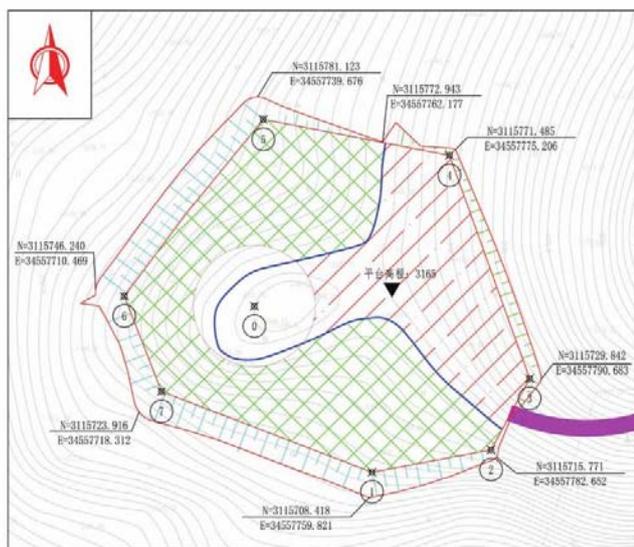
3 大型双馈风力发电机组吊装项目的管理与控制要点

3.1 吊车选型

安装的风电机组包括塔筒、机舱、轮毂及叶片,其中最大设备重量为机舱,约160吨,采用ZCC13000履带式起重机作为主吊设备,吊装工况下负荷率为84%,低于90%的安全阈值,满足《起重机械安全规程》在吊装稳定性方面的要求^[1]。

3.2 吊装平台处理

大型双馈风力发电机组吊装平台作为重型吊装作业的承载基础,其结构稳定性需要满足主吊车、辅助吊车、运输车辆的进出、回转、作业需求,平台整体平整度控制在5‰以内,全面加强大型履带吊机支腿受力均匀,防止吊装过程中出现倾覆风险。地基处理是平台施工的主要环节,平台区域压实度不低于94%,地耐力要求不小于150kPa,主吊车站位区地耐力须达到250kPa以上。针对承载力不足区域,采用级配碎石换填并分层碾压,每层厚度控制在30cm以内,压实后进行平板载荷试验,验证地基承载力,保证其满足重型机械作业要求。此外,本工程将机组布设在山脊区域,地形起伏相对较大,平台施工涉及大规模土石方开挖回填,工作人员要依据BIM地形模型进行三维放样,精准控制开挖边界和填筑标高,避免出现超挖问题。并在平台边缘设置挡土墙和排水沟,防止雨水冲刷出现边坡失稳问题,有助于保障吊装平台在复杂工况下结构的安全性(见图1)。



3#风电机组吊装平台平面布置图 1:500

图例: 填方区 挖方区

图1 吊装平台布置

3.3 设备卸车

当机舱、塔筒等超大型部件运抵施工现场后,需要由履带式起重机在已经处理合格的卸车平台上进行卸载作业。但在塔筒卸车时,工作人员应按照吊装顺序合理布置,每节塔筒的上法兰

端应靠近主吊车作业半径范围,最大限度减少主吊车在吊装过程中的二次移位,有效提高作业效率,并将塔筒轴线和主导风向保持一致,降低风载对于筒体稳定性的影响。同时,需要将机舱和轮毂组件放置在专用运输支架上,支架支点位置则必须要符合设计受力点,全面加强结构受力的均匀性,防止出现严重的局部变形。

3.4 塔筒分段式吊装

大型双馈风力发电机组塔筒吊装采用分段式抬吊工艺,将塔筒分为五段进行高空对接,每段吊装都要经过平吊、翻转、竖立、就位等阶段。在吊装作业中,通常由主吊车和辅助吊车协同完成,使吊装过程中受力更加均匀。在翻转过程中,主吊车起吊上法兰,辅吊车配合起吊下法兰,两车同步作业,使塔筒平稳由水平状态翻转至垂直状态,法兰面全程避免接触地面。在塔筒竖立至距地面约1.5米时,拆除下法兰的米字支撑架,并在每段塔筒起吊前,需在下法兰端系设两根牵引绳,帮助工作人员调整空中姿态(见图2)。针对塔筒内部电缆桥架、液压站、工具及连接螺栓等设备,需要组织专业人员进行提前布设,将其固定在顶部平台,减少高空作业风险。等到各段对接后,及时安装爬梯、接地电缆、柔性连接器、母线槽等附属部件,有助于加强结构的完整性^[2]。

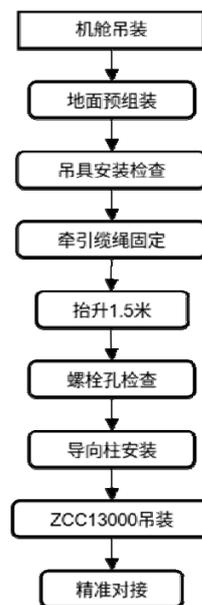


图2 塔筒分段式吊装

3.5 机舱吊装

在机舱吊装过程中,控制主吊车缓慢提升,配合牵引绳调整方位,让机舱平稳移至塔筒顶部。在下降阶段,则需要精确控制机舱和塔筒法兰的相对位置,将塔筒法兰端面外露长度控制在 90 ± 1 mm。对接完成后,拆除导向柱,更换为机组配套的双头螺栓,调整其外露长度并进行初预紧,所有连接螺栓采用液压扳手按“米字型”顺序对称施加预紧力,执行“两级三次”紧固工艺:

第一级施加50%额定扭矩，第二级分两次完成100%额定扭矩的预紧，第二次100%紧固在首次紧固回缩稳定后进行，有效消除弹性变形、接触面沉降带来的影响，最终螺柱外露长度须严格控制在93~96mm范围内，保证偏航轴承连接的轴向预紧力满足设计要求^[3]。

3.6单叶片吊装

针对山脊区域作业面受限的特殊地形条件，本项目采用单叶片吊装工艺替代传统叶轮整体吊装方案，建立“三级风险评估”机制，其中一级评估由设计院提供风场微气象数据，二级评估由吊装单位进行场地适应性分析，三级评估由现场指挥团队根据实时气象条件动态调整作业窗口，当风速>12m/s或阵风>15m/s时自动触发停工机制。在质量控制方面，实施“双基准面”定位体系，将塔筒法兰面作为水平基准，轮毂变桨轴承面为角度基准，采用全站仪实时监测两基准面偏差，确保对接精度控制在±0.5mm内。针对单叶片吊装特有的重心偏移风险，开发“动态配重计算模型”，根据叶片实时姿态自动调整配重参数，将轮毂倾覆力矩控制在设计值的75%以下。建立螺栓连接质量追溯系统，每颗连接螺栓配备RFID标签，详细记录扭矩施加时间、操作人员、检测数据，从而达到100%可追溯^[4]。

4 大型双馈风力发电机组吊装项目的管理与控制措施

4.1风险评估与动态预警机制

基于山脊区域作业面受限、高风速频发的特点，建立多维度风险评估体系，先开展三维地质建模，利用BIM技术模拟吊装平台承载力分布，识别地基薄弱区，精准实施级配碎石换填加固。同时，积极引入微气象监测系统，在场布设超声波风速仪阵列，实时采集10分钟平均风速、湍流强度、风向变化率等参数，结合数值天气预报，构建风载动态预测模型，当风速超过12m/s时自动触发停工指令。针对单叶片吊装特有的重心偏移风险，开发倾覆力矩实时计算模块，通过安装在轮毂的六轴力传感器采集吊装过程中倾覆力矩数据，当实际值达到设计阈值的80%时启动配重调整程序。此外，建立四级风险预警机制，蓝色预警（风险概率<10%）、黄色预警（10%-30%）、橙色预警（30%-50%）、红色预警（>50%），对应采取加强监测、局部停工、全面撤离、应急处置等措施，促进风险管控从被动应对向主动预防方向发展^[5]。

4.2施工过程中的管理与控制措施

在单叶片吊装环节，采用双冗余定位系统保障对接精度，将塔筒法兰面作为水平基准，轮毂变桨轴承面为角度基准，通过全站仪、激光对中仪协同作业，将法兰面平行度误差控制在±0.3mm以内。针对狭窄作业面设备碰撞风险，部署UWB高精度定位系统，厘米级定位起重机臂架、叶片吊点、人员活动区域，设置电

子围栏自动报警功能，当设备间距<2m时触发声光警示。同时，开发动态配重优化算法，根据叶片实时姿态（俯仰角、偏航角）计算重心偏移量，科学调整配重块位置，将轮毂倾覆力矩波动控制在设计值的±5%范围内，并对所有连接螺栓实施RFID全生命周期管理，详细记录扭矩施加时间、操作人员、检测数据，实现100%可追溯，防止漏紧、错紧现象。

4.3应急响应与持续改进机制

制定分级应急响应预案：I级响应（设备倾覆、人员伤亡）立即启动紧急制动与医疗救援；II级响应（部件损伤、进度延误）由技术团队现场会商调整工艺；III级响应（轻微偏差、效率下降）通过BIM仿真推演优化吊装顺序。建立数字孪生指挥平台，集成吊装设备运行参数、气象数据、人员定位信息，实现故障预判与应急方案自动生成。定期开展多场景联合演练，模拟大风突袭、设备失稳、高空坠物等极端工况，验证应急预案有效性。实施PDCA循环改进机制，每次吊装后召开复盘会议，结合传感器采集的应力、振动、变形数据，优化吊装工艺参数，形成《典型工况控制标准库》，为后续工程提供数据支撑^[6]。

5 结语

大型双馈风力发电机组吊装项目通过系统化施工组织和精细化过程控制，成功实施塔筒分段吊装、叶轮整体吊装工艺，重点把控吊装技术环节，全面提高超大型构件吊装的安装质量。在未来研究中，可进一步融合数字孪生与智能监测技术，实现吊装过程的动态仿真，大幅度提升施工智能化水平。

参考文献

- [1]邵利兵.关于风力发电机组与塔筒安全吊装的研究[J].工程建设与设计,2024(22):100-102.
- [2]张文文,韩文星,赵星军,等.吊装技术在风力发电机组施工中的应用[J].工程建设与设计,2025(12):208-210.
- [3]张超.风力发电机组吊装施工特点及技术[J].工程建设与设计,2024(20):115-117.
- [4]徐庆淳.3.3MW级风力发电机组叶轮整体吊装方案研究[J].水利水电施工,2024(6):97-101.
- [5]朱发东,向治海,陈维波,等.高山地区风力发电机组吊装施工技术[J].安装,2024(3):57-60.
- [6]房凯.高原山地荒漠风力发电机组吊装问题及解决方案简述[J].人民珠江,2023,44(22):323-327.

作者简介:

杜春(1987--),男,汉族,山西太原人,本科,单位:国电联合动力技术有限公司,研究方向:风力发电机组研发设计、风场安装、运行故障分析。