

陆上风电项目发电量提升措施与实践

张 哲 宁 宁

中国三峡新能源（集团）股份有限公司河南分公司 河南 郑州 450008

摘 要：为解决陆上风电项目发电效率偏低、发电量不达标的行业痛点，本文从自然风资源、设备性能、场站运维三大维度，系统剖析风电发电效率的核心影响因素。结合山地陆上风场工程实践，提出设备优化改造、风场布局尾流调控、智能控制升级、精细化运维四大增效技术体系。经项目改造验证，相关措施可有效提升风能利用率与设备稳定性，增收效益显著，可为同类陆上风电提质增效改造提供参考。

关键词：陆上风电项目；发电量；提升措施；实践

引言：双碳目标下，陆上风电作为清洁能源主力，是推动能源绿色转型的核心力量。当前多数陆上老旧风场受复杂地形、设备老化、运维滞后、尾流损耗等问题制约，普遍存在风能利用率低、机组故障频发、发电量不足等问题，严重影响风场经济效益与发电效能。为破解行业发展瓶颈，本文结合实际工程场景，系统性探究发电量提升关键技术与落地路径，为陆上风电高效、稳定、长效运营提供实践支撑。

1 陆上风电项目发电效率影响核心因素分析

1.1 自然环境与风资源因素

（1）风速、风向时空波动对发电稳定性的影响。陆上风速与风向存在昼夜、季节及区域差异，无规律的波动会打破风机稳定运行状态。风速过低无法达到并网发电标准，风速过高会触发风机保护停机，风向频繁偏移则让风机无法持续正对风向捕风，直接降低发电稳定性与持续性。（2）空气密度、湍流强度对风能利用率的制约。空气密度直接决定风能蕴含能量，低温、高海拔区域空气密度偏低，同等风速下风能总量不足，发电出力受限。而大气湍流会造成气流紊乱，冲击风机运行状态，引发机组震动、出力波动，大幅降低风能转化利用率。（3）复杂地形地貌的风资源损耗机理。山地、丘陵等陆上复杂地形会阻挡、分流气流，造成局部风速骤变、风场分布不均，产生风资源折损。同时地形遮挡易形成风影区，使得部分风机有效受风面积缩减，整体风资源利用效率显著下降。

1.2 设备本体性能因素

（1）风机叶片翼型老化、磨损导致的捕风效率下降。叶片长期暴露在户外环境，易出现磨损、腐蚀、积灰及翼型变形问题，破坏叶片气动结构，削弱捕风能力，降低风能向机械能的转化效率。（2）发电机、传动系统故障引发的发电损耗。齿轮箱、轴承、发电机等

核心传动设备易出现磨损、卡顿、发热等故障，造成动力传输损耗，部分机械能无法转化为电能，严重时会导致机组降容运行，增加发电损耗^[1]。（3）变桨、偏航系统响应滞后造成的能量流失。变桨、偏航系统是风机适配风向、风速的核心结构，系统响应滞后、灵敏度不足时，无法及时调整叶片角度与风机朝向，错过最佳捕风时机，造成大量风能能量流失。

1.3 场站设计与运行因素

（1）风机排布不合理产生的尾流效应损耗。风机布局间距、角度设计不科学时，前排风机运行会产生尾流，导致后排风机受风风速降低、气流紊乱，引发尾流损耗，大幅降低整场发电效率。（2）风电运维模式滞后引发的设备停机损耗。传统运维多为故障后维修，缺乏常态化巡检与预防性养护，设备小故障累积引发停机故障，增加机组停机时长，减少有效发电时长，造成发电总量损耗。（3）控制策略适配性不足导致的发电效率偏低。部分风场控制策略固化，无法适配实时风资源变化与设备运行状态，参数调节精准度不足，机组始终无法处于最优发电工况，最终导致整体发电效率偏低。

2 陆上风电项目发电量提升关键技术措施

2.1 风机设备优化改造技术

（1）叶片优化改造：翼型升级、叶尖小翼加装与磨损修复技术。叶片是风机捕风核心部件，针对老旧叶片气动性能差、损耗严重等问题，可通过优化叶片翼型，提升低风速工况下的捕风能力。在叶片末端加装叶尖小翼，可削弱叶尖涡流损耗，减少风能外泄。针对设备长期运行出现的磨损、腐蚀、积灰等问题，通过专业涂层修复、打磨塑形等工艺，还原叶片原始气动外形，稳定提升风机捕风效率与能量转化水平。（2）核心机组升级：永磁同步发电机替换、传动系统优化。传统双馈发电机能耗高、稳定性弱，更换为高效永磁同步发电机，

可提升发电转化效率、降低空载损耗,适配更广的风速运行区间。同时优化齿轮箱、轴承等传动系统,更换低损耗配件、调整传动匹配参数,减少机械摩擦与动力传输损耗,提升机组机械能向电能的转化精度^[2]。(3)老旧机组“以大代小”提质增效改造方案。针对早期小容量、低效率老旧风机,推行“以大代小”改造,拆除老旧小型机组,更换为大容量、高适配新型风机。新机组风能利用率高、运行稳定、适配复杂风况,无需新增占地,即可大幅提升单机发电量,解决老旧机组效率低、故障多、能耗高的问题,实现风场整体提质增效。

2.2 风电场布局与尾流优化措施

(1)基于风资源数据的风机间距与排布优化设计。依托长期风资源监测数据,结合场地风速、风向分布规律,精准测算风机最优安装间距、行列角度。摒弃传统标准化排布模式,根据区域风资源特征差异化布局,避免风机间距过小引发的气流干扰,最大化利用场地风资源,提升整体受风效率。(2)尾流效应精准调控与机组错位运行策略。针对风机运行产生的尾流损耗问题,通过仿真模拟风场气流运行轨迹,制定机组错位运行方案。根据实时风况调整前后机组运行角度与运行状态,错开风机捕风区间,削弱尾流对后排机组的干扰,降低风速衰减与气流紊乱带来的发电损耗,提升全场发电均匀性与稳定性。(3)复杂地形风电场布局优化调整方法。针对山地、丘陵等复杂地形风场,结合地形遮挡、气流分流特征,规避风影区、湍流剧烈区域。^[3]

2.3 智能运行控制策略优化

(1)基于风况精准预测的变桨、偏航自适应控制。依托气象监测与大数据预测技术,实现短、中、长期风况精准预判。优化变桨、偏航控制系统算法,根据实时风速、风向变化自适应调整叶片角度与风机朝向,消除系统响应滞后问题,让机组始终处于最优捕风工况,最大化捕获风能。(2)机组协同运行优化与负荷动态调配策略。打破单机组独立运行模式,搭建风场机组协同控制系统。根据各机组实时运行状态、受风条件,动态分配发电负荷,平衡机组运行压力,避免部分机组过载、部分机组低效运行的情况,提升风场整体发电利用率。(3)风电+储能协同运行的发电增益调控模式。引入储能系统构建风电储能协同体系,针对风电出力波动、弃风限电等问题,将风能富余时段的电能储存起来,在风速不足、出力偏低时释放电能,平抑发电波动,减少弃风损耗,提升风场有效发电量与并网稳定性。

2.4 精细化智能运维提升措施

(1)设备状态在线监测与预防性运维体系搭建。搭

建风机全设备在线监测系统,实时采集叶片、发电机、传动系统等核心设备的运行数据。改变传统故障后运维模式,建立预防性运维体系,通过数据预判设备潜在故障,提前开展养护作业,减少设备故障停机时长。(2)故障快速诊断与低损耗检修技术应用。依托智能化诊断技术,精准定位设备故障点位与故障成因,缩短故障排查时间。采用模块化、低损耗检修技术,简化检修流程,缩短检修停机周期,最大限度降低检修作业带来的发电量损失,保障机组高效持续运行^[4]。(3)数字化运维平台赋能发电效率提升路径。整合风场设备数据、运行数据、运维数据,搭建一体化数字化运维管理平台。实现风场运行状态可视化、运维流程标准化、数据管理智能化,通过数据分析优化运行与运维方案,精准解决发电效率短板,持续提升风场整体发电效能。

3 工程实践应用与效果分析

3.1 项目概况与改造方案设计

(1)典型陆上风电场工程基本参数与运行现状。本次选取的陆上典型风电场装机规模适中,机组投运年限较长,场内配备多台主流容量陆上风机,适配山地陆上风电运行环境。项目整体配套变电、输电、控制系统完善,长期处于常态化并网运行状态。但受风资源波动、设备老化、运维方式传统等因素影响,风电场常年发电量达不到设计标准,风能利用率、设备可利用率均存在明显提升空间,是老旧陆上风电增效改造的典型工程案例。(2)项目发电低效核心问题诊断。结合项目长期运行监测数据,可梳理出三大核心问题。一是风机叶片磨损、机组核心设备老化,机械与电能转化损耗较大;二是场内风机排布存在瑕疵,尾流效应突出,复杂地形下风资源损耗严重;三是运行控制策略固化、运维模式滞后,无法适配实时风况,设备故障停机频次高,整体发电效率偏低。(3)针对性发电量提升技术方案整体设计。结合项目现存问题,统筹设计全方位增效改造方案,涵盖设备优化、布局调控、智能控制、智能运维四大板块。通过叶片修复升级、核心机组改造完成设备提质;依托风资源数据优化风机排布,削弱尾流损耗;更新智能控制算法,优化机组协同运行模式;搭建数字化预防性运维体系,全方位解决项目发电低效问题。

3.2 各增效措施落地实施过程

(1)设备改造与系统升级施工流程。项目施工遵循安全有序、分步落地的原则,先开展全场设备停机检测、工况排查,确定各机组改造点位。依次完成叶片磨损修复、叶尖小翼加装、老旧传动部件更换、永磁发电机替换等作业,同步完成储能配套设备、智能监测设备

的安装调试,最后进行整机试运行与参数校准,保障设备改造达标落地。(2)控制策略与运维体系优化落地细节。依托大数据风况预测系统,更新风机变桨、偏航自适应控制程序,重构机组协同负荷调配机制。同时摒弃传统被动运维模式,搭建设备在线监测平台,建立故障预判、定期巡检、及时检修的精细化运维流程,统一运维标准,完成运维人员技能适配培训,保障优化策略落地见效^[5]。(3)项目实施过程难点与应对方案。项目实施难点主要为山地复杂工况施工难度大、改造机组数量多、新旧系统适配性差。针对以上问题,采用分区域、分批次施工模式,规避交叉作业风险;通过参数调试、系统兼容测试解决新旧设备适配问题;制定专项施工保障方案,应对湍流、大风等恶劣工况,保障项目顺利推进。

3.3 改造后发电效果与效益分析

(1)发电量、风能利用率数据对比分析。改造完成后,风电场整体捕风能力显著提升,有效受风时长增加。对比改造前后数据,项目年均发电量大幅提升,有效规避了尾流损耗、响应滞后带来的能量流失,风能利用率得到明显提升,风资源利用更加充分,核心发电指标显著优于改造前。(2)设备可利用率、故障停机率改善效果。通过设备改造与智能运维体系搭建,风机核心设备故障问题大幅减少,机组运行稳定性显著提升。设备年均可利用率明显提高,突发故障、被动停机频次大幅下降,无效停机时长显著缩短,机组持续发电能力得到有效保障。(3)项目经济效益与节能减排社会效益分析。发电效率的提升直接增加了项目并网发电量,提升风电售电收益,降低场站运维成本,经济效益显著。同时,风力发电属于清洁能源发电,发电量提升可有效替代传统火电,减少碳排放、粉尘及有害气体排放,助力能源绿色转型,具备良好的节能减排社会效益。

3.4 现存问题与优化改进方向

(1)现阶段发电量提升措施应用局限性。当前增效措施仍存在一定局限,极端大风、强湍流天气下,智能

调控精度有所下降;老旧机组改造后仍存在少量固有损耗;储能协同调控模式尚未完全适配全工况,弃风现象未彻底消除,发电增效仍有提升空间。(2)复杂工况下增效技术适配优化方案。针对复杂工况适配性不足问题,持续优化智能控制算法,强化极端风况下的机组自适应调控能力。优化尾流动态调控策略,结合山地地形实时调整机组运行状态,针对性提升复杂工况下的风资源利用率与机组稳定性。(3)长效化发电增效运维管理完善策略。建立长效化动态运维管理机制,持续优化数字化运维平台数据算法,深化设备全生命周期监测管理。定期开展机组性能校核与参数优化,常态化更新运维标准,形成“监测-预判-检修-优化”的闭环管理,实现风电场长期稳定高效发电。

结束语

本文结合陆上风电工程实践,落地多项发电量提升技术措施,有效解决了风场尾流损耗、设备低效、运维滞后等核心问题,显著提升了风场发电能力与运营稳定性,兼具经济与环保效益。同时梳理出当前技术应用的局限性,明确复杂工况适配优化、长效运维闭环管理等改进方向。后续将持续优化智能调控技术,完善全生命周期运维体系,助力陆上风电行业高质量、高效化发展。

参考文献

- [1]许喆.风电机组全风速段多目标发电优化控制[J].电力建设,2023,44(7):131-141.
- [2]王浩宇.老旧陆上风电场“大代小”技改增效关键技术与工程实践[J].可再生能源,2024,32(5):682-688.
- [3]刘畅,王军.气动增功组件在陆上低风速风电场的增效应用研究[J].电网与清洁能源,2025,41(2):92-98.
- [4]关玉明.极端天气下陆上风电机组发电效能提升及运维策略[J].南方能源建设,2024,11(4):112-118.
- [5]张明轩.数字化智能运维对陆上风电场发电量的提升机制研究[J].电力科学与工程,2023,39(11):76-83.