

Study on wind load influence and safety protection measures in tower lifting construction of high altitude wind farm

Tong Li Xinjie Wang

China Power Construction Group Hebei Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050021, China

Abstract

With the development of green energy, high-altitude wind farms have become the preferred location for wind turbine construction. The complex climate, thin air, and variable meteorological conditions in high-altitude wind farm areas pose significant challenges to critical tower hoisting operations—. As the core component requiring crane lifting, the tower boom remains a vulnerable link in the hoisting system, increasing safety risks. The low air density and distinct wind force patterns in high-altitude regions differ markedly from those under normal meteorological conditions in lowland areas. This study analyzes the tower hoisting process in high-altitude wind farms, identifies the influence patterns of wind loads during construction, clarifies risk levels under different operating conditions, and proposes safety measures under wind load effects. These findings provide technical guidance for tower hoisting operations in high-altitude wind farms, ensuring worker safety and project progress.

Keywords

High-altitude wind farms; Tower hoisting; Wind load; Impact mechanisms; Safety measures

高海拔风电场塔筒吊装施工的风荷载影响及安全防护措施研究

李通 王新杰

中国电建集团河北工程有限公司, 中国·河北 石家庄 050021

摘要

随着绿色能源的发展,高海拔风电场成为风电场建设的首选区域。高海拔风电场场区气候复杂、空气稀薄、气象条件多变,给风电场关键性工作——塔筒吊装施工带来极大挑战。塔筒是需通过吊机吊装的风机核心构件,在吊装施工过程中,吊机臂架是风机吊装系统的薄弱环节,易引发安全事故。高海拔地区空气密度低,风力作用规律与平原地区正常气象条件下存在显著差异。本文对高海拔风电场塔筒吊装施工过程展开分析,得出高海拔风电场塔筒吊装过程中风荷载对施工的影响规律,并明确不同工况下的危险等级,同时提出吊机施工中风荷载作用下的安全防护措施,为高海拔风电场塔筒吊装施工提供技术指导,保障作业人员安全及工程顺利推进。

关键词

高海拔风电场;塔筒吊装;风荷载;影响机理;安全防护措施

1 引言

世界能源变革中,可再生能源是解能源与环境危机的有效手段,风能开发规模扩大,平原易开发风能趋近饱和,高海拔风电场成开发主趋势。高海拔环境恶劣,空气密度低、风荷载规律弱、恶劣天气多、地形加剧风场紊乱,威胁塔筒吊装安全。塔筒是风机核心承载部件,其吊装安全影响施工进度与稳定性,研究其受风荷载影响机制、建安全控制体系意义重大。

【作者简介】李通(1980-),男,中国河北衡水人,本科,工程师,从事建设风电、光伏发电基地及配套储能基础设施研究。

2 高海拔风电场塔筒吊装施工环境与风荷载特性

2.1 高海拔风电场塔筒吊装施工环境特征

由于高海拔风电场多位于山区,海拔在2000m以上,施工环境均与平原不同,主要有三点,在空气密度方面,海拔每升高1000m,空气密度约降低10%,在3000m处空气密度约为平原的70%左右,直接影响风荷载大小,导致平原模型不适用。天气条件易突变,冬季最低气温-30℃以下,紫外线强度是平时的1.5-2倍,有时瞬时风速达到25m/s以上,且伴随降雪冻冰现象,不但增大了风荷载,而且导致吊机零件强度下降、钢丝绳打滑。地形方面,由于风电场多位于山地峡谷,峡谷“狭管效应”导致部分地点风速加大;山地起伏导致风切变,风切变指数为0.25-0.35,大

于平原地区的0.15-0.20, 吊装风险增加^[1]。

2.2 高海拔风电场塔筒吊装施工风荷载类型与作用机理

风荷载分为平均风荷载、脉动风荷载两类, 平均风荷载与空气密度、风速的平方、迎风面积成正比比例关系, 同等风速下, 高海拔地区因空气密度小, 其平均风荷载比平原地区小, 但高海拔地区的高风速仍易将平均风荷载提升至危险水平, 进而导致吊臂偏斜、塔筒摆动摇晃、过限失稳脱绳。脉动风荷载由湍流引起, 具有随机性, 且山区海拔越高湍流越强, 虽不会直接造成结构破坏, 但易引发系统共振与振动加剧, 进而导致构件连接失效、疲劳破坏及长期累积损伤或突发损坏。

3 高海拔风电场塔筒吊装施工风荷载影响分析

3.1 风荷载对吊装系统结构稳定性的影响

高海拔塔筒吊装体系由吊车、塔筒、钢丝绳和辅具共同构成, 风荷载对体系的影响主要体现在吊车稳定与塔筒稳定两方面。对于吊车, 风荷载会对其产生水平力与倾覆力矩, 水平力会导致吊车发生横向水平位移, 倾覆力矩则可能使吊车绕支点倾覆^[2]。高海拔地区空气密度低会影响吊车配重有效性与抗倾覆能力, 根据受力分析, 当风速为18m/s时, 300吨履带吊的倾覆力矩会增加35%以上, 此时吊臂处于最大幅度位置, 吊车极易发生倾覆。

塔筒在吊装过程中悬臂于空中, 受风荷载作用易发生弯曲变形与振动。由于塔筒为细长钢构件, 其抗弯刚度随高度增加而降低, 以80m高的塔筒为例, 在15m/s风荷载作用下, 顶部水平位移可达0.5-0.8m, 超过0.3m的标准限值; 同时, 脉动风荷载易引发塔筒振动, 使塔筒焊缝处产生交变应力, 当Q345钢焊缝处交变应力达到120MPa时, 易产生焊缝裂纹, 若未及时采取措施, 裂纹会进一步扩展, 最终导致塔筒破坏。与此同时, 受风荷载作用, 塔筒产生摆动, 会给钢丝绳带来附加拉力与扭力。当摆动角度超过5°时, 钢丝绳受力会增加20%-30%; 加之高海拔低温环境会降低钢丝绳屈服强度, 若钢丝绳实际应力超过其1570MPa的屈服强度, 会发生塑性变形甚至断裂, 进而导致塔筒坠落。

3.2 风荷载对塔筒吊装施工精度的影响

塔筒吊装精度是后续风机安装与运行的关键因素, 风荷载通过影响塔顶受力, 对吊装系统的受力精度控制与垂直度控制产生较大干扰。分段吊装过程中, 塔顶受风荷载作用产生的摆动是塔筒吊装的主要扰动因素, 当风速为10m/s时, 塔顶摆动幅度可达0.3-0.5m, 远大于10mm的法兰孔对接间隙, 易造成法兰孔错位, 延误工期; 若强行对接法兰孔, 会导致法兰孔变形, 进而使塔筒连接强度丧失。

垂直度是塔筒吊装的核心精度指标, 其偏差不得超过1‰。风荷载产生的推力会使塔筒倾斜, 100m高塔筒在12m/s风速下, 垂直度偏差可达1.5‰, 超出限值要求; 此外, 风切变产生的推力差异会导致不同高度塔筒水平位移不同,

使塔筒发生弯曲, 进一步增大垂直度偏差, 这一方面会增加风机运行时叶片刮擦塔筒的风险, 另一方面会使塔筒承受更大弯矩, 缩短其使用寿命。另外, 受风荷载影响, 塔筒吊装若产生超过50mm的侧向位移, 会导致塔筒偏离设计安装位置, 需重新校正, 不仅耗时耗力, 还可能因吊装受力异常造成吊机地基下陷, 进一步降低施工精度^[3]。

3.3 高海拔风荷载影响的量化分析

为准确评估高海拔风荷载对塔筒吊装施工的影响, 需计算不同风况下的安全临界值, 为施工安全控制提供依据。通过有限元软件建立吊装受力模型, 输入高海拔地区典型风荷载参数(空气密度0.88kg/m³、风速8-20m/s、脉动风荷载系数取0.25), 计算得到吊机倾覆力矩、塔筒顶端应力及钢丝绳受力, 结果如下表所示:

平均风速 (m/s)	吊机倾覆力矩 (kN·m)	塔筒顶端应力 (MPa)	钢丝绳受力 (kN)
8	1250	65	320
12	1880	98	450
15	2450	135	580
18	3120	172	720
20	3580	205	850

结合相关规范要求(吊机倾覆安全因数不低于1.2、塔筒允许应力为180MPa、钢丝绳允许力为750kN), 确定高海拔塔筒吊装施工的安全临界风速: 当平均风速低于15m/s时, 吊机倾覆力矩、塔筒应力值及钢丝绳受力均处于安全控制范围; 当平均风速达到18m/s时, 塔筒顶部应力(172MPa)与钢丝绳受力(720kN)均趋近允许值, 应立即停止吊装作业; 当平均风速超过20m/s时, 各项指标均超出安全范围, 存在极大安全隐患。

4 高海拔风电场塔筒吊装施工安全防护措施

4.1 风荷载预测预警措施

建立可靠的风荷载预测预警体系, 是实现高海拔塔筒吊装施工风险提前预警的必要条件。预测环节采用“宏观气象—微观监测”双模式: 一方面, 与当地气象部门实现实时数据共享, 获取未来72h气象预报(重点包括风速、风向、降水等参数), 并结合高海拔山区气象特征, 对预报数据进行动态修正, 提升预测精度; 另一方面, 在吊装现场架设多套气象自动站, 监测高度覆盖吊机臂架顶面(约100m)、塔筒中部(约50m)及地面, 监测参数包括瞬时风速、平均风速、风向、空气密度等, 采样频率为1次/min, 实现对现场风场数据的实时监控^[4]。

建立分级预警机制, 按平均风速将预警等级划分为四级: 蓝色预警(8—12m/s)、黄色预警(12—15m/s)、橙色预警(15—18m/s)、红色预警(≥18m/s)。各等级对应处置要求如下: 蓝色预警时, 提醒施工人员关注风荷载变化, 并对设备进行检修; 黄色预警时, 减缓吊装节奏, 取消塔筒对接等高空作业; 橙色预警时, 立即停止吊装作业, 将塔筒

临时固定,同时收起吊机臂架;红色预警时,组织所有施工人员撤离至安全区域,并将吊机锚固于防风锚地。预警信息通过现场广播、手机APP、声光报警器等渠道,第一时间传达至每一位现场施工人员。此外,建立预警响应机制,明确各级预警的处置程序与责任人员:蓝色预警由施工班组负责人处置,黄色预警由项目经理处置,橙色预警由项目总指挥处置,红色预警由项目经理统筹处置,确保预警信息能快速转化为实际处置行动,将风荷载带来的风险降至最低。

4.2 技术应对措施

针对高海拔风荷载特性,从吊装方案优选、设备改造及施工工艺优化三方面制定技术措施,提升吊装系统的抗风性能。

4.2.1 吊装方案优选

一是优选吊装窗口期,根据风荷载计算结果,选择平均风速小于12m/s且无瞬时大风的时段进行吊装,规避早7—9点、晚17—19点的风速峰值时段;二是优化吊臂角度,通过受力计算确定最佳倾角,在10—12m/s风速下,将吊臂角度从常规的60°调整至70°,可使吊车倾翻力矩降低15%-20%;三是采用分段吊装工艺,即每吊装一段塔筒,均采用不少于4根缆风绳临时固定,使塔筒与地面保持30°-45°夹角。

4.2.2 设备改造

分别针对吊机与塔筒进行改造,提升其抗风性能。吊机改造方面,在底座增加配重块,配重随海拔升高而增加,当海拔高于平原3000m时,配重需增加20%;同时在吊臂上部加装防风导流装置,减小风荷载对吊臂的推力,降低吊臂振动。塔筒改造方面,在塔筒内壁焊接筋板以提升抗弯刚度,筋板间距设为5m,截面尺寸为100mm×100mm;在塔筒上部安装风阻尼器,通过阻尼器耗能作用,降低脉动风荷载引发的塔筒振动,减振幅度可达30%-40%。

4.2.3 施工工艺优化

施工过程中严格遵循“慢起吊、稳对接”原则,起吊速度不大于0.5m/min,避免因起吊过快导致塔筒摆动过大;塔筒对接采用液压千斤顶辅助,替代钢丝绳牵引,提升对接质量,减少风荷载对对接过程的干扰;在钢丝绳表面涂抹低温抗冻润滑剂,缓解高海拔低温对钢丝绳性能的影响,提升其抗拉、抗压及抗扭性能。

4.3 管理与应急措施

4.3.1 施工管理

一是强化制度执行,明确岗位安全责任,施工人员必

须接受高海拔吊装专项培训(内容包括风荷载特性、防护措施、应急处置等),考核合格后方可上岗;二是加强现场查纠,每日吊装前需对吊机、钢丝绳等设备进行全面检查,重点核查吊机锚定状态、钢丝绳磨损情况及塔筒焊口质量,发现问题立即整改,严禁设备“带病作业”;三是严格作业许可,每次吊装前,作业人员需持证上岗,经安全员现场确认工况正常、设备检查合格后,方可启动吊装作业。

4.3.2 应急处置

制定专项应急预案,明确吊机失稳、塔筒异常摆动等事故的应急处理程序,以及责任人员与物资配置要求;现场配备起重工具、急救包等应急物资,在距离起重吊点不少于50米处设立应急避难点;每季度至少组织1次风荷载相关事故应急演练,提升施工人员应急应变能力。建立事故报告与复盘闭环机制,事故发生后需第一时间上报,同步开展事故调查,深入分析事故原因并制定针对性改进措施,形成“报告-调查-分析-改进”的管理闭环;加强同类型项目交流,积极学习借鉴高海拔风电场塔筒吊装的先进经验,持续提升行业整体项目管理水平^[5]。

5 结语

高海拔风电场是我国新能源发展的重要领域,塔筒吊装安全关乎施工进度与人员安全,风荷载是该场景下的主导风险,研究其作用规律与防护对策对行业意义重大。探究高海拔工况与风荷载对塔筒吊装的影响规律,明确平均风、脉动风、风切变对吊装体系稳定性与精准性的作用机理,量化安全临界风速,并从预警、技术、管理层面提出防护对策,为施工提供参考。因海拔、地形对风场特征影响有差异,相关研究需深化,未来可通过补充数据完善风荷载计算模型,结合无人机巡查、BIM模拟等提升风险防护精度,助力新能源行业发展。

参考文献

- [1] 焦战增,孟素玉.丘陵山地风电场风机吊装设备选型研究[J].云南水力发电,2022,38(07):192-195.
- [2] 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.
- [3] 李舸.风机塔筒外挂式可升降安装平台设计与施工[J].云南水力发电,2023,39(08):40-44.
- [4] 裘学强,朱锴年,侯生洲.青海锡铁山风电场机组设备吊装技术研究[J].中国设备工程,2018,(02):128-130.
- [5] 张国平.风电场风机吊装施工技术[J].安装,2022,(10):36-37.