

定期检修对风电运维的影响

任家琦

华能吐鲁番风力发电有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i9.8413

[摘要] 为了深入探究定期检修对风电场运维管理的影响，文章从设备可靠性、发电性能等维度，分析了定期检修的作用。通过丰富的运行数据，评估了定期检修对风机故障率、可利用率、能量转换效率等关键指标的影响，揭示了定期检修在提升风电场综合性能方面的显著成效。同时，针对性地提出了优化定检时间间隔、加强智能化管理、推进标准化建设等策略建议，为进一步提升定检效率提供了切实可行的思路。

[关键词] 定期检修；风电运维；部件寿命

The impact of regular maintenance on wind power operation and maintenance

Ren Jiaqi

Huaneng Turpan Wind Power Co., Ltd.

[Abstract] In order to explore the impact of regular maintenance on wind farm operation and maintenance management, this article analyzes the role of regular maintenance from the dimensions of equipment reliability and power generation performance. Through rich operational data, the impact of regular maintenance on key indicators such as wind turbine failure rate, availability, and energy conversion efficiency was evaluated, revealing the significant effectiveness of regular maintenance in improving the overall performance of wind farms. At the same time, targeted strategic suggestions were put forward to optimize the interval of regular inspections, strengthen intelligent management, and promote standardization construction, providing practical and feasible ideas for further improving the efficiency of regular inspections.

[Key words] Regular maintenance; Wind power operation and maintenance; Component lifespan

1. 工程概况

以某大型风电场为例，该风电场总装机容量达 300MW，共安装 100 台单机容量为 3MW 的风力发电机组。风电场所处区域年平均风速达 7.5m/s，风能资源丰富，但同时也面临着沿海多台风、高温多尘等恶劣环境因素的考验。自投运以来，该风电场累计发电量已超过 20 亿度，成为当地重要的清洁能源基地。然而，随着风机运行时间的增加，部分机组开始出现故障率上升、可利用率下降等问题，运维成本压力日益增大。针对这一现状，风电场管理团队决定引入定期检修策略，优化风机运维模式。

2. 定期检修对风电运维的影响

2.1 定期检修对该风电场设备可靠性的影响

2.1.1 提高风机关键部件寿命

风机关键部件的可靠性直接影响着风电场的发电性能和运维成本。在该风电场的实际运行中，叶片、齿轮箱、发电机等关键部件的故障一直是制约风电场发电效率和可利用率提升的“卡脖子”问题。为此，该风电场从投运初期的事后维修策略，逐步转向以定期检修为主的预防性维护策略。通过开展定期的部件检查、润滑、校准等工作，风电场运维团队得以及时发现和消除关键部件的早期故障征兆，有效避免了高昂的停机维修费用^[1]。

以齿轮箱为例，该风电场机组的齿轮箱平均无故障工作时间 (MTBF) 从定期检修前的 8000 小时，提升至检修后的 12000 小时以上，使用寿命延长了 50%。类似地，定期更换易损件（如轴承、油液等）也使叶片和发电机的寿命得到明显改善。随着年度检修次数从 1 次增加到 3 次，关键部件 MTBF 呈近线性增

长趋势。这表明定期检修能够有效延缓关键部件的磨损速率，从而提升风机设备的整体可靠性。

2.1.2 降低风机故障率

风电机组故障率是衡量风电场运维质量和设备可靠性的关键指标。通过对该风电场历史运行数据的统计分析发现，定期检修的实施显著降低了风机故障发生的频率。具体而言，在引入定期检修策略前，该风电场百台风机的年平均故障次数高达 150 次，严重影响了风电场的发电效率和经济效益。而在实施季度定期检修后，年平均故障次数降至 80 次左右，降幅达 47%。造成这一积极变化的主要原因在于，定期检修可以主动发现和消除风机隐患，避免小故障酿成大问题。比如，定期检修时对叶片表面的裂纹进行修补处理，可以防止裂纹扩展导致叶片断裂等严重事故。再如，定期更换齿轮箱润滑油可降低齿轮磨损速率，延长齿轮箱使用寿命。此外，定期校准风机偏航、变桨等控制系统，可以优化风机运行工况，使其在设计工况下平稳运行，从而降低因非最佳工况引起的部件损伤概率。可以看出，定期检修通过事前预防、过程监控、事后维护等多种手段，全方位地提升了风机设备的本质可靠性，最终实现了风电场故障率的下降目标。

2.1.3 实现设备状态的精准掌控

在该风电场的定期检修实践中，设备状态监测与故障诊断技术发挥了至关重要的作用。通过在风机关键部位安装振动、油品、温度等传感器，风电场建立了一套实时、全面的设备状态监测系统，该系统可以连续采集风机运行参数，并通过与设定阈值对比，及时发现设备的异常状态^[2]。以该风电场 67 号风机为例，状态监测系统曾成功预警了一起齿轮箱损伤故障。通过对齿轮箱振动和油品颗粒度数据的趋势分析，系统在损伤发生前 3 天就识别出了异常征兆，为运维团队争取了宝贵的提前量。在随后的定期检修中，检修人员重点对齿轮箱进行了全面检查，发现了高速级齿轮的早期点蚀缺陷。通过及时更换新齿轮，风机避免了断齿等严重后果，减少了检修时间和成本。

状态监测与定期检修的有机结合，可以实现从“被动应对”到“主动预防”的维护模式转变，将风机故障消灭在萌芽状态，这不仅提升了风电场的设备可靠性和发电性能，也极大地节约了检修成本，为风电场的经济效益提升做出了重要贡献。

2.2 定期检修对该风电场发电性能的影响

2.2.1 减少风机非计划停机时间

风机可利用率是衡量风电场发电性能的核心指标，直接影响风电场的总体发电效益。该风电场实施定期检修前，部分风机长期处于带故障运行状态，导致非计划停机时间居高不下，风机年平均可利用率仅为 92%，远低于设计值。2019 年，风电

场引入季度定期检修制度后，风机可利用率连年提升，截至 2023 年，已达到 98.2% 的优异水平。这一积极变化的关键在于，定期检修有效降低了风机的非计划停机时间。一方面，通过定期排查和消除风机隐患，可防患于未然，避免严重故障的发生；另一方面，对于已出现的缺陷故障，定期检修可快速诊断原因，缩短故障处理周期，最大限度减少风机停运时长。以 18 号风机为例，定期检修时通过油品分析和齿轮磨损检查，及时发现了主轴早期损伤征兆。运维团队提前更换了主轴承，避免其带故障运行而引发二次损伤。此外，针对变桨和偏航系统的多发故障，检修团队优化了备件储备和抢修流程，使相关故障的平均修复时间从 10 小时降至 4 小时，大幅压缩了非计划停机时长。

该风电场 2018–2023 年风机年平均可利用率的逐年提升情况。随着定期检修工作的深入开展，风机非计划停运时间不断减少，可利用率稳步提高。以 2023 年为例，百台风机年平均可利用小时已达 8600 小时，超出区域平均水平 5%，处于行业领先地位。

2.2.2 提高风电机组能量转换效率

定期检修通过系统优化风机运行参数，可显著提高其能量转换效率。以该风电场 1 号机组为例，检修前其年平均发电效率仅为 38.2%，与设计值相差较大。通过分析 SCADA 系统采集的运行大数据，检修团队发现该机组存在偏航跟踪误差大、变桨策略不优等问题。在定期检修中，团队重新校准了风向传感器，优化了偏航控制算法，并根据机组实际工况，调整了变桨策略的关键参数。优化后，1 号机组的年平均发电效率提升至 42.5%，提高了 4.3 个百分点。

定期检修对风机能量转换效率的提升效果十分显著，平均提升幅度在 3–5 个百分点。这主要得益于系统全面的参数诊断和科学的优化策略。通过对风速、风向、功率等关键参数的精细化分析，检修团队准确掌握了风机实际运行工况，识别出制约发电效率的“短板”，并有针对性地开展参数优化，使机组运行状态始终处于最佳区域。可以预见，随着大数据分析、人工智能等新技术在定检领域的深入应用，风机参数优化将更加智能化、精细化，风电机组的能量转换效率也必将进一步提升，为风电产业的高质量发展注入新的动力。

2.2.3 实现风电场出力的精准预测

通过分析定期检修获取的风机健康状态数据，该风电场建立了一套先进的短期功率预测模型。该模型以机组 SCADA 采集的历史功率、风速等时序数据为基础，结合天气预报信息，应用机器学习算法对未来 48 小时的风电场出力进行滚动预测。

以 2022 年 6 月为例，该模型的平均绝对误差（MAE）仅为 6.2%，均方根误差（RMSE）为 8.1%，预测精度处于行业领先水

平。模型预测结果与实际出力的高度吻合，为电网调度部门安排次日计划提供了可靠依据。

引入定检数据后，预测值与实际值的偏差明显减小。尤其在风速波动较大的 8 时-16 时这一区间内，改进后的预测模型表现出更强的自适应能力，预测结果与实测值高度吻合。进一步计算可知，优化前功率预测平均误差高达 15.8%，优化后降至 4.7%，预测精度提升了 11.1 个百分点。

之所以能取得如此良好的预测效果，关键在于风机健康状态数据的积累与应用。通过定期检修，运维团队精准掌握了每台风机的部件磨损、性能衰减等即时状态，并将其作为功率预测模型的重要输入。当机组状态发生变化时，模型可自动校正，从而最小化设备状态对预测准确性的影响。定检数据与预测模型的深度融合，使该风电场在确保风机安全可靠运行的同时，也显著提升了发电量的可预测性，为新能源并网消纳创造了有利条件。

3. 针对该风电场的定期检修策略优化建议

3.1 动态优化检修时间间隔

传统的固定周期检修模式已难以适应风机设备状态的差异化变化趋势，亟需一种更灵活、更智能的新型检修模式。具体而言，可结合风机运行工况、故障模式、部件寿命等因素，构建自适应的检修周期优化模型。该模型以风机健康状态量化评估为基础，综合考虑振动、温度、油品等多源监测数据，对风机部件进行精准“体检”，及时发现早期故障征兆。基于部件退化规律和寿命预估结果，模型可智能推荐最优检修时间，在确保安全可靠的前提下最大限度延长检修周期，避免过度检修导致的资源浪费。

对于某型号齿轮箱，在可靠度要求不低于 0.95 的情况下，其最佳检修间隔可由原先的固定 12 个月延长至 18 个月，全生命周期检修成本可降低 23%。可见，动态优化检修时间，能在确保设备安全的同时，显著提升定检策略的经济性，是风电场智能运维的重要发展方向。

3.2 加强定检过程智能化管理

定期检修过程的智能化管理是提升风电场运维效率和精细化水平的关键举措。传统的人工巡检模式对检修人员的经验和技能依赖较大，难以保证检修过程的一致性和规范性。因此，该风电场亟需引入先进的智能化管理工具和手段，助力定检工作的标准化、高效化。一方面，为检修人员配备移动作业终端，可显著提升定检过程中数据采集的准确性和时效性。通过终端设备，检修人员可实时记录和上传设备状态、故障信息、维护记录等数据，实现检修过程的可视化管理。以该风电场为例，应用移动终端后，单台风机检修用时由 2 小时缩短至 1.5 小时，

工作效率提升 25%。另一方面，借助在线监测系统，可实现对风机关键部件和运行参数的实时监控。通过分析监测数据，可提前发现和预警潜在故障，为检修决策提供依据。在该风电场，应用在线监测已成功识别出 5 台风机的早期齿轮箱故障，避免了设备停运和二次损伤。此外，将虚拟现实（VR）技术引入检修培训，可全面提升检修团队的技能水平。VR 培训可模拟逼真的作业场景，使检修人员在安全可控的环境中熟悉作业流程和应急处置。该风电场已开发了涵盖 20 个常见检修工况的 VR 培训系统，提高了团队的检修熟练度。

3.3 开展定检业务的标准化与体系化建设

对于该风电场而言，健全完善的定检标准和规范，是提升定检质量、实现精细化管理的关键举措。具体而言，该风电场应着力从以下两方面入手，推进定检业务的标准化与体系化建设：一方面，制定覆盖各风机型号和部件的标准作业规范（SOP）。SOP 应明确定检的对象、内容、方法、频次、验收标准等关键要素，并通过流程图、照片等形式直观呈现，便于一线人员掌握和执行。同时，要建立健全 SOP 的定期评审和更新机制，根据设备状态变化、故障反馈等持续优化 SOP 内容，确保其适用性和有效性。如针对机舱振动加速度异常这一典型缺陷，可制定“风机机舱振动异常分析与处理”SOP，明确振动数据采集、故障分析、检修决策等关键环节，指导检修人员快速诊断和处置问题。另一方面，构建涵盖定检技术、管理、经验等多维度知识的业务知识库和专家系统。知识库应全面梳理风电场定检工作涉及的技术文档、图纸、方案、案例等资料，借助大数据分析、文本挖掘等技术，建立分门别类、条理清晰、查询便捷的知识管理平台。在此基础上，开发定检专家系统，将知识库中的结构化知识与专家经验相融合，形成故障排查指南、诊断规则库等，辅助检修人员快速准确地分析和解决问题。

结束语

综上所述，通过深入剖析该风电场的实践案例，可以看出，定期检修在降低风机故障率、提高可利用率、优化检修成本等方面发挥了关键作用，已成为风电场实现精细化运维、提质增效的重要抓手。展望未来，随着先进的状态监测、故障诊断、寿命预测等技术的应用，以及智能运维平台的搭建，定期检修必将朝着更加智慧化、精准化的方向发展，为风电产业的高质量发展注入澎湃动力。

参考文献

- [1]刘国良.基于全面技术监督的风电设备预知性检修探析[J].电力设备管理, 2024, (24): 144-146.
- [2]魏文博.大型风电场输变电设备运行分析及检修方法[J].电力设备管理, 2024, (15): 51-53.