

# Research on Optimization Maintenance of Wind Turbines Based on Opportunity Maintenance Strategy

Yujiang Liu

Hubei Longyuan New Energy Co., Ltd., Wuhan, Hubei, 430000, China

## Abstract

With the rapid development of wind power generation, the reliability and maintainability of wind turbines are increasingly concerned. This paper aims at the problems existing in the maintenance of wind turbine variable propeller system, and proposes a new maintenance strategy opportunity maintenance strategy. Based on the opportunity maintenance strategy based on risk assessment and maintenance optimization, the condition monitoring, fault prediction, automatic decision-making and optimal maintenance of wind turbines can be realized. By establishing the risk assessment model to predict the potential failure, and optimizing the maintenance scheme during the maintenance window period, the intelligent and future maintenance of the wind turbine is realized. The application of this maintenance.

## Keywords

wind turbine; paddle system; maintenance strategy; opportunity maintenance; risk assessment

## 基于机会维修策略的风电机组优化维护研究

刘玉江

湖北龙源新能源有限公司, 中国·湖北 武汉 430000

## 摘要

随着风力发电的快速发展,风电机组的可靠性和可维修性日益受到关注。本文针对风电机组变桨系统维修中存在的问题,提出了一种新的维修策略——机会维修策略。基于风险评估和维修优化的机会维修策略,可以实现风电机组的状态监测、故障预测、自动化决策和优化维修。通过建立风险评估模型预测潜在故障,利用维修时窗期优化维修方案,实现风电机组的智能化和未来化维修。这种维修策略的应用,不仅可减少风电场的运维成本,提高发电可靠性,而且对风电的经济性有重大帮助。论文通过理论分析和案例研究验证了该策略的有效性,并对下一步的应用与发展进行了展望。

## 关键词

风电机组; 变桨系统; 维修策略; 机会维修; 风险评估

## 1 引言

风力发电作为清洁高效的可再生能源形式,已经得到了长足的发展。中国风电装机容量也快速增长,2020年底风电装机容量达到2.8亿千瓦。风力发电的快速增长对风电设备的可靠性与维修提出了更高要求。风电机组中的变桨系统直接关系到风电机组的效率和发电量,变桨系统的故障将严重影响风机的发电效果。如何提高变桨系统的可靠性和可维修性是当前亟待解决的问题。本文针对现有维修模式存在的不足,提出一种新的维修策略——机会维修策略,通过风险评估和维修优化实现风电设备的状态监测、故障预测、决策支持和智能化维修,以减少维修成本、提高维修质量和系统可靠性。

【作者简介】刘玉江(1990-),男,中国湖北咸宁人,本科,助理工程师,从事风电、光伏研究。

## 2 风电机组变桨系统的维修现状与挑战

### 2.1 变桨系统的工作原理与故障类型

变桨系统是指安装在风力发电机后部的变桨机构,其作用是维持风力机的稳定,并根据风速强弱的变化,通过桨叶的变角调节转子对风的利用效率。变桨系统主要包含变桨控制器、变桨执行器和变桨机构等部件,其工作过程如下:变桨控制器探测风向风速,并根据预设曲线向执行器发出相应指令,执行器带动变桨轴发生转动,以改变桨叶的桨距角,从而增大或减小叶轮对风的吸收功率<sup>[1]</sup>。变桨系统在运行过程中,可能发生螺栓松动、齿轮磨损等机械故障,也可能出现电机失步、变桨滞后等电气故障,甚至还可能发生无法工作的液压系统故障。除此以外,环境因素如过度腐蚀、冰雪堆积也能导致变桨系统故障。这些故障的发生将降低风力发电机的利用效率,造成风电场损失。

### 2.2 当前维修模式的局限性

当前风电机组变桨系统主要采用定期维修的方式,即

按照预先规定的周期和标准对设备进行检测与保养。这种维修模式存在一定局限性<sup>[2]</sup>。首先,定期维修往往过于保守,不论设备是否需要维修都按期进行,造成一定的浪费。其次,定期维修无法针对变桨系统的实时状态进行响应,一旦发生故障,只能被动维修,无法预测和防范。另外,定期维修也缺乏对维修质量与效果的评估与控制,很难确定最佳的维修策略。最后,定期维修对于风电场环境恶劣的实际情况也考虑不足,无法根据不同条件制定差异化的维修方案。总体来说,传统的定期维修模式,很难实现风电机组变桨系统维修的经济高效。需要开发新型的维修模式来满足风电行业对系统可靠性与可维修性的需求。

### 2.3 机会维修的概念及优势

机会维修是近年来提出的一种新型维修策略,其核心理念是在系统或设备满足一定条件下,抓住最有利的时机开展维修工作,实现维修的最优决策。相比定期维修,机会维修具有至少三个明显优势:第一,机会维修基于对设备实时状态的监测与风险评估结果来确定维修时机,可以实现状态驱动的维修,节省不必要的时间和人力成本。第二,机会维修充分利用系统或设备的低负荷时段、停运期等有利时机来开展维修,大大减少和避免了维修过程对正常运转的影响。最后,机会维修支持智能化的维修方案选择与资源优化配置,可以持续提高维修质量,并最终达到预测维修的目标。

### 2.4 维修资源的配置与管理

风电场运维体系复杂,维修资源配置与管理直接影响着风电机组的可靠运行与维护成本。合理的维修资源配置应满足发电系统运营需求,实现人力、物力、财力的优化匹配<sup>[3]</sup>。具体来说,需要建立科学的人员编制体系,合理配置技术熟练、经验丰富的运维技术人员,并加强信息化手段建设,提高运维人员的协同效率。同时,要合理配备先进的检测设备与专业维修工具,保障维修工作的有效实施。此外,还需要合理预算与使用维修资金,以保证资源需求与获取之间的平衡。

## 3 机会维修策略下的变桨系统维修优化模型

### 3.1 优化模型的构建

机会维修策略下的变桨系统维修优化是一个复杂的决策过程,需要建立科学的模型对其进行指导。论文构建了一种基于多目标优化的维修优化模型。该模型的目标是最小化维修成本和风电机组停机损失,优化变量包括维修类型方案的选择、维修时机的确定以及维修资源的调度配备三个方面。模型通过获取历史故障数据、实时状态监测、故障风险评估与预测等手段,预测机组部件的故障模式和风险水平。考虑修理确定性、修理质量、备件周转时间等影响因素,对每种潜在故障,模型可以智能生成多个维修方案备选;同时,利用运维知识库和经验库,可以识别当前或近期的低风环境、系统停运期等维修良机,确定可选的维修时长;最后

模型可以在人力、设备、材料各维修资源间进行优化配置,制定出综合效益最优的机会维修计划。该模型运用了先进的监控技术、大数据分析、人工智能与优化方法,实现了对变桨系统的状态评估、故障风险预测、维修时机识别、维修方案设计、资源优化配置等一系列智能决策功能,可显著提升维修的自动化和最优化水平,降低风电场的运维成本。

### 3.2 故障预测与维修时机决策

变桨系统的有效维修需要准确预测潜在故障与合理确定维修时机。基于机会维修策略的优化模型集成了故障预测与维修时机决策两个关键模块。例如针对变桨系统中出现的传动轴承损坏情况,模型首先收集轴承温度、振动等历史运行数据,建立相关故障与特征变量之间的关联模型,可以实现对轴承剩余寿命和潜在故障模式的预测。同时,模型可以结合气象信息、风电机组日常运行数据等,自动识别出未来一段时间内风电机组出力较低的时段,以及系统停运期等潜在维修时机。并在综合考虑修理工作时长、维修资源约束条件下,确定在6天后上午的系统停工8小时时段安排变桨轴承的更换作业,是较佳的维修决策选择。通过对关键部件的状态监测、风险评估与预测,以及对维修时机的自动识别与评估比较,实现了维修工作的主动决策与智能化安排,大幅缩短了故障的影响时间,减少了由此带来的损失。

### 3.3 维修策略的选择与实施

风电机组变桨系统的机械维修实施中,合理选择适当的维修策略至关重要。针对同一故障情况,模型可以生成多个备选的维修策略,并进行决策评估和优化选择。例如,针对变桨电机罩内出现严重水分积聚的情况,优化方案将会考虑“现场快速抽干”“部分部件清洗”“整体电机更换”三种策略。其中第一种策略操作简单,停机时间短,但不能从根本上解决问题;第二种策略工作量大,维修质量更有保障;第三种策略成本最高,但可以带来较长的无故障工作周期。模型会综合考量上述方案的可行性约束条件,评估并比较其停工时间、维修服务寿命、总体成本等指标,最终确定出“部分部件清洗”为针对该故障的最优维修策略,并自动生成相应的维修作业计划,包括所需技工数量、维修工时安排、备品备件信息等详细实施内容,为现场抢修提供决策支持。

### 3.4 模型的验证与应用案例

为验证所构建优化模型的有效性,本文选取某风电场的#3机组变桨系统进行了案例分析。该机组历史运行数据显示,其中的变桨电动执行器曾多次出现过载报警故障,预测结果为在未来50天内有80%的概率再次发生该故障。传统的定期维保策略预计会在60天后进行一次系统检修,维修成本在1500元左右。对比之下,优化模型预测到在20天后风电机组将进入为期3天的重大检修停机期,这为维修创造了难得机会。模型决定在此次停机期更换变桨电动执行器的关键部件,该维修方案的总体成本约为800元,并有效防范和减少了后续的过载故障发生风险。实际执行后结果表

明,该次及时的维修避免了预期的过载故障,直接经济损失减少了约2000元;并且在之后3个月的运行期内,机组以更高的可利用率发出额外电量约12万千瓦时。通过该应用案例可以验证,相比之下该模型推荐的机会维修策略可以带来更好的经济效益,其决策结果是高效准确的。

## 4 机会维修策略的实施挑战与未来发展

### 4.1 实施过程中的挑战

机会维修策略在风电机组的实际应用中,其实施过程也会面临一定的挑战与难点。例如风电场环境复杂多变,天气状况难以精确预测,这对维修时机的捕捉与抓取带来一定困难,一些维修机会可能会被错过,无法充分发挥维修作用。另外,机会维修策略对风电机组的实时状态监测与风险预测提出了更高需求,但部分关键部件和故障模式的状态检测与预警能力还有待提高,也制约了策略的落地实施。最后,该策略实施与推广过程中,维修管理水平和过程控制能力也是关键影响因素。实践中,风场技术人员的专业素质参差不齐,状态数据收集与管理经常不规范,关键业务流程执行也存在失控风险,这些都可能影响到机械维修工作的顺利开展。这要求在推行新策略的同时,必须持续加强训练及规范化建设,并逐步完善管理体系建设,以适应维修模式的转型升级。

### 4.2 技术创新的影响

新兴技术和手段的应用,将对机会维修策略实施提质增效起到重要支撑作用。例如在线状态监测和预警技术的进步,使得我们可以更及时、精确地掌握风电机组的健康状态,为捕捉维修良机创造了可能;另外,以数字孪生技术、AR/VR技术为代表的新一代维修辅助手段,则可以显著提高故障预测的效能,指导现场维修人员更好地实施维修任务,保障了机械维修的闭环执行。此外,基于大数据和AI算法的维修管理与优化能力提升,也将机会维修策略的制定落地提供更强力支持,实现从状态监测、风险评估到维修决策再到

效果评估的全流程智能化。随着新技术在风电领域应用的深入,预计机电维修模式将得到更广泛和深入的推行,其将以更高效的方式减少风电设备的运维成本、延长服务寿命。这必将使风电的经济性与市场竞争力进一步增强。

### 4.3 长期发展展望

展望未来,智能化的机会维修策略必将在风电机组变桨系统维护中取得广泛应用,并逐步向预测维修理念发展。在技术层面,状态检测与风险评估手段将更加精确可靠,维修决策的自主性和最优性也将不断增强,更高效的人工智能与优化算法的引入也将使其向预测性维修方向演进。在管理模式上,这将推动运维体系向状态驱动与风险导向的方式转型;同时数字化和信息化水平的不断提高也为机会维修策略的有效执行和管理创造了可能。可以预见,风电机组变桨系统的整体可靠性、可维修性与经济性指标都将得以大幅度提升。智能化的机电维修策略与模式,必将成为推动风电产业可持续发展的重要因素之一。

## 5 结语

针对风电机组变桨系统维护过程中面临的问题与挑战,提出了机械维修这一新的维护策略思路。文中构建了基于风险评估和多目标优化的维护决策模型,可实现对故障风险的预测及维护时机的识别,并提供维护方案的智能决策,以达到优化配置与使用维修资源的目的。相信该策略的应用不仅可减少风电场的运维成本,提高系统可靠性,也为风电的持续健康发展提供保障。当然转型升级也将面临一定考验,还有待业界共同努力。

### 参考文献

- [1] 王建国,田德,陈函伯,等.风电机组的机舱振动位移极值模型与现场数据验证[J].太阳能学报,2023,44(12):221-229.
- [2] 刘登权,程志江,袁嘉旺.漂浮式海上风电机组稳定控制策略研究[J].太阳能学报,2023,44(12):316-322.
- [3] 赵清英,门孝伟,姚帅亮.基于风电机组聚类的风电场有功分层分配策略[J].太阳能学报,2023,44(12):306-315.