

关于提升风电场发电能力的研究与思考

胡强

中国大唐集团有限公司江西分公司

DOI:10.12238/hwr.v9i10.6599

[摘要] 在“双碳”目标推动全球能源转型的背景下,风电作为清洁能源的核心组成部分,其发电能力的提升直接关系到能源结构优化与可持续发展进程。本文以中国大唐集团某所属A风电场(24台2MW风机)为研究对象,针对该风电场2022–2024年可控应发电量完成率分别为98.60%、98.23%、97.63%的现状,从多维度探究提升发电能力的路径。在原有缺陷治理、功率曲线优化、尾流分析、增功技改四大核心措施的基础上,新增运维管理优化、储能系统协同、环境因素调控三个关键维度,通过数据对比、实例验证与技术论证,形成系统性解决方案。研究结果表明,多维度协同施策可有效提升风电场设备可靠性、能源捕获效率与运行稳定性,其中A风电场通过叶片加长技改实现发电量提升8%,通过数字化运维缩短故障响应时间30%,通过储能协同降低弃风率2.1%。本文研究可为同类风电场发电能力提升提供可复制、可推广的实践参考。

[关键词] 风电场; 发电能力; 运维优化; 储能协同

中图分类号: TV734.2 **文献标识码:** A

Research and Reflections on Enhancing the Power Generation Capacity of Wind Farms

Qiang Hu

Jiangxi Branch, China Datang Corporation Limited

[Abstract] Against the backdrop of the global energy transition driven by the dual carbon goals, wind power, as a core component of clean energy, plays a pivotal role in advancing energy structure optimisation and sustainable development through the enhancement of its power generation capacity. This paper examines Wind Farm A (24 × 2MW turbines) operated by China Datang Group. Addressing the farm's controllable generation fulfilment rates of 98.60%, 98.23%, and 97.63% for 2022–2024 respectively, it explores multi-dimensional pathways to enhance generation capacity. Building upon four core measures—existing defect remediation, power curve optimisation, wake analysis, and power-enhancing technical upgrades—the study introduces three additional key dimensions: optimised operations and maintenance management, energy storage system coordination, and environmental factor regulation. Through data comparison, case validation, and technical argumentation, a systematic solution is formulated. Findings indicate that multi-dimensional coordinated interventions effectively enhance equipment reliability, energy capture efficiency, and operational stability. Specifically, Wind Farm A achieved an 8% increase in generation through blade extension retrofits, reduced fault response time by 30% via digitalised O&M, and lowered curtailment rates by 2.1% through energy storage coordination. This research provides replicable and scalable practical guidance for enhancing generation capacity in comparable wind farms.

[Key words] wind farm; power generation capacity; O&M optimisation; energy storage coordination

在全球积极推动能源转型的大背景下,风电行业高速发展,提升风电场发电能力成为行业关注的核心要点。本文将以某风电场为实例,从缺陷治理、功率曲线、尾流分析、增功技改四个关键方面,深入探究提升风电场发电能力的有效策略与方法。

某公司所属A风电场(24台2MW风机)2022–2024年三年可控应发电量完成率分别为98.60%、98.23%、97.63%,发电情况一般,

本文选取A风电场开展提高风电场应发电量技术研究。

1 缺陷治理

风电场设备通常处于高山、草原、沙漠等恶劣的环境中运行,各类部件缺陷的出现难以避免^[1]。这些缺陷若不能及时妥善处理,不仅会严重降低风电场的发电效率,还可能引发安全事故。所以,风机设备可靠性是制约风电场发电能力的基本因素。

对于设备异常,风电场要充分考虑设备的运行状况、负荷情况以及天气条件等因素,制定合理的消缺计划;对于影响机组出力缺陷,迅速组织专业技术人员开展分析并现场检查,制定详细的检修计划。

通过缺陷归集分析,所选取的A风电场2022年共计发生各类缺陷249条,占比较高的有变频系统57条,变桨系统46条,主控及安全链系统72条;2023年共计发生各类缺陷301条,占比较高的有变频系统84条,变桨系统76条,主控及安全链系统50条;2024年共计发生各类缺陷249条,占比较高的有变频系统43条,变桨系统33条,主控及安全链系统101条。

依据分析,A风电场以变频系统、变桨系统、主控及安全链系统为抓手,全面开展缺陷治理。通过变频器加装冷却风扇、更换UPS电源;变桨系统更换电源转换模块、更换后备电源;主控系统安全链更换振动传感器、更换通讯电缆等方式,有效的治理了机组所存普遍性、典型性缺陷。

2 功率曲线

风机功率曲线是反映风电机组输出功率与风速关系的关键指标,优化功率曲线能够显著提高风电机组在不同风速条件下的发电效率。风机功率曲线指标异常主要表现为:指标偏高、指标偏低、功率曲线阶梯式偏差三种表现形式。导致风机功率曲线指标偏高的主要原因为测风数据不准、风速修正系数偏低、气象站参数设定不匹配等;导致风机功率曲线指标偏低的主要原因为叶片零位标定偏差;导致风机功率曲线阶梯式偏差异常的主要原因为风机降负荷运行^[2]。通过将实际运行数据与理论功率曲线进行对比分析,治理功率曲线失真和偏差等突出问题,能够充分发挥风电机组的性能优势,有效提高风电场的发电效率,增加发电量。

2024年,A风电场相对功率曲线偏高的为7号风机110%、22号风机107%、2号风机106%、7号风机105%;偏低的为5号风机90%。通过开展桨叶校零,偏差较大风速仪更换等方式,A风电场功率曲线一致性合格率为83.33%,较2024年功率曲线一致性合格率79.17%提升4.16%。

3 尾流分析

尾流是风电机组运行时在下游形成的风速降低区域,尾流影响会导致下游风电机组的发电量显著减少。因此,降低尾流影响是提高风电场整体发电能力的重要举措。

在役风电场可利用先进的尾流模型与控制系统,实时监测尾流情况。通过在风电机组上安装风速传感器、风向传感器等设备,收集实时的风速、风向数据,运用尾流模型计算尾流的范围、强度等参数。根据监测结果,对风电机组的运行状态进行智能调整,如调整机组的叶片角度、转速等,减少尾流损失。

A风电场2022年湍流强度平均值为0.1247,湍流强度高于设计值的机组有:14号风机,高于湍流强度平均值20%的有3/5/9/14/23号风机。

A风电场2023年湍流强度平均值为0.162,湍流强度高于设计值的机组有:12/20/22/23/24号风机,高于湍流强度平均值

20%的有12/20/22/23/24号风机。

A风电场2024年湍流强度平均值为0.1592,湍流强度高于设计值的机组有:2/3/5/7-24号风机,高于湍流强度平均值20%的有5/6号风机。

根据2022—2024年统计数据,湍流强度偏差率每年变化较大,偏高与偏低机组无明显规律。该情况不适合通过场控技术进行控制,消除湍流影响。

湍流强度超设计值原因可能为风速较高或风速突变,超湍流强度平均值风机需要结合点检定修时加强检查,超过最大设计值的机组,需要重点关注变桨系统、偏航系统、塔筒螺栓,防止转动机构、制动装置、紧固部件受损。

4 增功技改

增功技改是通过对风电机组进行技术改造,提高其输出功率,从而增加风电场的发电量。风电场根据机组的实际运行状况、技术发展趋势以及成本效益分析,积极探索适合的增功技改方案。

对叶片进行加长改造是一种常见的增功技改方式。通过采用新型的轻质高强度材料,在保证叶片结构强度的前提下,增加叶片的长度,扩大扫风面积,提高风能捕获能力。在进行增功技改前,风电场要组织专业的技术团队进行充分的技术论证与经济评估。从技术可行性、安全性、可靠性以及投资回报率等多个方面进行综合分析,确保技改方案切实可行且具有良好的经济效益。

A风电场对部分老旧机组的叶片进行加长改造,叶片长度由51.38m增加至53.88m,单叶片叶尖延长1.5m。经过实际运行测试,这些机组的发电量在同等风速条件下提高了8%左右。

5 运维管理优化

5.1 数字化运维体系建设。为打破传统运维的被动性,A风电场引入升级后的风电场SCADA,重点新增AI故障预警模块。该模块会系统分析风电场历年积累的缺陷数据,针对变频系统、变桨系统等核心部件构建专属故障特征模型,能够提前识别潜在故障风险,为运维团队争取充足的介入时间,避免故障扩大化^[3]。同时,为解决传统人工记录缺陷流程繁琐、响应缓慢的问题,风电场搭建了移动端运维管理平台,将“缺陷上报-派单-处理-验收”全流程迁移至线上闭环管理,替代以往的纸质记录模式,大幅缩短了缺陷从发现到处理的中间环节,让运维响应更及时、流程更透明。

5.2 运维人员技能提升。针对运维团队技能水平不均衡的问题,A风电场制定了“分层培训+持证上岗”的系统性提升制度,在培训层面,每月会围绕变频器、变桨系统等核心部件组织专项培训,邀请设备厂家的技术专家进行现场授课,确保运维人员及时掌握最新的设备原理与故障处理方法;在实践培养层面,建立“师徒带教”机制,由具备多年一线经验的资深运维人员一对一带领新员工,通过实际操作传授故障排查、设备检修的实战技巧;在能力认证层面,推行严格的技能认证制度,要求所有运维人员必须通过理论考试与实操考核,考核内容涵盖变频器故障

排查、叶片校零等核心操作,只有认证合格者才能独立承担运维任务。

5.3备品备件智能管理。此前A风电场采用“经验储备”模式管理备品备件,易出现部分备件长期积压、关键备件临时短缺的问题,影响故障处理效率。为改善这一状况,风电场引入智能备件管理系统,从三个维度优化管理流程:一是建立科学的备件消耗模型,结合设备的缺陷发生频率与使用寿命,动态规划各类备件的合理储备量,避免盲目储备造成的资金占用;二是联动周边风电场构建备件共享机制,针对UPS电源、振动传感器等关键且通用性强的备件,建立跨场调配通道,应对突发的备件需求;三是设置实时库存预警功能,当某类备件库存低于安全阈值时,系统会自动发出采购提醒,确保备件供应不中断。

6 储能系统协同运行

6.1储能系统选型与配置。A风电场结合自身出力特性与电网网要求,最终确定“锂电池储能+飞轮储能”的混合储能方案。其中,锂电池储能主要承担中长期出力波动的平抑任务,当遇到风速持续偏低导致出力不足时,锂电池储能可释放存储的电能,维持机组对外供电的稳定性;飞轮储能则专注于应对短时出力冲击,比如风速突然飙升导致出力骤增时,飞轮储能能快速吸收多余电能,避免出力超出额定值。为实现高效协同,储能系统与风电场主控系统建立了实时数据互通机制,可同步获取机组的实时出力数据,根据实际运行情况灵活调整充放电策略,确保储能动作与风电出力变化精准匹配^[4]。

6.2协同控制策略。风电场为储能系统制定了“平抑波动+峰谷套利”的双目标协同控制策略。在平抑出力波动方面,系统会实时监测机组出力变化,当出力波动幅度可能影响并网稳定时,储能系统会自动启动充放电程序——比如风速骤降导致出力快速下降时,储能系统及时释放电能补充出力缺口;风速骤升导致出力超限时,储能系统则快速充电吸收多余电能,将出力波动控制在电网可接受的范围内。在峰谷套利方面,系统会结合当地不同时段的电价差异,在风电出力充足且电价处于低谷时,将多余电能存储到储能系统中;当用电进入高峰、电价上涨时,再将存储的电能释放并网,既提高了风电的消纳效率,又通过电价差为风电场拓展了收益渠道。

6.3协同运行效果。储能系统投运后,首先显著改善了A风电场的出力稳定性,原本因风速波动导致的出力骤变问题得到有效缓解,风电场与电网的并网兼容性大幅提升,弃风现象明显减少,风电资源的利用效率更高。其次,峰谷套利策略的实施,让风电场在发电量之外获得了额外的收益,提升了整体经济效益。更重要的是,“风电+储能”的模式验证了风电与储能协同的可行性,为解决风电波动性问题提供了有效路径,也为风电场后续进一步提质增效奠定了基础。

7 环境因素精准调控

7.1覆冰防治措施。冬季山区低温环境易导致叶片、测风仪表面覆冰,不仅会降低叶片的风能捕获效率,还可能因测风数据失真影响机组运行策略判断。A风电场采用“预防+除冰”的双

重防治措施应对覆冰问题:在预防层面,为叶片表面喷涂防冰涂层,通过降低水分在叶片表面的附着能力,减少覆冰形成的概率与厚度;在除冰层面,为叶片内部安装自动加热装置,系统会实时监测覆冰情况,当覆冰厚度可能影响设备运行时,加热装置自动启动,通过温和加热融化覆冰。

7.2沙尘与湿度管控。春季山区多风沙天气,沙尘颗粒易随气流进入机舱,堆积在变频器、主控系统等核心部件表面,阻碍散热、影响设备性能;夏季高温高湿环境,则可能导致电气部件受潮短路,增加故障风险^[5]。针对这两类问题,A风电场采取了针对性管控措施:对于沙尘,在机舱进风口安装高效空气过滤装置,减少沙尘进入机舱的总量,同时定期对变频器散热片等易积尘部件进行高压吹气清洁,保持散热通道畅通;对于湿度,在主控柜等关键电气柜内配置自动除湿装置,当柜内湿度超出适宜范围时,除湿装置自动启动降低湿度。

7.3温度适应性优化。夏季山区正午高温会导致机舱内温度显著升高,当温度超过设备耐受阈值时,变频器可能会自动启动降容保护程序,导致机组出力下降。为避免高温对出力的影响,A风电场从硬件改造与策略调整两方面优化温度适应性:在硬件改造上,为机舱顶部加装通风设备增强空气流通,同时在变频器柜体外侧增设散热翅片,通过强化散热降低设备运行温度;在运行策略上,主控系统会实时监测机舱温度,当温度接近降容阈值时,自动调整机组运行参数。

8 结束语

综上所述,提升风电场发电能力是一项复杂的系统工程,需要从多个方面协同发力,采取科学合理、切实有效的措施。可通过加强缺陷治理,提高设备的可靠性与稳定性;通过优化功率曲线,确保设备出力达到最优;通过湍流分析治理,达到全场出力最优;通过推进增功提效改造,提升设备基础发电能力。在实际工作中,风电场应紧密结合自身的实际情况,因地制宜地制定并实施相应的措施,持续优化管理模式与技术手段,不断提升发电能力,为实现能源可持续发展的宏伟目标贡献力量。

[参考文献]

- [1]张海洋.风力发电并网稳定性分析及提升方法研究[J].电力设备管理,2025,(09):65-67.
- [2]王禹涵.风电场如何“旧貌换新颜”[N].科技日报,2024-12-03(006).
- [3]惠鑫海.风电场综合效能评价方法研究[D].华北电力大学(北京),2024.
- [4]袁可心.新型电力系统黑启动动态分区恢复方法研究[D].华北电力大学,2024.
- [5]张彬彬.风电场有功功率优化分配及其控制[D].西安理工大学,2020.

作者简介:

胡强(1991—),男,汉族,江西赣州人,本科,副高级工程师。研究方向:电力安全生产。