

引用格式: 杨源. 海上风电场智能维检平台方案设计 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(2): 97-103. YANG Yuan. The scheme design of offshore wind power intelligent maintenance and repair platform [J]. Southern energy construction, 2025, 12(2): 97-103. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-022.

海上风电场智能维检平台方案设计

杨源

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的] 针对海上风电场维检困难, 提出了海上风电场智能维检平台。[方法] 通过应用智能巡视 (升压站巡检机器人、无人机巡视)、自动化智能检修 (风电机组螺栓紧固机器人、风电机组防腐喷涂机器人、检修决策)、作业监管 (智能门禁、可视化头盔)、智能化维检排程以及全面培训服务等技术, 打造无死角的海上风电场智能维检平台。[结果] 本系统解决了海上风电场维检资源紧缺、海上风电维检技术落后、海上风电场的可进入性差、海上风电维检成本高昂、海上风电维检行业缺乏标准规范、专业人员缺失等相关维检痛点。以海上升压站主变和风电机组防腐喷涂为例, 分析了海上升压站机器人的智能巡视和检修决策表, 以及风电机组防腐除锈机器人的具体方案。[结论] 系统提高了海上风力场的维检智能化水平, 减低了维检成本, 做到了降本增效, 有望在工程中应用推广。

关键词: 海上风电; 智能维检; 智能巡视; 智能检修; 作业监管; 维检排程

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-022

文章编号: 2095-8676(2025)02-0097-07

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-022

中图分类号: TM614; TP315



论文二维码

The Scheme Design of Offshore Wind Power Intelligent Maintenance and Repair Platform

YANG Yuan

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] In order to solve the problem of difficult operation and maintenance of offshore wind farms, the intelligent maintenance and repair platform is proposed. [Method] The platform was created by applying intelligent inspection (pressure station patrol robot, drone patrol), automatic intelligent maintenance (wind bolt fastening robot, wind turbine anti-corrosion spraying robot, maintenance decision-making), operation supervision (intelligent access control, visual helmet), intelligent operation and maintenance scheduling and training services. [Result] The problem can be solved with the shortage of offshore wind farm operation and maintenance resources, backward offshore wind power operation and maintenance technology, poor accessibility of offshore wind farms, high cost of offshore wind power operation and maintenance, lack of standards and specifications in the offshore wind power operation and maintenance industry, lack of professionals and other related operation and maintenance pain points. Taking the inspection of the main transformer at the offshore station and the anti-corrosion coating of wind turbines as examples, the two aspects are analyzed, including the intelligent inspection and maintenance decision table of the offshore station robot, as well as the specific scheme analysis of the anti-corrosion and rust removal robot for wind turbines. [Conclusion] Therefore, it can improve the intelligent level of operation and maintenance of offshore wind farms, reduce operation and maintenance costs, reduce costs and increases efficiency, and is expected to be applied and promoted in engineering.

Key words: offshore wind power; intelligent maintenance inspection; intelligent inspection; intelligent maintenance; operation supervision; operation and maintenance scheduling

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

收稿日期: 2024-01-21 修回日期: 2024-02-26

基金项目: 基金项目: 国家自然科学基金资助项目“考虑变压器非线性高频特性的海上风电场内部过电压产生机理及暂态特征提取方法研究”(51477054); 中国能建广东院科技项目“海上风电智能运维策略研究”(ER05281W)

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

海上风电维检成本在海上风电场全生命周期成本中占 25%~30%，维检是海上风电产业链中十分关键和重要的环节^[1-3]。目前，在电气设备方面，已有相关的检修以及巡视规程，并已形成完善的变电设备标准化巡视作业^[4-6]；同时，对于风电场的维检管理系统^[7-9]和故障诊断^[10-12]，已经有相关方案，初步形成体系^[13-15]。但是，目前尚无完整的海上风电场智能维护及检修平台，实现海上风电场的维护及检修的智能闭环^[16-19]。

当前海上风电维检存在海上风电场维检资源紧缺、海上风电维检技术落后、可进入性差、维检成本高昂以及缺乏标准规范等问题^[20-21]，需要综合考虑设备管理、智能巡视、智能检修、作业监管、维检排程、培训服务等各方面需求，建立完整的海上风电场智能维检平台，从而提供海上风电的维检效率。

1 海上风电场智能维检平台概述

海上风电智能维检平台包括设备管理、智能巡视、智能检修、作业监管、维检排程、培训服务等 6 大功能，具体如图 1 所示。

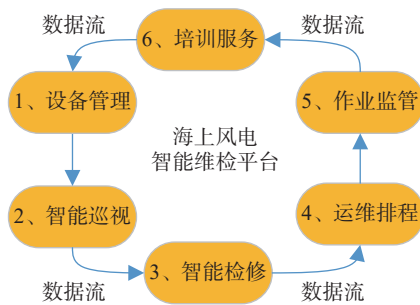


图 1 海上风电智能维检平台的数据流程图

Fig. 1 The data flow chart of offshore wind power intelligent maintenance inspection platform

海上风电智能维检平台是一款具有解决当前海上风电维检痛点的海上风电维检平台，其功能包括设备管理、智能巡视、智能检修、作业监管、维检排程、培训服务等。该系统应用智能巡视(升压站巡检机器人)、自动化智能检修(风电机组螺栓紧固机器人、风电机组防腐喷涂机器人、检修决策)、作业监

管(智能门禁、可视化头盔)、智能化维检排程以及全面培训服务等技术，打造无死角的海上风电场智能维检平台，提高海上风力场的维检智能化水平，降低维检成本，做到降本增效。

该系统适用于所有海上风电场项目，它可以通过存量改造及增量新建的方式投入使用。

2 海上风电场智能维检平台特点及定位

2.1 平台特点

平台针对维检痛点，采用相应的措施，具体如表 1 所示。

表 1 痛点-措施对应表

Tab. 1 The pain points and corresponding measures

序号	痛点	措施
1	维检资源紧缺	通过智能巡视代替人工日常巡视，通过智能检修提升检修效率，从而节省维检资源。
2	维检技术落后	通过海上升压站机器人实现海上升压站每层平台的设备进行全面巡视，结合人工智能算法对图像进行识别分析，全面代替人工日常巡视，提高海上风电维检技术。
3	可进入性差	(1)通过智能检修的智能决策，实现智能检修决策，减少故障处理时间，减少海上风电作业窗口时间；(2)通过风电机组防腐除锈机器人、风电机组螺栓紧固机器人等智能检修工具，可有效提升检修效率，解决当前防腐除锈难、螺栓紧固工作量大的痛点，减少海上风电作业窗口时间。
4	维检成本高昂	综合考虑海上升压站巡视机器人、无人机等智能巡视手段，风电机组螺栓紧固机器人、风电机组防腐除锈机器人等智能检修手段，专业的检修决策，作业监管和培训服务后，实现船、人、机器人等全方位的维检排程，从而节省维检成本。
5	缺乏标准规范	通过作业监管，有效实现维检行业的标准化操作。(1)提升操作准确率和安全性，实现现场操作无人化，操作时间减少60%；(2)提高作业风险管控能力与安全水平，节省工时60%。
6	专业人员缺失	建立员工能力矩阵库、故障案例平台、考核评估系统等，实现检修方案模拟，减少安全隐患，提升检修方案的直观性、准确性和实操性，提升维检人员的综合水平。

2.2 平台定位

2.2.1 设备管理平台

打通平台与主站的接口，实时获取主站的任务计划、两票、设备缺陷、检修记录等业务数据，从而

实现生产业务自动执行、生产数据自动更新、生产过程自主管控等功能。

这样,可实现运行人员录取相关数据与分析无纸化和智能化,比如,全站发电量的自动统计、设备缺陷的统计汇总、检修记录的分析统计。通过设备台账维护、作业全流程管控、站内资源调配等功能,提升生产管理精细度和准确度,优化基层生产管理能力。

2.2.2 智能巡视平台

通过海上升压站机器人实现海上升压站每层平台的设备进行全面巡视,结合人工智能算法对图像进行识别分析^[22],实现日常巡视。

2.2.3 智能检修平台

1)通过智能检修的智能决策,实现智能检修决策,减少故障处理时间。

2)通过风电机组防腐除锈机器人、风电机组螺栓紧固机器人等智能检修工具,可有效提升检修效率,解决当前防腐除锈难、螺栓紧固工作量大的痛点。

2.2.4 维检决策平台

在海上风电维检作业类型的故障处理中,结合专业的智能检修决策,通过各类设备故障特征和处理策略,实现智能检修决策。

2.2.5 安全管理平台

实现整个作业流程的管理控制,对登上平台人员进行监测,提示风险,并控制高音设备的通断。对身份认证以及实现人脸开锁功能。同时,通过配置可视化头盔,进行安全监督指导。

最终,在海上升压站、风机基础平台、海缆等安

全区域设置电子围栏,若非工作人员或非法船只进入会触发相关告警,并与风电场视频进行联动。

2.2.6 培训服务平台

实现全量全景数据的采集和融合,利用全生命周期数据资料的积累和调用开展业务学习、员工培训、上岗考试等一系列附加增值功能。

通过建立员工能力矩阵库、故障案例平台以及考核评估系统等3方面,实现安全培训相关功能。同时,对外来人员和外雇人员也纳入考核评估系统,若考核不及格,则拒绝其作业申请要求。

3 海上风电场智能维检平台功能

3.1 功能特点

具体如表2所示。

3.2 性能指标

具体如表3所示。

3.3 维检效益分析

具体如表4所示。

4 案例

海上风电场的维检重点在于海上升压站的智能巡视和风电机组的智能检修。本节以这2方面为重点,做相关的案例分析。

4.1 海上升压站智能巡视

以海上升压站主变为例,通过海上升压站机器人实现智能巡视和检修决策。具体如表5所示。

表2 应用功能表

Tab. 2 The application function table

序号	模块	功能	说明
1	设备管理	设备管理	实现风电场设备以及备品备件的管理。
2	智能巡视	海上升压站机器人智能巡视	(1)实现同一层平台的全部房间的巡视,可自动连锁并打开同一层平台的相关房间门禁,能实现0.6 m高度的爬坡;(2)利用高清视频、红外热成像等方式对站内设备进行全面巡视,结合人工智能算法对图像进行识别分析。
3	智能检修	风电机组防腐除锈机器人	需求1:在塔筒外表面较为平整时,可稳定吸附于塔筒表面,在遇到颗粒、凹坑等不平整表面时,可自行进行调整,使得机器人使用中,无论吸附环境是否复杂,均能稳定的吸附于塔筒外表面。 需求2:考虑在风机基础平台处的移动和防腐喷涂,尤其是焊接处。同时,也能清理海洋生物附着物(附着物约2~4 cm)。最终,也可实现爬梯顶处横杆及固定爬梯连接法兰的防腐喷涂情况。
		风电机组螺栓紧固机器人	需求1:利用智能螺旋紧固工器具,可数字化调整扭矩,适应不同螺丝尺寸与扭矩需求范围。 需求2:实时监测螺栓轴向紧固应力,进行健康监测评估、预警。
4	维检排程	检修决策	实现设备的智能检修决策。
		维检排程	进行维护人员、备品备件、海上升压站巡视机器人、无人机、智能检修工具等维护资源的分配。
		远程申请	移动APP可实现工作票的申请和审核以及风机平台上锁具及报警装置的布防撤防。

表 2 (续) 应用功能表
Tab. 2(Cont.) The application function table

序号	模块	功能	说明
5	作业监管	无关人员驱离	风机上设置微波人体感应警示及高音喇叭装置,若非工作人员登上风机平台,该装置将自动报警并对人员进行驱离。
		智能门禁	对各风机平台塔筒门进行闭锁。实现手机蓝牙控制开锁、远程开锁,配置应急开锁锁芯,可机械钥匙开锁。
		人脸识别摄像头与可视化头盔	通过在塔筒门的人脸识别摄像头,实现安防;配置可视化头盔,为管理人员及专家进行远程指导和监督。
6	培训服务	员工能力矩阵库	评估风电场维检人员的操作能力。
		故障案例平台	建设完善相关故障案例进行学习。
		考核评估系统	进行学习效果考核。

表 3 主要性能指标表
Tab. 3 The key performance indicator

序号	性能指标项	指标
1	系统的处理速度	每日更新信息的及时获取、处理、入库与发布
2	系统具备高可靠性和稳定性	保证7×24 h不间断稳定运行 具备在99.95%的连续无故障运行能力
3	数据响应时间	用户向平台的提交数据响应时间 < 2 s 用户从平台查询获取数据响应时间 ≤ 2 s
4	用户并发数	支持1000名用户的并发访问能力

表 4 维检效益分析表
Tab. 4 The benefit analysis of offshore wind power intelligent maintenance and repair platform

序号	功能	对象	成效
1	设备管理	海上风电场	(1)目前常规维检,无此相关软件成本。但每周需耗费1人2 d整理相关设备管理信息,按日人工成本为500元估算,在设备管理方面,年人工成本为4.8万元;(2)此设备管理的软件费用,约30万,预计6.25 a可收回相关成本。
2	智能巡视	海上升压站	(1)目前常规维检,无此相关智能巡视成本。但每月需耗费4人2 d巡视海上升压站(每月巡视2次,每次1 d),按日人工成本为500元及1次出海用船成本为5万元估算,年巡视成本为64.8万元;(2)巡视机器人的成本约为200万元,预计3.10 a可收回相关成本。若考虑提前发现巡视问题,避免风电场停运,会产生更大的效益。
3	智能检修	风电机组	(1)目前常规维检,无此相关智能检修工具,需由人工实现检修。每台风电机组防腐除锈、螺栓紧固的费用,每年分别需要花费6万元、5万元;(2)风电机组防腐除锈机器人、螺栓紧固机器人的成本分别约为80万元、60万元,预计约13.3 a、12 a可回收成本;(3)智能决策(费用约200万元),建立故障判断库、故障决策库、故障案例库,减少故障处理时间。每年预计节省40 h,每年可增加创收1000万元的发电量效益。
4	维检排程	风电机组	(1)目前常规维检,无此相关运排排程软件成本;(2)通过此维检排程(费用约100万元),每年预计节省维检排程时间20 h,每年可增加创收500万元的发电量效益。
5	作业监管	海上风电场	(1)目前常规维检,无此相关作业监管软件成本;(2)通过作业监管(费用约100万元),提升操作准确率和安全性,实现现场操作无人化,操作时间减少60%。提高作业风险管控能力与安全水平,节省工时60%。每年预计可节省20万元左右的人工费用。若考虑安全效益,可产生更大的效益。
6	培训服务	海上风电场	(1)目前常规维检,无此相关培训服务软件成本;(2)通过培训服务(费用约100万元),提升检修方案的直观性、准确性和实操性,提升维检人员的综合水平。





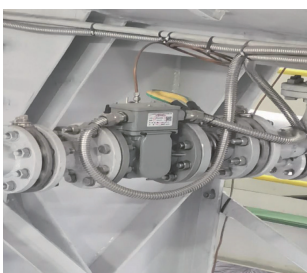
4.2 风电机组智能检修

风电机组面临较为严峻的腐蚀检修问题,具体如图 2 所示。

通过风电机组防腐除锈机器人,实现风电机组的智能检修。主要作业内容包括塔筒塔架的除锈以及喷涂,同时兼备全程的高清实时监控能力。该系

表 5 海上升压站机器人的智能巡视和检修决策表（以海上升压站主变为例）

Tab. 5 The intelligent inspection and maintenance decision table for robots in offshore booster stations (taking the main transformer of offshore booster stations as an example)

巡视项目	智能巡视	智能巡视效果	检修决策	常规巡视效果 (以巡视图片为主)
温度	本体温度计完好、无破损, 表盘内无潮气冷凝; 检查变	通过红外测温, 若油温经常超过 85 °C, 且最高油温达到 95 °C, 油箱红外测温异常, 则启动检修决策分析。	若温度异常, 且油色谱正常: 检修时间: 立即; 检修类别: 不停电检修; 检修内容: 监视油位、油温, 进行红外检测, 并采取降低变压器负荷措施。	
油位、油色	油位计无破损和渗漏油。	通过图像识别, 若油位计破损且有渗漏油, 并发现影响查看油位的油垢; 同时, 储油柜上标有油位监视线达到报警值, 则启动检修决策分析。	若油位模糊, 油位指示不清: 检修时间: 立即; 检修类别: 局部检修; 检修内容: 更换油位计, 查绝缘油受潮情况。	
渗漏油	检查变压器各部位无渗漏油。	通过图像识别, 若变压器的油泵、各阀门、隔膜式储油柜等有渗漏油, 则启动检修决策分析。	若有轻微渗油, 未形成油滴: 检修时间: 尽快; 检修类别: 局部检修; 检修内容: 监测渗油缺陷发展趋势, 停电时对渗漏油部位进行处理。	
运行中的声音	变压器运行声音正常。	通过拾音器分析, 若有放电声音、异常振动等现象、变压器运行不均匀的嗡嗡声音, 则启动检修决策分析。	若噪声、振动异常, 绝缘油色谱正常: 检修时间: 立即; 检修类别: 不停电检修; 检修内容: 加强油色谱跟踪, 如发现油色谱变为异常, 则应进行进一步诊断分析。	
压力释放装置	压力释放阀无喷油痕迹。	通过图像识别, 若压力释放器有油迹, 压力释放阀指示杆突出, 有喷油痕迹, 则启动检修决策分析。	若运行中发生喷油: 检修时间: 立即; 检修类别: 局部检修; 检修内容: 检查本体呼吸系统是否堵塞、压力释放阀是否存在密封不良缺陷等问题, 并进行处理。	

统包含塔筒爬壁机器人本体、除锈模块、喷涂模块、高清摄像头监测模块等多种作业模块以及远程人员操控系统。

根据塔筒表面作业环境参数, 机器人系统具备核心能力如下:

1) 爬行速度: 为保证作业效率, 爬壁机器人上爬

速度不能过小, 爬行速度为 20 m/min, 以 100 m 塔筒为例, 上爬时间可控制在 5 min 以内。

2) 曲率适应: 塔筒外形为圆锥曲面, 最大直径 4 m, 最小直径 2.5 m, 传统的移动平台无法在曲面上转弯运动, 因此, 为保证爬壁机器人在塔筒壁面的灵活运动, 要求具备变曲率自适应能力, 机器人可适应



图 2 海上风电机组腐蚀示意图

Fig. 2 The Corrosion schematic diagram of offshore wind turbines

曲面半斤适应范围为 $0.6 \sim \infty$ mm。

3) 表面障碍: 塔筒外立面存在的障碍主要为每节塔筒之间的法兰缝, 以及塔筒卷制焊接制作过程中产生的纵横焊缝, 机器人能够越障尺寸 > 1 cm。

4) 柔性接触: 塔筒出场吊装之前会在表面涂装防腐保护层, 爬壁机器人在表面运动作业过程中不能破坏原本完好的涂层。机器人与塔筒是柔性接触避免漆膜的破损, 为橡胶车轮接触。

5) 负载能力: 除锈、喷涂、高清摄像头等作业模块, 以及高空拖缆(供电及信号线)等设备元器件的负载, 要求机器人本体具备至少 40 kg 负载能力。

6) 磁吸附能力: 风电塔筒材质为钢板结构, 采用永磁吸附方式, 要求磁吸附结构轻便, 磁能积利用率高, 漏磁少, 提供稳固的吸附力, 避免机器人打滑掉落, 机器人抗扰能力 ≥ 1 kN, 满足风扰和负载要求。

7) 操控系统: 通过有线拖缆的形式, 采用地面遥操作可视化控制系统平台, 对机器人的塔筒维护作业发送移动及作业指令, 摄像头及超声探头等检测设备信号, 可实时传输回地面采控系统, 并在地面监控屏幕上实时显示作业面具体情况以及检测数据。

5 结论

本文分析了海上风电智能维检平台架构, 具备设备管理、智能巡视、智能检修、维检决策、作业监管、培训服务等功能, 应用智能巡视(升压站巡检机器人、无人机巡视)、自动化智能检修、作业监管(智能门禁和可视化头盔)、智能化维检排程以及全面培训服务等技术, 打造无死角的海上风电场智能维检平台, 提高海上风力场的维检智能化水平, 减低维检成本, 做到降本增效。

海上风电智能维检平台的核心在于智能巡视和智能检修。如何实现全方位无死角的海上升压站智能巡视, 实现风电机组的可靠高效的智能检修(包括防腐喷涂、螺栓紧固等), 还需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 电力设备预防性试验规程: DL/T 596—2021 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
National Energy Administration. Preventive test code for electric power equipment: DL/T 596—2021 [S]. Beijing: China electric power press, 2021.
- [2] 国家能源局. 变电站机器人巡检系统通用技术条件: DL/T 1610—2016 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
National Energy Administration. General technical specification for the robot inspection system in substation: DL/T 1610—2016 [S]. Beijing: China electric power press, 2016.
- [3] 国家能源局. 风电场无人机巡检作业技术规范: NB/T 10594—2021 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
National Energy Administration. Specification of unmanned aerial vehicle inspection for wind farm: NB/T 10594—2021 [S]. Beijing: China electric power press, 2021.
- [4] 国家能源局. 油浸式变压器(电抗器)状态检修导则: DL/T 1684—2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
National Energy Administration. Guide for condition based maintenance strategy of oil-immersed power transformers (reactors): DL/T 1684—2017 [S]. Beijing: China electric power press, 2017.
- [5] 国家能源局. 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则: DL/T 1685—2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
National Energy Administration. Guide for condition evaluation of oil-immersed power transformers (reactors): DL/T 1685—2017 [S]. Beijing: China electric power press, 2017.
- [6] 潍坊供电公司. 变电设备标准化巡视作业指导书 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
State Grid Shandong Weifang Power Supply Company. Substation equipment standardization inspection operation guide [M]. Beijing: China electric power press, 2012.
- [7] 徐进, 孙静, 牛倩. 基于主动预防策略的风电场智能运维管理解决方案 [J]. 水力发电, 2020, 46(3): 104-107. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2020.03.023.
XU J, SUN J, NIU Q. Solution on intelligent operation and maintenance of wind farm based on active prevention strategy [J].

- Water power, 2020, 46(3): 104-107. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2020.03.023.
- [8] 杨源, 汪少勇, 谭江平, 等. 海上风电场智慧运维管理系统 [J]. 南方能源建设, 2021, 8(1): 74-79. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.011.
YANG Y, WANG S Y, TAN J P, et al. The intelligent operation and maintenance management system for offshore wind farms [J]. Southern energy construction, 2021, 8(1): 74-79. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.01.011.
- [9] 刘昊. 变电检修中心管理平台的设计与实现 [D]. 济南: 山东大学, 2015.
LIU H. The design and implementation of substation maintenance center management platform [D]. Ji'nan: Shandong University, 2015.
- [10] 宋明阳, 瞿晟珉, 秦少茜, 等. 基于故障风险水平的海上风电场机会维护策略 [J]. 电力工程技术, 2023, 42(9): 117-129. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.013.
SONG M Y, QU S M, QIN S X, et al. Offshore wind farm opportunity maintenance strategy based on failure risk level [J]. Electric power engineering technology, 2023, 42(9): 117-129. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.013.
- [11] 辛治铨, 汪隆君, 刘沈全. 基于迁移学习的海上风电机组轴承早期故障预警策略 [J]. 可再生能源, 2024, 42(7): 915-922. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2024.07.012.
XIN Z C, Wang L J, LIU S Q. Early fault warning strategy for offshore wind turbine bearings based on transfer learning [J]. Renewable energy resources, 2024, 42(7): 915-922. DOI: 10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2024.07.012.
- [12] 王昊, 刘璐洁, 陈龙, 等. 考虑故障关联不确定性的海上风电机组预防性维护策略优化方法 [J]. 上海电力大学学报, 2024, 40(4): 331-339.
WANG H, LIU L J, CHEN L, et al. Preventive maintenance decision-making for offshore wind turbine considering failure correlation uncertainty [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2024, 40(4): 331-339.
- [13] 郭微. 变电运维集中管控平台的设计与实现 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
GUO W. Substation operations concentrated control platform's design and implementation [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2017.
- [14] 张本. 基于云平台的风电机组智能运维系统设计与实现 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2021. DOI: 10.26969/d.cnki.gbydu.2021.002717.
ZHANG B. Intelligent maintenance system design of wind turbine based on cloud platform [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021. DOI: 10.26969/d.cnki.gbydu.2021.002717.
- [15] 王玉红. 变电站智能运检管控系统的研究与实现 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
WANG Y H. Research and implementation of intelligent management and control system for operation and inspection of substation [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.
- [16] 胡皓翔. 智能运维技术在 220 kV 环澳站的应用研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnlu.2021.003516.
HU H X. Application of intelligent operations in 220 kV Huanao substation [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021. DOI: 10.27151/d.cnki.ghnlu.2021.003516.
- [17] 张志宏, 施永吉, 黄建平, 等. 深远海域风电场智慧运维管理系统的探索与研究 [J]. 太阳能, 2018(6): 49-53, 25. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2018.06.011.
ZHANG Z H, SHI Y J, HUANG J P, et al. Exploration and research on the intelligent operation and maintenance management system of deep sea wind farm [J]. Solar energy, 2018(6): 49-53, 25. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2018.06.011.
- [18] 邓清闯, 费怀胜, 李朝锋. 风电场智能运维管控系统方案设计 [J]. 机械与电子, 2019, 37(1): 71-74, 80. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2257.2019.01.015.
DENG Q C, FEI H S, LI C F. Design of intelligent operation and maintenance control system for wind farms [J]. Machinery & electronics, 2019, 37(1): 71-74, 80. DOI: 10.3969/j.issn.1001-2257.2019.01.015.
- [19] 周登科, 程龙, 张亚平, 等. 海上升压站机器人智能巡检系统应用分析 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(1): 116-126. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-088.
ZHOU D K, CHENG L, ZHANG Y P, et al. Application analysis of intelligent robot inspection system at offshore step-up substation [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 116-126. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-088.
- [20] 王博妮, 王锋, 葛行成, 等. 海上风电气象服务关键技术及应用分析 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(1): 65-74. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-126.
WANG B N, WANG F, GE H C, et al. Analysis of key technologies and applications of meteorological service for offshore wind power [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 65-74. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-126.
- [21] 李铜林, 曾甫龙. 基于 5G 技术的海上风电通信系统研究 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(2): 51-58. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.05.
LI T L, ZENG F L. Research on offshore wind power communication system based on 5G technology [J]. Southern energy construction, 2024, 11(2): 51-58. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.05.
- [22] 葛志超, 谷艺林, 黄山, 等. 基于人工智能技术的变电站联合巡检系统应用研究 [J]. 电力大数据, 2023, 26(11): 89-96. DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2023.11.010.
GE Z C, GU Y L, HUANG S, et al. Application research of substation joint inspection system based on AI technology [J]. Power systems and big data, 2023, 26(11): 89-96. DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2023.11.010.

作者简介:



杨源

杨源

1990-, 男, 高级工程师, 硕士, 从事海上风电新能源利用研究(e-mail) yangyuan@gedi.com.cn。

(责任编辑 孙舒)