

引用格式: 何航, 汪少勇, 周家慷, 等. 高空风能电站运维辅助系统研究与设计 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(1): 22-30. HE Hang, WANG Shaoyong, ZHOU Jiakang, et al. Research and design of high altitude wind power station operation and maintenance auxiliary system [J]. Southern energy construction, 2025, 12(1): 22-30. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-370.

高空风能电站运维辅助系统研究与设计

何航[✉], 汪少勇, 周家慷, 杨源, 张文鋈, 林侃

(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] 目前, 国内及国际都已开展对高空风力发电技术的研究, 主要集中在运行控制、机理分析和系统设计领域, 尚未出现针对高空风能电站运维领域的研究成果。[方法] 文章提出 1 种高空风能电站智能运维辅助系统设计方案, 为将来在高空风能电站推广应用智能运维技术、推进运维数字化建设工作提供思路。通过对我国首个示范性伞梯组合型高空风能电站进行调研, 分析现阶段的运维痛点, 设计 1 套高空风能电站智能运维辅助系统, 以解决站内监视后台分散、运行数据表单多样、设备台账不成体系、故障维修历史不便追溯等问题。[结果] 基于微服务开发了 1 套高空风能电站智能运维可视化平台, 实现集中监视发电系统设备状态, 标准化设备台账, 规范设备维修工单流程, 监测运行环境安全, 主动识别危险事件并输出报警。[结论] 高空风能电站是出现不久的新事物, 其智能运维平台的设计应首先侧重于提高电站运行数据的集中可视化程度、推进设备数字化管理模式及保障电站运行环境安全, 以匹配起步阶段的电站运维需求。随着以后高空风能发电系统的核心控制技术攻关和设备选型制造技术攻关的完成, 高空风能电站智能运维技术可与之适配进步, 进一步推进高空风能电站的兴起。

关键词: 风力发电; 高空风能电站; 高空风能; 智能运维; 设备管理

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-370

文章编号: 2095-8676(2025)01-0022-09

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-370

中图分类号: TK89; TM614



论文二维码

Research and Design of High Altitude Wind Power Station Operation and Maintenance Auxiliary System

HE Hang[✉], WANG Shaoyong, ZHOU Jiakang, YANG Yuan, ZHANG Wenjun, LIN Kan

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

Abstract: [Objective] At present, domestic and international research on high-altitude wind power generation technology has been carried out, mainly in the fields of operation control, mechanism analysis and system design, but no research results have been found in the field of high-altitude wind power station operation and maintenance. [Method] This paper proposed a design scheme of intelligent operation and maintenance assistance system for high-altitude wind power stations, which provided ideas for the future popularization and application of intelligent operation and maintenance technology in high-altitude wind power stations and the promotion of digital operation and maintenance construction. Based on the investigation of China's first demonstrative high-altitude wind power station with an umbrella-ladder combination system, the pain points of operation and maintenance at the present stage were analyzed, and a set of intelligent operation and maintenance assistance system was designed to solve the problems such as scattered monitoring and background in the station, various operating data forms, unsystematic equipment records and inconvenient tracing of fault maintenance history. [Result] Based on microservices, an intelligent operation and maintenance visualization platform for high-altitude wind power station is developed to realize centralized monitoring of power generation system equipment status, standardization of equipment records and maintenance ticket process, monitoring of operating environment safety, active identification of dangerous events and output alarm.

收稿日期: 2024-10-31 修回日期: 2024-11-20

基金项目: 国家重点研发计划项目“大型伞梯式陆基高空风力发电关键技术及装备”(2023YFB4203400); 中国能源建设股份有限公司 2022 年重大科技专项“25 MW 级高空风能发电技术与装备研究”(CEEC-2021-KJZX-03)

[Conclusion] High-altitude wind power station is an emerging concept in energy sector. The design of its intelligent operation and maintenance platform should first focus on improving the centralized visualization degree of power station operation data, promoting the digital management mode of equipment and ensuring the safety of power station operation environment, so as to match the operation and maintenance requirements of power station in the initial stage. With the advance in the core control technology, equipment selection and manufacturing technology of high-altitude wind power generation system in the future, the intelligent operation and maintenance technology of high-altitude wind power station can be adapted to the progress, and further promote the rise of high-altitude wind power station.

Key words: wind power generation; high-altitude wind power station; high-altitude wind energy; intelligent operation and maintenance; equipment management

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

风力发电是清洁可再生能源的高效利用形式之一。目前蓬勃发展的风力发电领域中,无论是陆地风电还是海上风电,利用的都是近地面的风能资源,基本处在离地 300 m 以内的高度范围。根据风功率密度 $p = \frac{1}{2}\rho v^3$ (ρ 为空气密度, v 为风速)估算,离地 300 m 以上的中、高空范围,风速远高于近地面,风功率密度更大,因此蕴含着更丰富的风能资源^[1]。国内外都已开始研究如何利用高空风进行发电的相关技术^[2-4]。

高空风电技术路线主要分为空基发电和陆基发电 2 大类,前者利用飞行器将发电机升至空中迎风发电,电能经由复合金属丝的缆绳传回地面,后者将飞行器系在缆绳上升空、利用飞行器在空中爬升时拉拽缆绳从而拖动地面的发电机旋转发电^[2-6]。国内目前在高空风力发电技术方面的研发成果主要是中路股份有限公司下属广东高空风能公司研发的伞梯组合型高空风能发电系统,属于陆基发电技术路线。该公司于 2010 年研制有 100 kW 样机、并于 2015 年在安徽芜湖完成了兆瓦级的高空风能试验电站^[6]。随后,中国能建集团投资建设了同样采用伞梯组合型高空风能发电技术的绩溪 2.5 MW 高空风能发电示范项目,该项目于 2024 年 1 月成功并网^[7]。

目前,关于伞梯组合型高空风能发电技术的研究工作多集中在运行控制^[8]、机理分析^[9]和系统设计领域^[10-11],但尚未出现针对高空风能电站运维领域的研究成果。因此,文章拟针对伞梯组合型高空风能电站,提出面向高空风能电站智能运维辅助系统的设计方案,为今后高空风能电站运行维护的数字化建设提供思路。

1 高空风能电站运维现状

高空风能发电技术在国内外都尚处于起步阶段,在这种新型发电站的运维技术研究中遇到的问题和几年前还未发展成熟的海上风电场有类似之处^[12-13]。主要体现在 2 点:(1)主控系统不开放控制接口,需使用独立、专用的控制后台。对于伞梯组合型高空风能电站来说,意味着风电机组空中系统、风电机组地面系统、电站电力网络系统分别使用各自的控制后台,不仅数量多,且型式不一,增加了运维人员识别信息和操作的复杂程度;(2)风机技术支持薄弱,站内专业人才比较少。目前伞梯组合型高空风能电站的发展比较缓慢,站内运维人员还未能有体系地接受针对全站发电系统的技术培训^[14]、特别是对于空中系统的认识不足。

除上述 2 点外,对现阶段的高空风能电站运维人员来说,站内运行数据的表单多样、设备台账不成体系、故障维修历史不便追溯等更是降低运维效率、不利运维工作持续性发展的亟需解决的主要问题。数据表单的多样化和主控系统各自独立有关。空中设备、地面设备、电力网络设备的监控系统分别由不同厂家研发,不只是输出文件格式未能统一,连监测数据的界面风格也大不相同,造成运维人员需要在多个后台上切换查询逻辑来定位所需数据,效率不高。设备台账不成体系是因为伞梯组合型发电技术是新技术,主辅机的类型和常规发电站区别很大,没有经验积累,运维人员只能先逐一记录再整理。但由于记录手段是编制 Excel 格式的设备表,随着登记量增加,后续整理所需的工作量会增大、甚至会导致难以开展整理工作。站内设备的故障维修记录工

作也面对类似的阻碍。维修单是手写单据的形式,人员自发处理,处理完签字闭环。纸质维修单的数量会随电站运行时长而增加,由于没有编写规则、没有过程控制且存在不同人经手处置的情况,难以实际有效地促进运维经验的生长。

2 高空风能电站运维现状问题的解决思路

针对现在的运维困境,提出切实可行的解决方案,设计一套智能辅助运维系统,集中监视电站发电系统的运行状态,智慧管理设备资产和设备维修工单^[15],侧重于降低新技术攻关阶段的运维工作时间成本,帮助运维人员减少整理数据文档的工作量,将更多精力用于学习新型发电技术和熟悉新设备。

2.1 从“多后台”到“少后台”

要降低信息识别和操作的复杂程度、提高筛选数据的效率,采用一体化监控系统是最好的选择^[16]。理想的一体化监控系统是将多个系统的控制权集中,实现在 1 个后台控制多系统、监测所有数据。现阶段,国内对于如何稳定地控制伞梯组合型高空发电系统以实现长期稳定并网的研究还在进行中,所以建立理想的一体化监控系统平台需要分步走,本阶段可先实现一体化监测,在 1 个集中可视化平台内观测运行数据。通过有线或无线通讯方式,将高空风能电站多个系统的监测数据接入平台,按照日常运维对各数据的关注程度对其分级,最后统一显示格式、并按优先级突出显示重点,便于日常监察站内设备的整体运行状态。

建立具备数据集中可视化平台的智能运维系统后,辅以标准化模板,即可解决多个独立主控系统并存所造成的数据表单格式各异的问题。

2.2 从“无体系”到“有体系”

通过智能运维系统,将编制 Excel 设备表这种先记录后整理的设备管理程序转变为“记录即整理”的设备管理模式。只要在智能运维系统设计中,结合伞梯组合型发电技术特点,制定好系统级、子系统级、设备级分类,给每个设备制定属性标签,那么每一个新增设备都会按录入时所在“级”和所填属性自动归类。预制 1 个设备台账模板,就能从运维系统导出已经按“级”分类且属性信息完整的设备表。实现设备台账“不成体系”到“自成体系”的转变。

2.3 从“低效累积”到“高效积累”

手写维修单这种线下开单的模式,同样存在先记录后整理的弊端:前序累积越多,后续整理越困难。线下保管不当还会造成记录缺失,运维人员更替也会增大事件回溯难度。装配智能运维系统,发现故障后可以精准针对发生故障的设备进行线上开单和派单,查验处理效果后线上审批闭环。结合电子标签技术,开单环节可设计为同步支持移动端,即可以通过移动端扫描设备标签开具维修单,便于随时发现问题随时上报问题。维修单流转的每一个环节除了录入本环节的操作信息外,还可查看上一个或多个已流转环节的详细操作信息,并且始终伴随维修对象的属性信息。故障处理详情对各环节处理人完全透明,便于过程控制。故障处理闭环后,智能运维系统可以自动关联和更新维修对象的“检修次数”属性,体现到设备台账中。运维系统可以按筛选条件,如设备名称、日期范围,导出故障记录报表,高效助力电站“回头看”和经验总结工作。通过这样的智能运维系统,可以将累积的单据有效转变为积累的经验,同时将经验传承的模式从“人-人”转变为“人-机-人”,减小人员流动对技术储备的影响。

2.4 从“观察”到“示警”

伞梯组合型高空风能电站较其他陆上风力发电站而言,故障检修对生产的影响更大。以空中设备为例,一旦发生故障需将整串伞梯收回至陆上检修,随之可能出现的情况有:(1)伞组再次升空参与运行,需要等待地面风条件和军方对放飞空域使用权的批准;(2)当全站伞组数量本身较少时,仅一串伞组的回收就能导致电站无法稳定发电^[17]。从而导致故障检修引起的停电时间更长停电损失更多。为了减少计划外的停电,加强事前的安全保障效果,为高空风能电站设置安全警戒和天气预警系统,监测设备运行环境,发现威胁到设备安全的因素主动示警,提醒运维人员加强防范或采取防护措施。

3 高空风能电站智能运维可视化平台设计

本文提出的高空风能电站智能运维^[18-19]可视化平台系统架构如图 1 所示。平台主要功能包括:

1) 运行监视,功能包括主接线动态模拟、运行数据存储、查询及数据报表,全厂图像监视一览等。

2) 设备管理,建立设备信息数据库,支持增加、

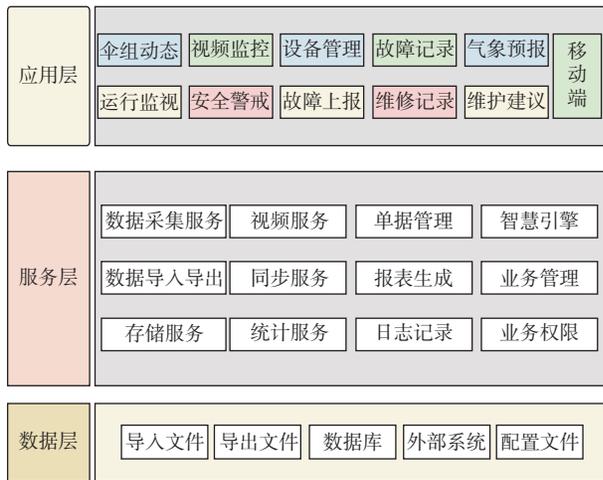


图 1 系统架构图

Fig. 1 System architecture diagram

删除、查询和管理设备,当高空风电电站形成一定发展规模,能够支持集团级或区域级的设备管理。

3) 维修管理,实现开单、派单、验收审批、生成维修报表等功能,配合电子标签手段,支持移动端通过扫描标签进行故障上报和形成维修单。

4) 安全警戒,可配合远距离高清防抖智能云台摄像机实现对氦气球警戒区域的外来物入侵的探测和告警,配合站内运行区的红外一体化摄像头实现安全帽检测、靠近带电设备的事件告警,并生成预警事件的统计图表。

5) 天气预报和建议,纳入气象信息,在恶劣或极端天气时,给出预防性的运行维护建议。

3.1 运行数据收集和处理

采集伞梯组合型高空风电机组空中系统、地面机械系统、发电机的运行参数,按日常运维对各数据的关注程度对其区分优先级:伞组放飞期间和发电运行期间需要时刻观察的数据在运行参数页面前端展示,其他数据则折叠在标签页展示。关注度优先级如表 1 所示。

导入站内电力网络系统的运行参数,按照项目实际情况在可视化平台搭建主接线的动态显示模型,根据开入信息在模型中实时显示各回路的通断状态以及电压、电流、功率等电气参数,如图 2 所示。

除了生产运行参数以外,风电机组及站内电力网络系统还会产生各类报警信息。收集这些报警信息,在可视化平台集中报警,相比于多后台报警,更利于运维人员及时发现异常,迅速判断是否需要采

表 1 伞组型高空风电机组运行参数分类分级表

Tab. 1 Umbrella-type high-altitude wind turbine running parameter classification table

主设备类别	运行参数	
	高优先	低优先
氦气球	氦气球风向	—
	氦气球温度	—
	氦气球气压	—
氦气球/平衡伞/做工伞	高度	空间坐标
	水平风速	气动升力系数
	—	气动阻力系数
平衡伞/做工伞	—	下一时刻预测位置
	伞与水平夹角	伞电机温度
	伞电机工作电流	伞刹车电压
主缆绳	伞编码器圈数	伞电池电压
	—	伞电池充电电流
	主缆绳长度	主缆绳气动阻力系数
发电机	主缆绳运动状态	伞绳总长度
	主缆绳与水平夹角	伞绳线密度
	机组发电量	—
卷扬机/容绳绞车	机组功率	—
	机组变流器电网电压	—
	机组变流器母线电压	—
卷扬机	机组变流器模块温度	—
	电机转速	电机定子电压
	电机电流	电机绕组温度U
容绳绞车	电机输出转矩	电机绕组温度V
	重量传感器通道	电机绕组温度W
	减速机润滑油出口PT100	电机前轴承温度
卷扬机	—	电机后轴承温度
	轴承润滑冷却器出口PT100	—
	轴承润滑出口PT100	—
容绳绞车	阻尼刹车水温	—
	阻尼刹车水压	—
	机组当前排绳位置	—
液压站	机组排绳实际速度	—
	机组排绳实际扭矩	—
	机组筒上缆绳长度	—
容绳绞车	机组放出缆绳长度	—
	—	—
容绳绞车	—	—
	—	—

取应对措施。智能运维可视化平台会自动统计每套伞梯组合型发电机组和电站电力网络系统各自的累计报警次数,并对每套伞梯组合型发电机组的空中设备、发电机、地面机械设备的报警信息分别计数,

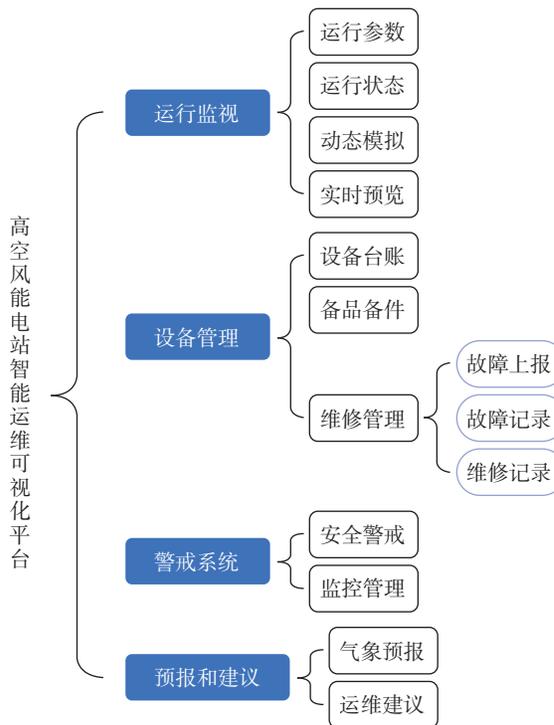


图 2 功能模块组织结构图

Fig. 2 Function module organization chart

以不同形式的图表展示。图表的刷新频率和报警信息的刷新频率一致。通过报警信息统计图表快速直观地反映各运行机组之间的差异,以及每套机组内各系统间的差异,从而引导运维人员重点关注报警频次更高的机组或系统,并能根据报警频次的变化情况更新设备维护计划。

3.2 设备台账的建立和管理

按照场站级、系统级、子系统级和设备级,逐层为伞梯组合型高空风力发电系统的各个设备赋予基本信息和属性信息。设备信息管理界面如图 3 所示。

属性信息包括设备型号、厂家、购入时间、所属场站等固定属性以及服务场站、服务机组、设备状态、检修次数等动态属性。借鉴火力发电厂 KKS 编码的编制思想,在各级基本信息的选填项中纳入分类码和编号。平台可根据某设备在各级基本信息中分配的分类码和编号,结合设备级属性信息中的机组编号,自动生成该设备的设备编码,为设备全生命



图 3 分级完善设备信息

Fig. 3 Detailed device information at different level

周期管理提供基础条件。

平台为高空风能电站设计的设备台账的默认导出格式如图 4 所示。

设备台账的主要内容有设备编码和设备属性信息构成,且已自动按照子系统分类汇总设备数量,信息全面且类别清晰,可以高效辅助站内运维人员了解全站的设备组成及设备服务状态。

同时,平台为各设备赋予电子标签。在允许网段内,通过移动端扫描标签获取的设备信息和 PC 端设备台账信息一致,同时携带维修单信息。

3.3 设备维修单的生成和流转

平台支持 2 种维修单生成途径:PC 端直接填报和移动端扫描设备标签上报。无论采取哪种途径建单,单据都会自动归总到故障记录的“未指派”项并通过数字标提醒处理。单次建单可对单设备上报单一故障,也可对单设备上报多重故障。当单设备出现多种异常状况,可在指派维修人员时针对每项异常情况指派专人处理。维修单的逻辑流程如图 5 所示。

维修单发生指派后,故障记录会变更为“解决中”,同时自动生成一条“正在维修”的维修记录,维修单对应的设备的属性信息“设备状态”会自动变更为“检修”。被指派人员结束检修动作后,在相应

序号	子系统名称										设备总数	
1	平衡伞										2	
	序号	设备名称	设备编码	设备状态	检修次数	服务机组	服务场站	设备型号	设备厂家	购入时间	所属场站	
	1	#1平衡伞	01K03EV001	检修	2	机组1	绩溪一期_JX		设备厂家2	2024-08-01	绩溪一期_JX	
	2	#2平衡伞	01K03EV002	使用	0	机组1	绩溪一期_JX		设备厂家2	2024-08-01	绩溪一期_JX	

图 4 设备台账模板

Fig. 4 Equipment record template

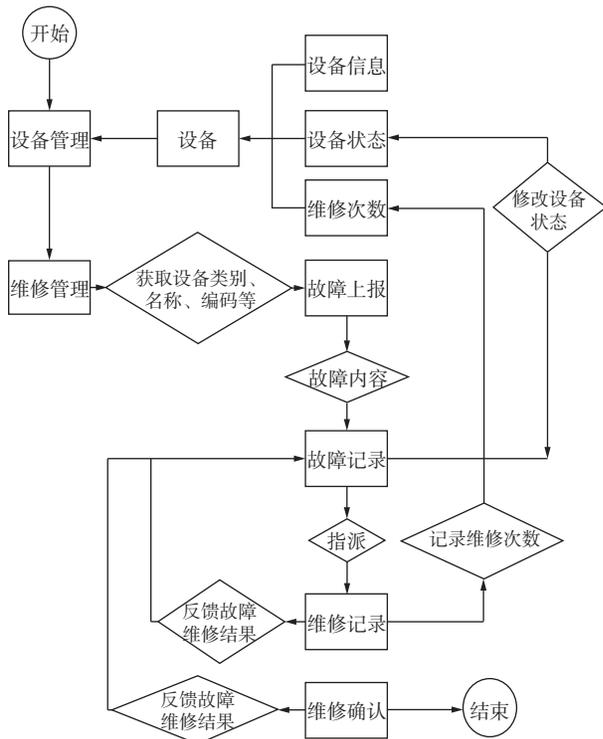


图 5 维修单逻辑流程图

Fig. 5 Maintenance ticket logical flow diagram



图 6 通过移动端上报故障

Fig. 6 Fault reporting on mobile terminal

维修单条目填写维修简述后提交审批,“正在维修”的记录会自动流转到“待确认”状态。检修成果通过验收审批后,该条“待确认”会流转进入“完成维修”的维修记录,同时故障记录的“解决中”条目会自动减一,“已解决”条目自动加一,且该维修单对应的设备的属性信息“检修次数”会自动加一,属性信息“设备状态”恢复为“使用”。

对于单设备多条故障的维修单分派给多人处理的情况,则需要每一条故障的检修成果都通过验收审批,才被认定为“完成维修”。

考虑保障电站数据安全的需要,在移动端的故障上报环节增设身份识别验证。移动端的操作界面如图 6 所示。

3.4 站内安全监控和警戒系统

为保障电站环境及设备、人员安全,站内设置图像监视系统,监视区域包括厂区大门、进站道路、充气桩和升空桩区域、地面机械设备组、主控室、配电间及二次设备间。将全站图像监视数据接入智能运维可视化平台实时一览,进一步减少主控室内的后台数量,实现集中监控。

平台配置警戒系统模块,可针对不同监控区域,

预设不同的报警触发条件(如温度、人影、设备位移等),也可对单个区域设置多个报警触发条件。当报警触发条件被触发,警戒系统模块立即生成报警事件提醒。警戒系统安全监视大屏接入重要警戒区域的实时图像,自动识别触发条件,统计并以图表输出:(1)自模块启用后累计被触发的报警总数和各典型报警事件的累计数量;(2)近 30 天的每日历史报警事件分布;(3)7 日内报警总数;(4)当日报警事件;(5)实时报警序列,随时掌握设备安全状况,监督减少不当行为,防止发生安全事故,典型报警事件如表 2 所示。

表 2 所列升空桩区域的部分报警事件,如异物闯入、气球过近、鸟类飞入等,是针对空中伞组运行区域而设计。该功能需配合远距离高清防抖智能云台摄像机的应用。将氦气球的 GPS 坐标传送至远距离高清防抖智能云台摄像机的控制程序,由控制程序校正并转换,得到基于摄像机坐标的俯仰角、水平角控制值,可保持图像监视系统对空中伞组的追踪。依托计算机视觉技术,通过图像采集、特征提取以及目标检测与分类等环节,开展模型训练,最终实现输出

表 2 监控区域典型报警事件

Tab. 2 Typical alarm events in the monitoring area

监控区域	典型报警事件
厂区大门	进入区域
充气桩区域	进入区域, 未戴安全帽, 人员摔倒
升空桩区域	进入区域, 未戴安全帽, 异物闯入、区域入侵、气球过近、鸟类
地面机械设备组	进入区域, 未戴安全帽
主控室	进入区域, 区域入侵, 打电话
配电间及二次设备间	进入区域, 区域入侵, 未戴安全帽

准确的异物闯入、气球过近、鸟类飞入等报警信息, 有力保障电站上空运行环境的安全监测和预警工作。

3.5 天气预报和建议

除了站内人员的不当行为和外物入侵可能威胁电站的发电安全以外, 复杂天气也会影响伞梯组合型高空发电系统空中设备的寿命及运行安全。有学者研究天气风险对停机影响的权重达 0.193, 主要影响因素有雷击、降雨和紫外线^[20]。智能运维平台可以接收气象信息, 利用气象数据触发运维建议, 遇到较恶劣天气, 将在平台主页推送与气象特征对应的运维建议卡片, 如表 3 所示。

表 3 运维建议卡

Tab. 3 Operation and maintenance suggestion card

气象特征	运维建议
雷电黄色预警	关注天气变化, 巡视站内防雷设施, 关注空中设备无线通讯状况, 准备收伞
雷电橙色预警	勿外出, 切断站内非安全生产用电
降雨蓝色预警	加强巡视容绳绞车、缆绳通道、万向滑轮座和卷扬机
降雨黄色预警	关注雷电信息, 准备收伞
降雨橙色预警	避免户外工作, 雨后需巡视缆绳通道、万向滑轮座和卷扬机处积水情况, 及时清理
紫外线等级 4	减少白天的户外工作, 调整当日巡视工作的时间安排
紫外线等级 5	避免户外工作, 下一次计划内的停机期间重点查看室外设备有无老化迹象, 做好维护工作
高温黄色预警	户外工作注意控制时长
高温橙色预警	减少户外工作, 调整当日巡视工作的时间安排, 关注伞组电机电流是否正常
高温红色预警	避免户外工作, 重点监视室外设备的温度监测数据, 加强巡视空调设备的运行状况

4 结论

我国乃至国际高空风能发电技术都在起步状态, 现在对高空风能电站进行智能运维技术研究属于超

前研究。本文采用调研分析法, 针对示范电站的运维困境, 提出智能运维平台应侧重于提高运行数据的集中可视化程度、推进设备数字化管理模式、保障运行环境安全, 和现阶段的高空风能电站运维需求形成较好的适配性, 是智能运维技术在高空风能电站应用探索的第一步。本文设计的智能运维辅助系统达成以下目标: (1) 实现高空发电系统运行数据一体化监视, 减少运行监盘过程中跨监控后台的无效操作步骤; (2) 标准化设备台账, 规范化设备维修的工单流程, 拓宽了设备电子标签在电厂的应用范围, 不局限于将电子标签作为设备的数字名片, 而是让其同时参与到设备检修维护的流程中, 提供更便捷的发起工单的模式, 提高运维工作效率; (3) 监测高空风能电站厂房内外包括空中伞组的运行环境安全, 主动识别危险事件并输出报警, 预防发生安全事故。

该平台也存在功能拓展空间, 比如: (1) 将来在高空风力发电稳定控制技术成果的支撑下, 可以在一体化监测的基础上发展一体化监控平台, 真正实现去除多控制后台; (2) 在空中系统放飞流程达到更清晰更准确更流畅的程度后, 可以增加机器人辅助放飞功能, 在智能运维平台规划机器人工作轨迹, 实现充气、挂伞、开伞、放绳的全过程遥控; (3) 高空风力发电设备稳定量产和投运后, 可以研究分析设备的数学模型、识别设备故障, 结合人工智能技术进行设备故障诊断, 最终智能运维平台能够提出更有技术性更有预见性的运维建议。

智能运维平台的进步与其服务的新型发电技术的发展是相辅相成的, 并且可以肯定的是, 高空风能电站智能运维可视化平台的研究, 对高空风能电站的兴起具有一定的推进作用。

参考文献:

- [1] 蔡彦枫, 李晓宇. 面向空中风力发电系统的高空风场观测 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(1): 1-9. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.01.
- CAI Y F, LI X Y. High-altitude wind field observation of airborne wind energy system [J]. Southern energy construction, 2024, 11(1): 1-9. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.1.01.
- [2] 邵垒, 毛虹霖, 邢胜, 等. 高空风力发电发展现状及关键技术研究综述 [J]. 新能源进展, 2020, 8(6): 477-485. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2020.06.005.
- SHAO L, MAO H L, XING S, et al. Review on development

- status and key technology of airborne wind energy system [J]. *Advances in new and renewable energy*, 2020, 8(6): 477-485. DOI: 10.3969/j.issn.2095-560X.2020.06.005.
- [3] 韩爽,刘杉. 高空风力发电关键技术、现状及发展趋势 [J]. *分布式能源*, 2024, 9(1): 1-9. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2409101.
- HAN S, LIU S. Key technologies, current status and development trends of high-altitude wind power generation [J]. *Distributed energy*, 2024, 9(1): 1-9. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2409101.
- [4] 闫溟,陈广强,陈冰雁,等. 高空风力发电机组概念设计研究 [J]. *风能*, 2017(9): 70-72. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2017.09.025.
- YAN M, CHEN G Q, CHEN B Y, et al. Research on conceptual design of high-altitude wind turbine [J]. *Wind energy*, 2017(9): 70-72. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2017.09.025.
- [5] 姜阳,陆超,袁志昌,等. 高空风力发电系统能量捕获及变换技术: 现状与展望 [J/OL]. (2024-08-29) [2024-09-03]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20240829.1325.012>.
- JIANG Y, LU C, YUAN Z C, et al. Energy capture and conversion technology of high altitude wind power generation systems: current situation and prospect [J/OL]. (2024-08-29) [2024-09-03]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20240829.1325.012>.
- [6] 肖利坤. 国内高空风力发电技术应用现状 [J]. *农村电气化*, 2023(7): 66-68. DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2023.07.017.
- XIAO L K. Research on application status of high altitude wind power generation technology in China [J]. *Rural electrification*, 2023(7): 66-68. DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2023.07.017.
- [7] 王波. 国内首创高空风能项目开工 [J]. *能源研究与信息*, 2022, 38(1): 61.
- WANG B. China's first high-altitude wind energy project started [J]. *Energy research and information*, 2022, 38(1): 61.
- [8] 张建军. 一种高空风能的发电系统: 201920651587.0 [P]. 2020-05-05.
- ZHANG J J. A high-altitude wind power generation system: 201920651587.0 [P]. 2020-05-05.
- [9] 邵垒,贺佳伟,曾宪君,等. 翼型伞衣高空发电系统: 202210127113.2 [P]. 2022-05-06.
- SHAO L, HE J W, ZENG X J, et al. Aerofoil canopy high-altitude power generation system: 202210127113.2 [P]. 2022-05-06.
- [10] 牛力钊,尹阔,雷崇晖. 25 MW级高空风电用摩擦卷扬机设计及优化 [J/OL]. (2024-10-28) [2024-11-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1715.TK.20241025.1730.006.html>.
- NIU L Z, YIN K, LEI C H. Design and optimization of friction winch for 25 MW airborne wind energy systems [J/OL]. (2024-10-28) [2024-11-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1715.TK.20241025.1730.006.html>.
- [11] 罗必雄,章雪萌,李晓宇,等. 一种高空风电并网系统的运行优化方法及装置: 202410770606.7 [P]. 2024-10-15.
- LUO B X, ZHANG X M, LI X Y, et al. Operation optimization method and device for high-altitude wind power grid-connected system: 202410770606.7 [P]. 2024-10-15.
- [12] 李苇林,王二峰,刘晓东. 海上风电场智慧运维管理系统研究 [J]. *中国设备工程*, 2021(23): 36-37. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2021.23.021.
- LI W L, WANG E F, LIU X D. Research on intelligent operation and maintenance management system of offshore wind farm [J]. *China plant engineering*, 2021(23): 36-37. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2021.23.021.
- [13] 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.
- [14] 学鸿羽. 浅谈风电场运维管理 [C]// 北京大学经济管理学院. 决策论坛——政用产学研一体化协同发展学术研讨会, 北京, 2015-12-18. 北京:《决策与信息》杂志社, 2016: 178, 180.
- XUE H Y. Talk about wind farm operation and maintenance management [C]// School of Economics, Peking University. Decision forum: academic seminar on the coordinated development of government, application, industry, research and integration, peking, December 18, 2015. Beijing: Decision and information magazine, 2016: 178, 180.
- [15] 张艳锋,田震,杨海涛,等. 风电场智慧运维管理浅谈 [J]. *中国设备工程*, 2019(15): 35-37. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2019.15.011.
- ZHANG Y F, TIAN Z, YANG H T, et al. Talk about intelligent operation and maintenance management of wind farm [J]. *China plant engineering*, 2019(15): 35-37. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0711.2019.15.011.
- [16] 阳熹,杨源. 智慧型海上风电场一体化监控系统方案设计 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(1): 42-48. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.008.
- YANG X, YANG Y. Design of smart offshore wind farm integration monitoring system [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(1): 42-48. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.008.
- [17] 张建军. 一种中高空风能发电系统的控制方法: 201711299009.7 [P]. 2018-05-15.
- ZHANG J J. Control method of mid-high altitude wind power generation system: 201711299009.7 [P]. 2018-05-15.
- [18] 李金伟,高鹏,王文帅. 光伏电站智慧化运维设计 [J]. *红水河*, 2024, 43(4): 59-64. DOI: 10.3969/j.issn.1001-408X.2024.04.013.
- LI J W, GAO P, WANG W S. Intelligent operation and maintenance design for photovoltaic power stations [J]. *Hong shui river*, 2024, 43(4): 59-64. DOI: 10.3969/j.issn.1001-408X.

2024.04.013.

- [19] 廖永行, 童惠祺. 高空无人飞行器运维管理系统的设计与实现 [J]. 电子技术与软件工程, 2023 (3): 1-4.
LIAO Y X, TONG H Q. Design and implementation of high altitude unmanned aerial vehicle operation and maintenance management system [J]. Electronic technology & software engineering, 2023 (3): 1-4.
- [20] 李晓宇, 张炳成, 任宗栋, 等. 高空风力发电系统安全风险评估体系 [J]. 中国勘察设计, 2023(增刊 1): 26-29.
LI X Y, ZHANG B C, REN Z D, et al. High altitude wind power generation system safety risk assessment system [J]. China engineering consulting, 2023(Suppl.1): 26-29.

作者简介:



何航

何航(第一作者, 通信作者)
1987-, 女, 工程师, 硕士, 主要从事火力发电厂、海上风力发电厂电气设计工作(e-mail) hehang@gedi.com.cn。

项目名称 中国能源建设股份有限公司 2022 年重大科技专项“25 MW 级高空风能发电技术与装备研究”(CEEC-2021-KJZX-03)
承担单位 中国电力工程顾问集团有限公司、中国能建集团装备有限公司、中国能源建设集团安徽省电力设计研究院有限公司、中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司
项目概述 为了实现“30·60”碳中和的目标, 进一步提高非水可再生能源的整体占比, 高空风电可成为重要的增长点之一。依托现有的陆上风电、陆上光伏、海上风电基地布局建设相似规模的高空风力发电场, 可以充分发挥高空风能发电技术基建工程量小, 度电成本低, 对电网更友好的优势, 形成地面-高空风能综合利用、光伏-风能综合利用

的新局面。

掌握高空风资源观测与评估技术, 形成观测设备选型方法、高空风资源参数分析方法、高空风场数值模拟与预测方法。

开展地面系统计算书编制、完成地面系统图纸设计、方案优化, 进行三维模型搭建与系统仿真设计。根据地面系统设计进展, 结合一期 2×2.4 MW 科研项目实施情况, 研制单机 25 MW 高空风能发电地面设备, 包括摩擦卷扬机和容绳卷扬机, 研制张紧装置、冷却润滑系统、刹车系统等辅助设备, 开展发电机、变频器、变流器等电气设备选型, 并完成地面各设备间的匹配工作。

掌握空中伞组空气动力学特性、伞组空中姿态实时控制技术; 掌握复杂天气条件下空中设备抗缠绕、失控状态下自毁过程等控制策略。

掌握高空风能发电系统运行方式和地面控制系统方案。

建立高空风能电站智能运维模型, 为后续项目推广高空风能电站智能运维系统, 实现集团级、区域级或更上层级别的集中监管和运维资源的统一调配提供技术支持。

主要创新点 高空风能资源观测技术将填补国内高空风能资源系统性观测的研究空白, 具有重要的科学研究价值; 所建立起的高空风能资源观测、评估、预测等法, 能为公司在高空风能发电技术领域的技术储备、专利布局提供支撑, 将在公司后续的高空风能项目布局开发中发挥应有作用。25 MW 级高空风能发电地面系统的研制成功将有助于加快中国在国际上首先实现高空风能发电项目的工程化应用, 造就独一无二的高空风能品牌, 对促进技术工程走出国门, 参与国际竞争具有重大的意义。通过解决以空中系统控制和空中设备制造为核心的系列问题, 形成高空风力发电空中解决方案, 为后续示范项目建成和推广应用奠定技术基础。高空风能发电系统运行方式研究, 掌握运行运维技术, 是打造中国能建高空风能全产业链服务的重要一环, 对促进高空风能发电工程化、商业化具有重要意义。建立自动化的设备状态监视平台, 研究设备故障预警模型, 能促进智能运维技术在高空风能电站的应用, 为实现集团级、区域级或更上层级别的集中监管和运维资源的统一调配创造可能性; 建立风电场设备的电子标签系统, 能够推进设备全生命周期的数字化管理模式; 研究竖直方向的安全监控和边界警戒系统, 是适应高空风能电站“三维”特性的新应用。

(责任编辑 孙舒)