

关于风电设备在线带电清洗作业的研究

史明亮, 贺彦伟, 明亮, 李万里, 傅永安
国华(哈密)新能源有限公司, 新疆 哈密 839000

摘 要 : 风力发电机在运行过程中会受到灰尘、雨水、杂质等影响, 导致风叶表面附着有大量灰尘, 影响风力发电机的正常工作。风力发电机是风力发电系统中的重要组成部分, 运行性能直接影响整个发电系统的正常工作。本文深入研究了风电设备在线带电清洗作业的技术原理、作业流程、关键技术、安全风险控制及当前存在的问题, 并提出了相应的改进建议。本研究对于提高风电设备清洗效率和清洁度、保障设备安全运行、促进风电行业可持续发展具有重要意义。

关 键 词 : 风电设备; 在线带电清洗; 作业安全; 清洗技术

Research on Online Live Cleaning Operation of Wind Power Equipment

Shi Mingliang, He Yanwei, Ming Liang, Li Wanli, Fu Yong'an
Guohua (Hami) New Energy Co., Ltd. Hami, Xinjiang 839000

Abstract : Wind turbines are affected by dust, rainwater, impurities, and other factors during operation, resulting in a large amount of dust adhering to the surface of the wind blades, which affects the normal operation of the wind turbine. Wind turbines are an important component of wind power generation systems, and their operational performance directly affects the normal operation of the entire power generation system. This article delves into the technical principles, operational processes, key technologies, safety risk control, and current issues of online live cleaning of wind power equipment, and proposes corresponding improvement suggestions. This study is of great significance for improving the cleaning efficiency and cleanliness of wind power equipment, ensuring the safe operation of equipment, and promoting the sustainable development of the wind power industry.

Keywords : wind power equipment; online live cleaning; homework safety; cleaning technology

引言

随着全球能源结构的转型和可持续发展战略的深入实施, 风电作为清洁、可再生的能源形式, 其发展速度迅猛, 已成为全球能源供应体系中的重要组成部分。然而, 风电设备在运行过程中, 不可避免地会受到环境因素的影响, 导致设备表面积累大量污垢和污染物, 这不仅降低了设备的发电效率, 还可能对设备的正常运行造成安全隐患。因此, 定期对风电设备进行清洗维护, 保持其清洁状态, 是确保风电场高效、稳定运行的关键环节。

传统的风电设备清洗方式多为离线清洗, 需要停机后进行人工清洗或机械清洗。这种方式存在诸多弊端, 停机清洗会导致风电场发电量减少, 造成经济损失; 人工清洗成本高、劳动强度大, 清洗效果难以保证^[1]。因此, 探索一种高效、安全、经济的风电设备清洗方式显得尤为重要。在线带电清洗技术正是在这一背景下应运而生。本文旨在深入研究风电设备在线带电清洗作业, 探讨在线带电清洗技术在风电设备清洗中的应用效果及优势, 为风电行业提供一种新的、高效的清洗解决方案。本文希望通过对风电设备在线带电清洗作业的全面研究, 为推动风电行业的可持续发展贡献一份力量。

一、风电设备在线带电清洗技术概述

(一) 技术原理

风电设备在线带电清洗技术, 是指在风电设备正常运行、带电状态下进行的清洗作业。技术原理主要基于特定的清洗剂和清洗工艺, 这些清洗剂需具备高绝缘性、低腐蚀性、良好的溶解和分散能力, 以及在电场作用下保持稳定性的特性。在清洗过程中, 清洗剂通过特定的喷洒装置均匀覆盖在设备表面, 利用清洗剂对污垢的溶解、乳化、剥离等作用, 将设备表面的污物、油

脂、盐渍等有效去除^[2]。通过控制清洗剂的参数, 确保清洗过程对设备本身的电气性能和机械性能不造成损害。在线带电清洗技术的另一个关键要素是电场保护。由于风电设备在运行过程中会产生高压电场, 清洗作业必须在保证人员安全的前提下进行。通过采用绝缘性能良好的清洗工具、穿戴专业的防护装备、设置安全隔离区域等措施来实现。

(二) 技术特点与优势

风电设备在线带电清洗技术相较于传统离线清洗方式, 具有显著的技术特点和优势。该技术实现了清洗作业与设备运行的同

步进行，避免了因停机清洗而造成的发电量损失和经济损失。在线清洗能够更彻底地清除设备表面的顽固污垢，提高清洗效果，延长设备使用寿命。该技术采用自动化或半自动化的清洗设备，降低了人工劳动强度，提高了清洗效率。通过精准控制清洗剂的用量和浓度，减少了化学品的浪费和环境污染，符合绿色发展的要求。

风电设备在线带电清洗技术的优势主要体现在：经济效益显著，减少了因停机清洗带来的发电损失。清洗效果好，能够彻底清除设备表面的污垢，提高发电效率。安全性高，通过严格的电场保护措施和实时监测技术，确保清洗作业的安全进行。节能环保，采用低腐蚀性、易降解的清洗剂，减少了对环境的污染。灵活性强，能够适应不同型号、不同运行状态的风电设备的清洗需求。

二、风电设备在线带电清洗作业流程与关键技术

（一）作业前准备

在进行风电设备在线带电清洗作业之前，充分的准备工作是确保作业顺利进行和保障安全的关键。首先，需要对风电设备的运行状态进行全面评估，确定清洗作业的安全性和可行性。根据设备的具体型号、结构和污染程度，制定详细的清洗方案。其次，清洗剂的选择是作业前准备的重要环节。清洗剂需具备高绝缘性、低腐蚀性、良好的溶解和分散能力，以及适合在电场中使用的稳定性；还需考虑清洗剂的环保性，确保在使用过程中不会对环境及设备造成二次污染。此外，作业前还需准备高压清洗机、喷枪、防护服、绝缘手套、安全帽等必要的清洗设备和工具，这些设备和工具需经过严格的安全检查，确保其绝缘性能和机械性能符合使用要求^[3]。最后，作业前需对清洗作业人员进行专业培训和安全教育。培训内容应包括清洗剂的性能特点、使用方法和注意事项，清洗设备的操作和维护知识，以及电场保护和应急处理措施等。通过培训，使清洗作业人员熟悉作业流程和安全规范，增强安全意识和应急处理能力。

（二）清洗作业实施

在作业前准备充分的基础上，可以开始风电设备在线带电清洗作业的实施。清洗作业的实施应严格按照清洗方案进行，遵循“先易后难、先上后下、先外后内”的原则。首先，使用软毛刷、吸尘器等工具对设备表面进行初步清理，去除大块污垢和杂物，避免使用金属工具刮擦设备表面损坏绝缘层。然后，根据清洗方案，将清洗剂按照一定比例稀释后，通过高压清洗机或喷枪均匀喷洒在设备表面。在喷洒过程中，注意控制喷洒压力和角度，避免清洗剂溅入设备内部或对人体造成伤害。喷洒清洗剂后，等待一段时间让清洗剂充分渗透和溶解污垢。在等待过程中，密切关注设备的运行状态和电场变化情况，确保清洗作业不会对设备的安全运行造成影响^[4]。最后，使用高压清洗机或清水对设备表面进行冲洗，将溶解后的污垢和清洗剂彻底清除。在冲洗过程中，注意冲洗水的流向和速度控制，避免冲洗水溅入设备内部或对人体造成伤害。冲洗完成后，使用干净的布或纸巾将设备表面擦

干，避免水分残留导致设备腐蚀或短路。

（三）关键技术探讨

在风电设备在线带电清洗作业中，关键技术包括清洗剂的选择与配比、清洗工艺的设计与优化、电场保护技术的应用等，清洗剂的选择与配比是影响清洗效果和安全性的的重要因素。选择合适的清洗剂并合理配比可以确保清洗剂在电场中保持稳定性和绝缘性，同时具有良好的溶解和分散能力。清洗工艺的设计与优化也是提高清洗效率和效果的关键。通过优化清洗工艺参数如喷洒压力、喷洒角度、等待时间等可以进一步提高清洗效果并减少清洗时间和成本。电场保护技术则是保障清洗作业安全进行的重要保障措施之一。通过采用绝缘性能良好的清洗设备和工具、设置安全隔离区域等措施可以有效降低电场对清洗作业人员和设备的影响确保清洗作业的安全进行。

三、风电设备在线带电清洗的安全与风险控制

（一）安全风险识别

安全风险识别作为风电设备在线带电清洗作业安全管理的首要环节，要求在作业前详尽梳理并评估所有潜在风险。这些风险涵盖电击风险，即作业人员未采取充分绝缘措施时可能因设备高压电场而遭受电击；坠落风险，源于风电设备高处作业环境的特殊性，增加了高空坠落的风险；化学危害，清洗剂中的腐蚀性或刺激性成分可能对作业人员的皮肤和眼睛构成直接威胁；机械伤害，操作不当的清洗设备和工具可能导致的意外伤害；以及环境风险，包括作业过程对环境的潜在污染及恶劣天气对作业安全性的不利影响。全面识别并评估这些风险，是确保风电设备在线带电清洗作业安全进行的重要前提。

（二）安全管理体系构建

为确保风电设备在线带电清洗作业的安全进行，需构建一套全面的安全管理体系。该体系应涵盖安全规章制度的建立，明确操作规程、应急预案及安全职责；加强安全培训，提升作业人员的安全意识和操作技能；提供符合标准的个人防护装备，如绝缘服、手套、安全帽及防护眼镜，以保障作业人员人身安全；强化设备安全管理，通过定期检查与维护保养，确保清洗设备处于最佳工作状态与绝缘性能；在作业现场设置安全警示标志和隔离区域，禁止非作业人员进入作业区域。同时加大现场巡查和监控力度，及时发现并处理安全隐患。

（三）风险控制策略

在识别安全风险并构建安全管理体系的基础上，需要制定有效的风险控制策略以进一步降低风险。采用先进的清洗技术和设备降低作业难度和风险。例如使用自动化清洗设备减少人工操作风险；选用低腐蚀性、环保型清洗剂减少化学危害等。通过加强安全管理、完善安全规章制度等措施提高管理水平降低管理风险。例如建立严格的安全检查制度确保作业前对设备、工具和个人防护装备进行全面检查；建立安全隐患排查机制及时发现并处理潜在的安全隐患等。制定详细的应急预案并定期组织演练提高应急响应能力。在发生紧急情况时能够迅速启动应急预案采取有

效措施控制事态发展减少损失和影响^[6]。

四、存在问题与改进建议

（一）问题分析

1. 技术标准化不足

目前，风电设备在线带电清洗技术尚未形成统一的技术标准和规范。不同厂家、不同型号的设备在清洗过程中可能需要采用不同的清洗剂、清洗工艺和清洗设备，这增加了清洗作业的复杂性和不确定性。

2. 清洗剂选择困难

清洗剂的选择是清洗作业中的关键环节。市场上清洗剂种类繁多，性能各异，不同清洗剂对设备材质、绝缘性能的影响也不尽相同。在选择清洗剂时，需综合考虑清洗效果、腐蚀性、环保性等多种因素，这给清洗作业带来了一定的困难^[5]。

3. 安全风险较高

风电设备在线带电清洗作业涉及高压电场和复杂的机械结构，安全风险较高。如果作业人员缺乏必要的安全知识和技能，或安全管理体系不完善，可能导致电击、坠落、化学危害等安全事故的发生。

4. 清洗效果评估困难

清洗效果的评估是判断清洗作业是否成功的重要标准。由于风电设备结构复杂、表面积大且分布广泛，难以对清洗效果进行全面、准确的评估。不同清洗剂、不同清洗工艺对清洗效果的影响也存在差异，这进一步增加了评估的难度。^[7]

（二）改进建议

1. 加强技术标准化建设

推动风电设备在线带电清洗技术的标准化进程，制定统一的技术标准和规范。通过标准化建设，明确清洗作业的技术要求、操作流程和安全规范，提高清洗作业的规范性和可操作性。加强与国际先进技术的交流与合作，引进和消化国际先进技术成果，

提升我国风电设备在线带电清洗技术的整体水平。^[8]

2. 优化清洗剂选择

加强对清洗剂的研究和开发工作，开发出性能优良、环保型、适用范围广的清洗剂。在选择清洗剂时，综合考虑清洗效果、腐蚀性、环保性等因素，根据设备材质、绝缘性能等具体情况进行选择。建立清洗剂性能评价体系和数据库，为清洗剂的选择提供科学依据。

3. 完善安全管理体系

建立健全风电设备在线带电清洗作业的安全管理体系，明确安全管理职责和操作流程。加强作业人员的安全教育和培训工作，提高安全意识和操作技能水平。建立安全隐患排查机制和安全风险评估体系，及时发现并处理潜在的安全隐患。加大现场安全管理力度，确保作业现场的安全有序。^[9]

4. 建立清洗效果评估体系

建立科学、合理的清洗效果评估体系和方法，对清洗效果进行全面、准确的评估。评估体系应包括清洗前后的对比测试、清洗效果的量化指标和评估标准等内容。通过评估体系的建立和实施，及时发现清洗作业中存在的问题和不足。^[10]

五、结语

通过深入探讨，不仅加深了对风电设备在线带电清洗技术的理解，也为该技术的进一步优化和发展提供了有益的思路。我们需要不断加强技术研发和创新，提高清洗效率和效果，降低作业成本和安全风险。我们还需要加强行业标准的制定和推广，促进技术的规范化和标准化发展。加强人才培养和团队建设也是推动该技术发展的关键。总之，风电设备在线带电清洗技术的研究与应用是一个系统工程，需要政府、企业、科研机构等多方面的共同努力。随着技术的不断成熟和完善，风电设备在线带电清洗技术将在风电运维领域发挥更加重要的作用，为风电产业的可持续发展贡献力量。

参考文献

- [1] 李景洲. 风电塔筒清洗机器人设计与研究 [D]. 燕山大学, 2021.
- [2] 李玉军. 风力发电机组塔筒清洗机器人的设计与研究 [D]. 兰州理工大学, 2022.D01:10.27206/d.cnki.ggsgu.2022.001131.
- [3] 刘学来. 基于深度学习的电力设备故障诊断及系统开发 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
- [4] 姚鹏, 刘洪冰, 郭志杰, 等. 风电机组变桨轴承在线清洗检查工艺 [C] // 中国农业机械工业协会风力机械分会. 第九届中国风电后市场交流合作大会论文集. 清华大学天津高端装备研究院洛阳先进制造产业研发基地; 中能智能 (北京) 能源科技有限公司, 2022: 4.
- [5] 朱俊秋. 浅析风电齿轮箱零件清洁度控制与量化检测 [J]. 中国设备工程, 2021, (19): 177-179.
- [6] 杨晓乐. 服务器带电清洗作业的应用分析 [C] // 中国电力技术市场协会. 2023年电力行业技术监督工作交流会暨专业技术论坛论文集 (上册). (国华 (赤城) 风电有限公司) 河北省张家口市赤城县云州乡虎龙沟村冰峰风电场, 2023: 3.
- [7] 郭海良, 高江鹏, 汪鹏飞, 等. 变电设备带电化学清洗技术应用 [J]. 清洗世界, 2018, 34(10): 8-12+18.
- [8] 张凯. 带电作业关键技术研究进展及其前景发展 [J]. 工程技术研究, 2019, 4(14): 247-248.
- [9] 黄德明. 浅谈带电化学清洗技术在高压电力设备中的运用 [J]. 福建建材, 2021, (01): 102-103+116.
- [10] 郭文东, 马奎, 车靖阳. 大数据分析的电力设备运行安全性综合评估 [J]. 信息技术, 2021, (04): 159-163+169.