

风力与光伏发电场景下电气自动化设备维护及氢能应用技术研究

虞晓晖

广东 佛山 528000

DOI:10.61369/WCEST.2025070010

摘 要： 本研究聚焦风光发电场景，涉及电气自动化设备维护与氢能应用技术。从风机变流、变桨系统监测，到光伏电站自动化控制，再到风光制氢系统集成等多方面阐述技术要点。探讨储氢 - 发电协同、故障预警、热斑检测等技术，以及安全联锁、监控、数字孪生等实践，旨在推动风光发电领域高效、清洁、可持续发展。

关 键 词： 风光发电；电气自动化；氢能应用

Research on Maintenance of Electrical Automation Equipment and Hydrogen Energy Application Technology in Wind and Photovoltaic Power Generation Scenarios

Yu Xiaohui

Foshan, Guangdong 528000

Abstract： This study focuses on the scenario of wind and solar power generation, involving the maintenance of electrical automation equipment and hydrogen energy application technology. Elaborate on technical key points from various aspects such as monitoring of wind turbine converter and pitch system, automation control of photovoltaic power station, and integration of wind solar hydrogen production system. Exploring technologies such as hydrogen storage power generation synergy, fault warning, hot spot detection, as well as safety interlocking, monitoring, digital twin, etc., with the aim of promoting efficient, clean, and sustainable development in the field of wind and solar power generation.

Keywords： wind and solar power generation; electrical automation; hydrogen energy application

引言

随着“双碳”目标的提出（2020 年），风力与光伏发电作为清洁能源的重要组成部分，迎来了快速发展机遇。在此背景下，其电气自动化设备维护及氢能应用技术至关重要。直驱 / 双馈式风机变流系统、光伏电站设备等需先进监测与控制技术保障运行。风光制氢系统集成、储氢 - 发电协同控制等技术不断发展。同时，在故障预警、热斑检测、安全联锁设计等方面也有诸多创新。然而，数字孪生、边缘计算等新技术应用面临挑战，氢能系统在电解效率、储运成本、安全认证标准等方面存在瓶颈。本研究围绕这些展开，为实现高效、稳定能源供应提供思路，推动行业可持续发展。

一、新能源发电场景下的设备运维特性分析

（一）风力发电场景设备维护技术

在风力发电场景中，直驱 / 双馈式风机变流系统的故障模式多样，需借助先进的状态监测技术，如通过对电流、电压等关键参数的实时监测与分析，及时发现潜在故障隐患^[1]。变桨控制单元同样至关重要，其故障会影响风机叶片角度调节，对发电效率与安全性产生严重影响，所以要密切监测其控制信号、电机运行状态等。而 SCADA 系统在设备健康管理中扮演关键角色，它能够收集、整合

并分析风机各类运行数据，构建设备健康模型，实现对设备状态的精准评估与预测性维护，提前规划维护策略，降低运维成本，保障风力发电设备持续稳定运行，提高发电效率与经济效益。

（二）光伏电站自动化控制需求

在光伏电站中，自动化控制需求体现在多个关键方面。对于组串式逆变器，需实现智能诊断以确保其高效稳定运行。智能诊断技术能实时监测逆变器的各项运行参数，如输出功率、转换效率、温度等，通过大数据分析 with 故障模型比对，精准定位潜在故障隐患，及时发出预警^[2]。MPPT 控制系统参数优化至关重要，

旨在使光伏板始终追踪最大功率点，提高发电效率。通过对光照强度、温度等环境因素的实时监测，动态调整 MPPT 控制参数，确保光伏阵列在不同工况下都能输出最大功率。直流侧绝缘监测方案同样不可或缺，它能及时检测直流侧绝缘状态，预防因绝缘失效引发的电气安全事故，保障人员与设备安全，为光伏电站可靠运行筑牢根基。

二、氢能耦合技术路径研究

（一）风光制氢系统集成架构

风光制氢系统集成架构主要围绕风力发电、光伏发电以及电解制氢设备展开。风力发电和光伏发电部分通过各自的转换装置将风能、太阳能转化为电能。这些电能一部分直接用于本地负载，多余电能则输入到电解制氢系统。电解制氢系统核心是依据建立的电解槽容量配置模型^[9]，配置合适的电解槽，这里采用离网型 PEM 电解制氢系统。该系统能够在电能输入后，通过电化学反应将水分解为氢气和氧气。在运行过程中，其动态响应特性对整个系统稳定性至关重要，同时需要合理的能量管理策略，确保在风光发电不稳定情况下，制氢过程高效、稳定进行，实现风能、太阳能与氢能之间的有效耦合转换。

（二）储氢 - 发电协同控制技术

在风力与光伏发电场景下，储氢 - 发电协同控制技术至关重要。研究燃料电池调频特性与储氢罐阵列压力协调控制算法是实现高效协同的关键^[4]。燃料电池的调频特性决定了其在电力系统频率调节中的响应能力，需深入分析其动态特性及与电网频率变化的关联。同时，储氢罐阵列压力的精准控制对维持储氢系统稳定和高效供氢意义重大。通过构建协调控制算法，能有效整合燃料电池与储氢罐的运行，使其相互配合。在此基础上，构建氢储能参与电网辅助服务的运行机制，明确氢储能能在电网调频、调压及备用等辅助服务中的角色和运行模式，提高电网稳定性和可靠性，实现风力与光伏发电场景下氢能与电力系统的深度耦合与协同运行。

三、智能运维技术实证研究

（一）设备预测性维护案例

1. 风机齿轮箱故障预警

在风力发电场景中，风机齿轮箱故障会严重影响发电效率与设备安全。为实现精准的故障预警，基于振动频谱分析和油液检测数据开发深度神经网络诊断模型至关重要。振动频谱能反映齿轮箱运行过程中的振动特征，不同的故障类型往往对应特定的振动频谱模式^[9]。而油液检测数据则可揭示齿轮箱内部零部件的磨损、腐蚀等情况。将这两类数据作为深度神经网络的输入，利用其强大的特征提取与模式识别能力，对齿轮箱的运行状态进行实时监测与分析。通过大量历史数据对模型进行训练与优化，使其能够准确识别早期故障特征，提前发出预警信号，以便运维人员及时采取措施，避免故障进一步恶化，降低维修成本，保障风机的稳定可靠运行。

2. 光伏板热斑检测

在风力与光伏发电场景下，光伏板热斑问题严重影响发电效率与设备寿命。采用无人机红外成像与 IV 曲线诊断的融合检测技术进行光伏板热斑检测具有重要意义。无人机红外成像可快速获取大面积光伏板的温度分布，直观发现温度异常区域，初步定位热斑可能位置^[9]。IV 曲线诊断则能通过分析光伏板电流 - 电压特性曲线，精准判断光伏板性能变化，进一步确认热斑存在及严重程度。将两者融合，在现场验证中，首先利用无人机对光伏板阵列进行快速扫描，初步锁定可疑区域，随后对这些区域进行 IV 曲线诊断，两者相互补充，极大提高热斑检测的准确性与效率，为光伏板热斑的及时发现与处理提供可靠依据，保障光伏发电系统稳定运行。

（二）氢系统安全监控实践

1. 制氢站安全联锁设计

在制氢站安全联锁设计中，需充分考虑多种因素以保障系统安全。借助氢浓度多传感器融合监测技术，可精准、实时地获取制氢环境中的氢浓度信息。通过对多个传感器数据的融合处理，能有效提升监测的准确性与可靠性，降低误报率。基于此监测数据，利用 PLC 实现紧急停机逻辑。当氢浓度达到设定的危险阈值时，PLC 迅速做出反应，触发紧急停机指令，使制氢设备停止运行，防止可能发生的爆炸等严重安全事故。这一安全联锁设计，将氢浓度监测与紧急停机逻辑紧密结合，形成一套完善的制氢站安全保障机制，为制氢站在风力与光伏发电场景下的稳定、安全运行提供有力支撑^[7]。

2. 输氢管道泄漏定位

在风力与光伏发电场景下氢系统安全监控实践中，输氢管道泄漏定位至关重要。基于分布式光纤传感技术的氢气管网健康监测系统为输氢管道泄漏定位提供了有效手段^[8]。该技术利用光纤作为传感介质，当输氢管道发生泄漏时，氢气与光纤中的敏感物质发生反应，引起光纤光信号的变化。通过对光信号的实时监测和分析，能够精确确定泄漏位置。例如，在某实际部署案例中，系统可将泄漏定位精度控制在较小范围内，及时发现潜在泄漏点，为采取应急措施争取时间，避免氢气泄漏引发的安全事故，保障了输氢管道在风力与光伏发电场景下的安全稳定运行，有效提升了氢系统整体安全性。

四、技术发展路径与挑战

（一）设备运维技术优化方向

1. 数字孪生技术应用

在风力与光伏发电场景下，数字孪生技术应用于电气自动化设备运维技术优化面临着特定的发展路径与挑战。通过构建涵盖电气参数、机械应力和环境因素的多物理场仿真模型，为数字孪生技术奠定基础。借助该模型，可对设备的运行状态进行精准模拟和实时监测，实现虚拟空间与物理实体的高度映射^[9]。然而，此技术发展面临诸多挑战。一方面，风力与光伏发电场景复杂多变，数据采集与处理难度大，要实现精准孪生需海量且准确的数据支持。另一方面，模型构建对专业知识要求极高，不仅要精通

电气、机械、环境等多领域知识，还需具备先进的建模与数据分析能力。同时，数字孪生技术应用成本较高，包括建模软件、硬件设备以及专业人才培养等，这都在一定程度上限制了其大规模推广应用。

2. 边缘计算部署策略

在风力与光伏发电场景下，边缘计算部署对于电气自动化设备运维技术优化至关重要。一方面，要研究网关设备的计算资源分配算法，需依据设备实时运行数据、预测性维护需求等因素，精准且动态地分配计算资源，确保关键任务优先处理，避免资源浪费或过载，以保障设备稳定运行^[10]。同时，构建高效的实时数据分析框架，能对采集的海量数据进行快速分析，如设备状态数据、气象数据等，及时发现潜在故障隐患，实现故障的早期预警。然而，这面临着诸多挑战，比如如何在有限的边缘计算资源下，满足复杂多样的数据处理需求，且要保证数据处理的准确性与实时性；另外，不同设备与系统间的数据格式和通信协议差异大，如何实现数据的有效融合与交互，也是亟待解决的问题。

(二) 氢能系统技术瓶颈

1. 电解效率提升路径

在风力与光伏发电场景下，提升氢能系统电解效率，可从新型催化剂材料开发与膜电极组件结构优化入手。新型催化剂材料方面，研发高活性、高稳定性且成本低的催化剂，能显著提升电解反应速率。如探索新型纳米结构催化剂，通过精准调控其粒径、晶型及表面活性位点，增强对析氢、析氧反应的催化能力，降低过电位，进而提高电解效率。膜电极组件结构优化上，优化质子交换膜、电极与气体扩散层的组合与界面结构，能减少内阻与传质阻力。例如，优化气体扩散层的孔隙率与孔径分布，改善气体传输效率；采用超薄质子交换膜，降低质子传导电阻，以此提升整体电解效率。但这其中面临诸多挑战，如新型催化剂的大规模制备工艺难题，膜电极组件长期稳定性提升的技术瓶颈等。

2. 储运成本控制方案

在风力与光伏发电场景下，氢能系统面临诸多技术瓶颈，其中储运成本控制是关键难题。目前，基于氢储合金的分布式储氢模式虽具潜力，但也存在问题。一方面，氢储合金成本较高，影响其大规模应用，需研发成本更低、储氢性能更优的新型合金材料。另一方面，氢气储存过程中的能量损耗不可忽视，需优化储存工艺，提高能量转换效率。从运输角度看，长距离、大规模的氢气运输技术尚不完善，管道运输前期建设成本巨大，而高压气态运输和低温液态运输安全性要求高，成本也居高不下。需综合考虑多种因素，探索更经济、高效且安全的储运方案，如改进运

输设备，优化运输路线，以降低氢能系统的储运成本，推动其在风力与光伏发电场景中的广泛应用。

(三) 标准体系构建需求

1. 设备互联协议统一

在风力与光伏发电场景下，电气自动化设备互联协议的统一面临诸多挑战与需求。当前，不同厂家设备常采用不同协议，如Modbus、OPC UA等，这导致设备间信息交互困难，严重阻碍系统集成与协同运行。为实现设备互联协议统一，需构建标准通信模型，明确各协议转换规则与接口标准，确保数据准确、高效传输。这要求深入研究各协议特点，制定统一规范，使得不同协议设备能无缝对接。此外，标准体系要具备前瞻性，以适应未来技术发展，满足新设备、新应用接入需求。同时，协议转换网关开发至关重要，要确保网关能稳定、可靠地实现协议转换，为设备互联提供坚实支撑，推动风力与光伏发电场景下电气自动化设备协同高效运行。

2. 安全认证标准完善

在风力与光伏发电场景下应用氢能技术，安全认证标准完善迫在眉睫。涉氢区域因氢气易燃易爆的特性，需严格的防爆认证。要明确涉氢电气自动化设备的防爆等级、防护结构等参数，确保在氢气泄漏等危险情况下设备能有效防止爆炸事故。同时，功能安全等级（SIL）认证也至关重要。需依据设备在氢能应用中的风险程度，确定合适的SIL等级，规范设备的可靠性、故障诊断与容错能力等要求。通过完善这些安全认证标准，使氢能 在风力与光伏发电场景下的应用有章可循，保障设备稳定运行与人员安全，推动氢能应用技术在该领域健康发展。

五、总结

本研究聚焦风力与光伏发电场景，围绕电气自动化设备维护及氢能应用技术展开。提出的风光氢储协同系统最优维护策略框架，为实现高效、稳定的能源供应提供了新的思路，能够有效提升设备运行可靠性与能源利用效率。揭示设备智能运维与氢能综合利用的技术关联性，有助于打破传统能源应用局限，实现不同能源技术间的有机融合与互补。指明多能耦合系统控制架构的演进方向，使系统控制更具灵活性、智能化，适应未来能源系统发展需求。通过这些研究，有望推动风力与光伏发电领域向更加高效、清洁、可持续发展的方向发展，为解决能源与环境问题提供有力技术支撑。

参考文献

[1] 栾亨淳. 风电—光伏—光热互补发电系统运行特性仿真研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[2] 侯汝印. 光伏发电中储能系统的容量配置及运行技术研究 [D]. 华北电力大学 (北京), 2022.
[3] 孙炯洵. 耦合氢储能的光伏光热发电系统方案设计与运行优化 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[4] 吴曼. 碳达峰下的风光发电耦合氢储能系统容量优化配置模型 [D]. 华北电力大学 (北京), 2023.
[5] 高娇娇. 基于光伏发电的智能家居设备用能优化调度策略研究 [D]. 西安建筑科技大学, 2021.
[6] 万里, 黄帆. 电气自动化在太阳能光伏发电中的应用 [J]. 太阳能学报, 2024, 45(02): 503–504.
[7] 王朋辉. 电气自动化在太阳能光伏发电中的应用 [J]. 光源与照明, 2024, (04): 125–127.
[8] 骆磊, 刘佳. 电气自动化在太阳能光伏发电中的应用 [J]. 科技创新与应用, 2020, (35): 166–167.
[9] 李洋. 电气自动化在太阳能光伏发电中的应用探究 [J]. 装备维修技术, 2020, (02): 176.
[10] 蔡城. 电气自动化在太阳能光伏发电中的应用研究 [J]. 光源与照明, 2023, (07): 144–146.