

DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2308306

海上风电场换流站智慧型监控管理系统

卿子龙, 王伟, 刘剑欣

(国网电力科学研究院有限公司, 江苏省南京市 210031)

摘要: 现有的陆上换流站综合自动化系统不能满足未来深远海域海上换流站的监控管理要求, 为此提出换流站智慧化建设的理念。首先分析海上风电场换流站的运维特点及换流站综合自动化系统现状; 然后基于海上换流站现场智能化监控和远程智慧化运维管理的需求分析, 通过对设备状态全面感知、无人机巡视巡检、设备异常主动预警、设备故障智能诊断、主辅设备智能联动、远程操作一键顺控、人员行为智能管控、运维管理智慧决策等技术的应用研究, 提出海上风电场换流站智慧型监控管理一体化系统的设计思想, 并研究分析该系统的体系架构和功能特征, 为海上换流站的智能化、智慧化建设提供可行性方案。

关键词: 海上风电场; 海上换流站; 智慧型; 监控管理一体化系统

中图分类号: TK 83; TM 76

文献标志码: A

Converter Station Intelligent Monitoring and Management System of Offshore Wind Farm

QING Zilong, WANG Wei, LIU Jianxin

(State Grid Electric Power Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210031, Jiangsu Province, China)

ABSTRACT: The existing integrated automation system of onshore converter stations cannot meet the monitoring and management requirements of offshore converter stations in the future, so this paper puts forward the concept of intelligent construction of converter station. The paper first analyzes the operation and maintenance characteristics of offshore wind farm converter stations and current status of integrated automation system of converter stations. Based on requirement analysis of the field intelligent monitoring and remote intelligent operation, and maintenance and management of offshore converter station, through the application research of technologies such as comprehensive perception of equipment status, unmanned machine inspection, active warning of equipment abnormalities, intelligent diagnosis of equipment faults, intelligent linkage of main and auxiliary equipment, one-key sequential control of remote operation, intelligent control of personnel behavior, and intelligent decision-making of operation and maintenance management, this paper puts forward the design philosophy of intelligent monitoring and management integration system for converter stations in offshore wind farms, and studies and analyzes the architecture and functional characteristics of the system. It provides a feasible scheme for the intelligent and wisdom construction of the offshore converter station.

KEY WORDS: offshore wind farm; offshore converter station; smart type; integrated monitoring and management system

0 引言

目前, 我国的海上风电装机容量已跃居世界第一。近海可供能开发的风能资源已越来越少, 未来海上风电场的建设将走向更加深远的海域。随着离岸距离的增长, 考虑到高压交流 (high-voltage

alternating current, HVAC) 输电的海缆线路电容效应等不利因素, 深远海域风电的较好输电方式是高压直流 (high-voltage direct current, HVDC) 输电^[1-3]。直流输电系统的输送容量大、距离远、损耗低, 且一个海上换流站就可负责周边多个风电场的接入, 比交流输电方式更具经济性。由于换流站增加了换流阀、直流场等直流设备设施, HVDC 系统的结构要比 HVAC 系统的结构更为复杂; 叠加深远海域环境恶劣、气候复杂多变等不利因素, 现场有

基金项目: 国网电力科学研究院科技项目 (524609210012)

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Electric Power Research Institute (524609210012)

人值班(守)的监控与运维管理的模式难度更大。换流站的设备数字化、智能化程度也较低,照抄现有陆上换流站的综合自动化系统,远远无法满足海上换流站无人值班的要求。换流站的数字化、智能化、智慧化建设,能显著提高其自动化水平,有效降低运行与维护工作量;交、直流设备与主辅设施的监控管理系统一体化设计建设也是海上换流站远程高效运维的有力措施^[4-6]。

与交流站的智能化、智慧化设计建设的快速推进相比^[7-8],换流站的标准化、规范化设计研究较为滞后^[9-10];目前换流站主辅设备设施的数字化、智能化程度也较低。IEC 61850 通信标准统一了数字化智能换流站的信息交互模型^[11-12];全景数据监控、状态在线监测、智能巡检、视频监控及泛在电力物联网等技术为换流站的故障智能诊断预警提供了坚实的基础^[13-18];一键顺控、辅助设施的智能化监控等技术综合推动了换流站主辅设备设施的互联互通^[19-23];图像扫描、数据信息可视化、基于 5G 的智能分析、基于 AI 的运行决策等技术^[24-26],为换流站的智慧化运维,提供了良好手段。大数据、云边计算、泛在物联网、移动互联、人工智能、全数字仿真及数字孪生等新技术的发展,也为海上风电场换流站智慧型监控管理系统的研究与应用开发,提供了技术支撑。陆上智能站的智慧化建设,也为海上换流站的智能化、智慧化设计,提供了参考案例。

本文在分析海上换流站的运维特点和现有换流站综合自动化系统的现状基础上,基于海上换流站主辅设备设施的现场智能化监控和远程智慧化运维管理等功能需求分析,通过对设备状态智能感知、无人机自主巡检、设备缺陷主动预警、设备故障智能诊断、远程操作一键顺控、主辅设备智能联动、运维管理智慧决策等技术的应用研究,提出海上风电场换流站智能化、智慧化的设计理念,研究分析换流站智慧型监控管理一体化系统的体系架构和功能特征,期望能为海上换流站的数字化、智能化、智慧化建设,提供规范可行的技术方案,为实现海上无人值班、陆上集控运维的一体化运营模式打下坚实基础。

1 海上换流站的运维特点

海上风电机组(含 35 kV 箱式变电站)生产的电能,通常通过中压交流海缆汇集,至交流升压站(未来的发展方向是取消交流升压站)升压后,再通过

高压交流海缆接至海上换流站转换成直流,然后通过高压直流海缆输送,至陆上换流站转换成交流后,并入大电网。海上换流站具有以下运维特点:

- (1) 所处海洋环境高温差、高湿度、高盐雾,叠加雷电、台风的影响,交直流设备故障率较高。
- (2) 海洋气候复杂多变、环境恶劣,人员现场运维困难重重,海上换流站有无人值班的需求。
- (3) 海上换流站受制于离岸距离、气候、交通的约束,可达性差,巡视巡检不便。
- (4) 换流站的交直流设备繁多,运维成本较高。
- (5) 海上换流站的现场无人值班(守)、远程智慧运维,对设备设施的数字化、智能化及监控管理系统的自动化水平要求较高。

2 换流站综合自动化系统的现状

换流站的交直流设备繁多,但主辅设备设施的数字化、智能化程度却较低,综合监控管理系统的自动化水平也不高,导致换流站的运行、维护、管理等问题存在诸多问题。主要体现如下:

- (1) 一、二次设备相对独立,界限分明。一次设备没有真正的智能化,辅助设备设施的数字化、智能化程度低,不满足无人值班的要求。
- (2) 二次设备、智能设备和站控系统之间,通信接口和规约不统一,数据信息交互共享不足。
- (3) 监控系统的功能子系统多,没有深度融合为一体,全站协调控制不便。
- (4) 在线监测子系统多且相互独立,运维管理不便;没有综合一体,不能进行故障的综合诊断;难以及时发现故障隐患,无法合理安排运检。
- (5) 辅控子系统数量多且相互独立,存在信息格式不规范、功能不完善等问题,导致信息共享困难,主辅设备的互联互通困难。
- (6) 未来海上换流站综合监控管理系统的自动化水平要求很高,目前的陆上换流站综合自动化系统满足不了海上换流站的基本运维要求。

3 换流站智慧型监控管理系统的架构

智能化的一次设备、网络化的二次设备、共享化的信息平台是数字化智慧型换流站的基础特征。基于开放可扩展的 IEC 61850 标准,可较容易实现不同厂家的智能电子设备(intelligent electronic device, IED)间的数据交互及互操作。智慧化建设

的重点是:基于一次设备的数字化、智能化,加强主辅设备的信息全面感知、主辅设施的互联互通、设备设施缺陷的主动预警、设备故障的智能诊断和运维管理的智慧化决策。设备智能化、状态在线监测、无人机巡视巡检、图像智能识别及大云物移智仿等新技术的快速发展和广泛应用,为海上换流站的智慧化建设提供了关键技术支撑和示范案例。

基于 IEC 61850 标准的规范化基础平台,为不同的高级应用需求提供了统一的支撑平台。统一规范数据的采集、存储、共享、应用和展示,优化信息流的架构,提高数据模型和业务流程的标准化程度。以设备设施的可视化全景数据为基础,一体化系统全面优化整合、集成二次设备及各子系统的功能。以远程操作一键顺控、主辅设备智能联动、设备信息智能感知、无人机替代人工巡检、设备异常自主预警、设备故障远程智能诊断、运维管控智慧决策为建设目标,按照设备设施数字化接口、智能化联动、智慧化运维管理的设计理念,运用智能感知与物联网、大数据分析处理、人工智能诊断、可视化运维、智慧化管理决策等先进技术,构建起分层分区、横向连通、纵向贯通的信息数据一体化可视平台,实现对全场设备设施的全天候、全方位的全景监控与管理。远程监控、信息综合分析、智能告警、高级应用和运维管理等功能的综合运行,实现了调控一体、运维合一的管理模式。

图1为海上风电场换流站智慧型监控管理一体化系统的体系架构。该系统采用分层分布式结构,重要二次设备与系统完全冗余配置。在架构上分

为运行人员控制及站控层、保护控制层、过程控制及 I/O 层;包含综合监控、阀组冷却、状态在线监测、环境监测、空调照明、防火防灾、安防门禁、智能锁控、视频监视、无人机巡检、海上基础平台监测、交直流一体化电源等子系统及高级业务综合应用子系统,实现现场智能化监控和远程智慧化运维综合管理。系统主要功能有运行人员站控、直流输电系统的极控与阀控、交直流系统的控制保护、保护信息及录波、暂态故障录波、计量计费、远动通信等。站控平台及高级应用层在架构上采用海上监控平台和陆上集控平台两级模式,在陆上可集中实施海上风电全场远程监管的各项功能。海上换流站通常无人值班,因此,可适当简化海上换流站站控平台的设备配置。

运行人员控制及站控层,其主要设备包括运行人员站、工程师站、仿真培训站、管理信息站、站长站、系统服务器、站局域网、Web 接口站、规约转换器、远动装置站、时钟系统等。通过网络汇总全站的实时数据与信息,具有数据存取、人机监控、联锁互动及在线维护等功能。业务应用层具有数据统计分析、数据挖掘展示及大数据决策等功能,以应用层的各项功能为基础,实现主辅设备的智能联动、远程调控、远程视频巡视、远程预警及作业人员远方管控等功能,以及全站全景化展示、智能化控制、智慧化管理。

控制保护层,其设备主要有各种控制、保护、安稳、计量等数字化二次设备,包括直流极的控制保护、换流阀冷却控制、交直流设备控制保护等,完成

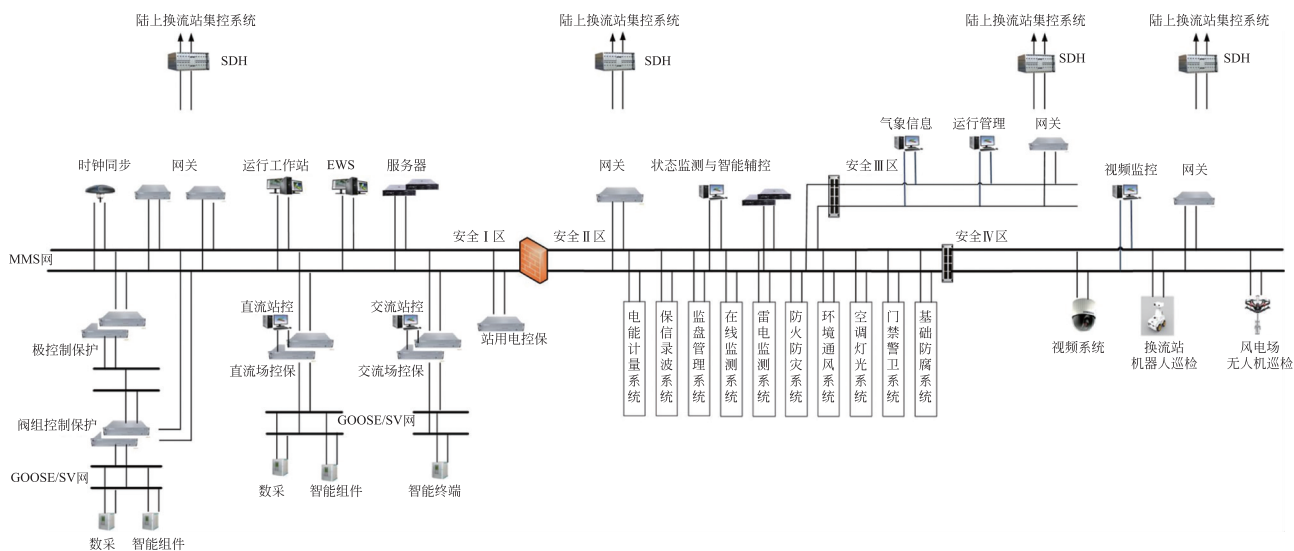


图1 海上换流站智慧型监控管理系统架构图

Fig.1 Architecture diagram of the intelligent monitoring and management system of the offshore converter station

各种控制发令、设备保护、逻辑判别、操作联锁等功能,实现对阀厅设备、交直流场设备的监控与保护。通过站控层和过程层的网络,完成实时数据信息承上启下的通信传输功能。

输入输出层,其过程层设备包括换流变压器、换流阀等一次设备及其所属数字化 I/O、智能化组件或 IED,阀基电子设备(valve base electronics, VBE)、输入输出设备等通过硬接线与现场一次设备进行连接。智能传感器、合并单元、智能终端等是控制保护层的二次设备与过程层的一次设备及站场其他辅助设备的接口装置;实时采集设备运行的稳态、暂态、动态数据,及设备实时状态、站场图像等信息,为一体化监控提供全景数据,其突出特征是信息的数字化采集和网络化共享。

随着工业以太网技术的发展,基于 IEC 61850 的双星形网络,是实施通信冗余的优选方案。站控层的网络交换机,负责保护控制层设备与站控平台层系统的数据交换;现场总线用于完成所有现场 I/O、智能化组件与保护控制层设备之间的信号数据传输。另外配置通信机,负责智能传感器、辅助控制器等设备的规约转换。

安全 I 区是实时监控区,主要有直流输电系统的控制保护及其阀冷却设备的监控、交直流场的控制保护、站用电的控制保护及全站的动态监测、安全稳定等;安全 II 区是非实时监控区,除了电能量计量、保护信息及录波、设备设施的状态在线监测等子系统外,还接入了避雷器监测、防火防灾、环境监测、安全警卫等智能化辅控子系统;安全 III 区是智慧化运维管理区,包括生产运维管理、运检人员安全管控等子系统;安全 IV 区是智能化视频监控区,包括阀厅巡检、视频监控、站内机器人巡检、站外无人机巡检等子系统。

4 智慧型海上换流站的智能化特征

智慧化的建设基础是设备智能化,是智能化的高级形式,而设备智能化的基础又是数字化。海上换流站智慧化建设的主要内容,包括设备的精准智能调控、设备之间的智能互联互通、设备状态的全面监测、设备故障的智能诊断、人员现场行为的智能管控、生产运维管理的智慧决策、全站的可视化监控管理等;实现全站主辅设备的监控由站端向远程、设备状态从单量监测到全息多源感知、巡检模式从人工巡检向无人机器巡检、设备异常的经验判

断向智能诊断、运行工况由人工推送向主动预警等方式的转变。

4.1 主要设备的智能化

海上换流站设备数量多,控制十分复杂;深远海域的无人值班模式更依赖设备设施的数字化、智能化。设备设施的智能化是全站智慧化建设的基础,在智慧化建设过程中,主要是结合泛在智能传感、物联网等技术,有效融合设备运行工况和状态的综合监测,智能诊断功能及时准确地预警设备的异常状况,做到设备故障的预知、预防、预维。

4.2 设备状态在线监测及远程智能诊断

换流站现有的各种在线监测子系统大多分散布置在各自的设备小室,日常运维不便;没有实现统一的存储、分析及终端显示,分析诊断功能单一,没有充分运用各种监测数据去综合分析设备的状态。制定统一的标准,进行统一规划配置,对各种在线监测子系统进行整合,构建一个全站统一的状态在线监测、数据综合分析、故障智能诊断系统。所有功能基于统一的数据访问接口、数据库管理及分析支撑平台,应用功能及人机界面也采用一体化设计。可靠性中心维修(reliability centered maintenance, RCM)技术基于状态在线监测数据进行设备可靠性分析;设备运检从事故或定期检修向状态检修转变,可实现全站的智能化诊断、评估和运维决策,提高了设备安全运行的可靠性。

采用先进的射频及紫外光等检测技术,对换流阀等重点设备及交直流场、阀厅等重要区域,实现全天候、全方位的监测。对全站重要设备和区域进行 3 维立体建模,基于全景界面,全面反映各设备的稳态、暂态、动态数据及运行状态、场景图像等信息,实现信息的可视化监视;3 维立体建模、大数据分析、智能诊断等技术相结合,形成了一套设备状态数字化、诊断智能化、信息可视化的设备状态综合监测与专家智能诊断系统。远程快速调取现场事件记录、故障录波、图像视频等现场信息,进行远程分析、诊断,及时制定适宜的处置方案。

4.3 辅助设备的控制智能化

目前,换流站内众多辅助控制子系统各自独立,运维工作量大。综合辅控各子系统于一体,进行集中监控管理,实现互联联动,提升了快速响应的处置速度。一体化智能辅控系统集成了全封闭阀厅防火防灾、环境监测、空调灯光控制、避雷器监测等辅助功能子系统,对全站辅助设备设施及周围

环境进行全天候的一体化监控,进一步提高了换流站的智能化水平,也为远程运维提供了坚实的基础,降低了全站的运维成本。

(1) 防火防灾智能联动。海上换流站设备较为集中,狭窄封闭空间易发生火灾;换流阀运行的电压和容量较高,极易发热、放电;换流阀的价格昂贵,及时快速的火灾监测、报警、消防手段十分重要。弧光探测、烟雾探测器、紫外火焰探测器、可见红外摄像、工业电视等精确探测设备及多重化的逻辑判断,不但可实现不同类型火灾的探测、报警,还可启动火灾跳闸逻辑、闭锁直流投跳闸,并联动消防灭火、安全防卫等智能子系统。

(2) 环境空调智能联动。海上换流站的运行环境复杂,恶劣环境易引起设备故障。基于智能传感器获取温湿度、盐雾等环境数据;并联动除湿机、空调等,维持环境的湿度、温度水平,改善设备和系统的运行环境。火灾时,自动切断通风空调系统;火灾扑灭后,开启排烟风机。

(3) 智能化锁控。换流站的防误闭锁不同于交流站的防误闭锁,大量安装“五防”设备,会增加控制保护系统的复杂程度,不利于安全稳定运行。机械、电气、电磁及控制保护软件等强制性闭锁手段无法满足换流站的防误要求,需加强现场的安全锁控管理。智能化的锁具和钥匙具有开锁权限、开锁流程远程化功能,而实物身份标识(identity, ID)与射频识别(radio frequency identification, RFID)技术能快速识别设备;智能锁控与防误操作之间信息交互,加强了换流站内操作的防误锁控管理。

(4) 安全警卫联动。船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)自动跟踪周围海域的船只,当非法入侵时,启动高频电台喊话,警告驶离,联动视频监视进行拍摄取证,并利用雾笛系统对船只进行驱赶。门禁系统综合运用电子围栏、红外探测器、声光报警器等设备,防止外人入侵、破坏、盗窃等;联动照明、视频等子系统,可实现入侵警告、抓拍。

4.4 巡检巡视的智能化

换流站的区域广、设备多,包括交直流场、换流变压器、换流阀等,人工巡检巡视耗时费力。智能无人机巡检系统整合了机器人、导航定位、非接触检测、模式识别等技术,实现自主的全天候、全方位地巡视巡检,降低了劳动强度,提高了巡检作业智能化水平;系统集成可见光、红外和电晕紫外等

仪器,以自主、本地或远方遥控模式,进行全方位、全天候地自主综合巡检巡视,准确掌握设备运行状态;并进行智能综合分析、诊断、评价。多源视频智能监控技术利用多种监控视设备,开展不同区域的不同位置和场景的移动式、多方位视频监控;通过视频综合管理平台,构建换流站全方位的多源视频监视、智能分析和统一监控管理系统;还可与照明、安消防等子系统联动。无人机可巡视海上换流平台的场景,同时对周围海域的环境及安全状况进行高清视频巡视。无人机巡检和视频监控配合,实现了设备巡视巡检的人工替代,提升全站的安全运行与管理水平。

换流站的结构复杂,运行方式及设备故障类型多样,人工编写事项汇报费时费力。智能扫描系统利用超高清摄像头,实时拍摄现场显示屏的信息,对事件记录进行实时屏盘扫描,并上传至智能监盘管理系统;基于智能识别技术,对事件报警信息进行分类,并提取关键特征,快速掌握实时运行状况;声音告警提示和短信联动发送功能提高了事件处理的效率。

4.5 生产管理的智能化

换流站的交直流区域广、设备多、运检人员多;基于视频监控、WiFi 的全覆盖,实现运检人员多方位、多角度、全过程的智能化安全管控;集成多种技术的检修现场智能管控平台优化了检修流程,缩短了检修工期。以设备台账为核心,统一交直流设备物资与备件的标准编码,实现设备资产的数字化管理;设备资产数字化为设备的运行检修、状态分析、故障诊断提供了支撑,包括计划检修、检修工单的智能化检修管理。基于设备运行数据管理,通过智能巡检、远程视频专家诊断,实现设备异动与维护工作的智能联动。通过统一的设备控制、场景监视、数据智能分析、图像识别、报警提示,实现生产管理的智能化。

4.6 高级应用功能的智能化

(1) 应用功能的智能化。换流站控制元件多,工作票、操作票的编制、实施、管理尤为重要。智能操作票系统采用面向对象的可视化设计方法,基于设备的实时运行状态和操作规程,智能动态地生成操作序列。

(2) 主辅设备的智能联动。换流站需联动涉及的子系统较多,联动控制策略也较复杂;但智能协同互动可缩短异常处置的时间。例如,消防子系统

联动视频监控,查看报警区域是否确有火灾,当判为火灾时,启动火警,同时开通消防通道;联动照明控制,启动应急照明和疏散指示灯;联动安防,启动门禁系统解锁,开通人员逃生通道。

(3) 智能化运检安全管控。换流站运检过程中,参检单位多、人员多、交叉多,运检现场的实时安全管控要求严、责任重。运检过程可实现高清视频自动跟踪、室外定位与3维实景的精确融合,射频识别、设备设施监测数据与周围环境立体信息之间的深度融合,以及这些场景信息数字化、可视化技术的综合运用。一体化管控平台可实现决策指令与现场信息的实时交互,实现基于精确时空的多维信息可视化的智能安全管控。

(4) 运维管理的智慧决策。生产运维管理是智慧化建设的核心之一。海上换流站的交直流设备并存,种类繁多,其控制系统和辅助系统也十分复杂;叠加高盐雾、强风暴的环境,其运维难度远超陆上站。海上换流站的运行和维护是一个全新的领域,基于RCM的新理念,以设备监测的状态数据为基础,通过对设备可靠性及其影响因素的综合分析,并对设备状态进行评估,利用设备状态检修辅助决策系统,动态调整运维策略,提升全站运维管理水平。管理人员还可借助智慧移动办公系统,随时随地掌握现场运维状态,及时应急决策。

5 结语

海上换流站智慧型监控管理一体化系统以一次设备智能化、二次设备网络化、全站信息数字化、共享信息标准化为基础,以功能一体化集成、高级应用互联互通、运维管理智慧决策为建设目标;全景信息交互一体化平台以设备运行的稳态、动态、暂态数据及设备状态、场景图像等信息为基础,统一接入、存储、应用,标准化共享,有效集成并优化了各功能子系统。全站的运行监视、信息综合分析、智能控制与告警、远程操作顺控、智慧运行维护与管理等功能集成一体,支持全站调控合一、运维一体。

海上风电场换流站的主辅设备设施繁多,其监控子系统也十分复杂。在海上换流站的数字化、智能化、智慧化建设实践过程中,要以设备精准控制、设施精细维护、全站安全高效为目标,积极探索智能传感、泛在物联、无人机、云边计算、大数据分析、人工智能、全数字仿真、虚拟现实(virtual reality,

VR)/增强现实(augmented reality, AR)等先进技术的应用研究;努力打造海上换流站无人值班、陆上换流站集控运维的一体化运营模式。

参考文献

- [1] 王秀丽,赵勃扬,黄明煌,等. 大规模深远海风电送出方式比较及集成设计关键技术研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(2): 138-145.
WANG Xiuli, ZHAO Boyang, HUANG Minghuang, et al. Research of integration methods comparison and key design technologies for large scale long distance offshore wind power [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 138-145.
- [2] 徐进,金逸,胡从川,等. 海上风电集群电能组合输送方式研究[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 101-113.
XU Jin, JIN Yi, HU Congchuan, et al. Research on combined power transmission scheme for offshore wind farm cluster[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 101-113.
- [3] 朱家宁,张诗钊,葛维春,等. 海上风电外送及电能输送技术综述[J]. 发电技术, 2022, 43(2): 236-248.
ZHU Jianing, ZHANG Shitan, GE Weichun, et al. Overview of offshore wind power transmission and power transportation technology[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 236-248.
- [4] 卿子龙,孔庆香. 海上风电场智慧型监控管理一体化系统[J]. 分布式能源, 2021, 6(5): 59-63.
QING Zilong, KONG Qingxiang. Intelligent monitoring and management integrated system of offshore wind farms[J]. Distributed Energy, 2021, 6(5): 59-63.
- [5] 卿子龙,柏嵩,刘剑欣. 海上升压站智慧化建设研究[J]. 电工电气, 2021(12): 73-76.
QING Zilong, BAI Song, LIU Jianxin. Discussion on the intelligent construction of offshore booster station [J]. Electrotechnics and Electric, 2021(12): 73-76.
- [6] 徐志伟. 海上风电升压站平台设计及有限元计算分析[J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40(1): 44-48.
XU Zhiwei. Design and finite element analysis of offshore wind power booster station platform [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40(1): 44-48.
- [7] 中国电力企业联合会. 110(66) kV~220 kV 智能变电站设计规范: GB/T 51072—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [8] 国家电网公司. 智能变电站辅助控制系统设计技术规范: Q/GDW 688—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [9] 全国电力电子系统和设备标准化技术委员会. 柔性直流输电系统成套设计规范: GB/T 35703—2017[S]. 北京: 中国标准出版, 2017.
- [10] 全国量度继电器和保护设备标准化技术委员会. 柔性直流输电控制与保护设备技术要求: GB/T 35745—2017[S]. 北京: 中国标准出版, 2017.
- [11] 景乾明,薛海平,曹卫国,等. IEC 61850 在高压直流输电系统中的应用[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(2): 50-52.
JING Qianming, XUE Haiping, CAO Weiguo, et al. Application of IEC 61850 in HVDC system [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(2): 50-52.

- [12] 梁旭明, 常乃超. 数字化智能换流站[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(24): 98-103.
LIANG Xuming, CHANG Naichao. Digital smart converter station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(24): 98-103.
- [13] 陆如, 于惠鸣, 刘自超. 基于全景数据系统的特高压直流换流站监控方案[J]. 通信电源技术, 2019, 36(7): 80-83.
LU Ru, YU Huiming, LIU Zichao. Monitoring scheme of UHVDC converter station based on panoramic data system [J]. Communication Power Technology, 2019, 36(7): 80-83.
- [14] 唐僊, 施世鸿. 换流站不同在线监测系统接入方案研究[J]. 南方能源建设, 2017, 4(S1): 47-51.
TANG Si, SHI Shihong. Different online monitoring systems access scheme of the converter station[J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(S1): 47-51.
- [15] 杨学广, 梁家豪. 换流站设备运行状态智能监控系统的研究与应用[J]. 电工技术, 2019(5): 58-60, 70.
YANG Xueguang, LIANG Jiahao. Research and application of intelligent monitoring system for operation state of equipment in converter station[J]. Electric Engineering, 2019(5): 58-60, 70.
- [16] 黄晨, 王应坤. 智能机器人应用下的换流站巡视模式探讨[J]. 湖南电力, 2018, 38(5): 42-44.
HUANG Chen, WANG Yingkun. Discussion on the equipment inspection mode of conversion station in the application of intelligent robot[J]. Hunan Electric Power, 2018, 38(5): 42-44.
- [17] 陆勇, 王世巍, 李攀, 等. 特高压换流站工程多源视频智能监控研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2020, 10(11): 60-61.
LU Yong, WANG Shiwei, LI Pan, et al. Research on multi-source video intelligent monitoring of UHV converter station project[J]. Modern Industrial Economy and Informatization, 2020, 10(11): 60-61.
- [18] 吕继伟. 基于泛在电力物联网的换流站在线监测系统优化综述[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 9-15.
LYU Jiwei. Optimization survey of online monitoring system for converted station based on ubiquitous power IoT [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 9-15.
- [19] 范堃, 房萍, 王申强. 一键顺控智能化拟票技术研究与应用[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(10): 43-49.
FAN Kun, FANG Ping, WANG Shenqiang. Research and application of intelligent drafting operation order technology with one-key sequential control[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(10): 43-49.
- [20] 闫琪, 杨源. 海上换流站智能辅助控制系统方案设计[J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 118-121.
YAN Qi, YANG Yuan. Scheme design of intelligent auxiliary control system for offshore conversion station[J]. Southern Energy Construction, 2021, 8(3): 118-121.
- [21] 董靓靓, 王顺亮, 马俊鹏, 等. 基于LM法的换流站关键设备宽频建模方法研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(2): 9-14.
DONG Liangliang, WANG Shunliang, MA Junpeng, et al. Broadband modeling of key equipment in converter station based on Levenberg-Marquardt algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(2): 9-14.
- [22] 崔宗清, 肖昇. 中州±800 kV换流站阀厅火灾监控系统的设计研究[J]. 电世界, 2016, 57(8): 4-8.
- [23] 李靖翔. 直流换流站智能锁控系统的设计与实现[J]. 电工技术, 2017(6): 59-60.
- [24] 朱添益, 戴逢哲, 程思举. 基于图像处理技术的换流站智能扫描系统[J]. 电气技术, 2020, 21(4): 25-29.
ZHU Tianyi, DAI Fengzhe, CHENG Siju. An intelligent scanning system of converter station based on image processing [J]. Electrical Technology, 2020, 21(4): 25-29.
- [25] 于浩, 王旭东, 金鑫, 等. 基于5G技术在换流站中的智能应用分析[J]. 电气自动化, 2021, 43(1): 21-22, 62.
YU Hao, WANG Xudong, JIN Xin, et al. Analysis of intelligent 5G application at converter stations[J]. Electric Automatization, 2021, 43(1): 21-22, 62.
- [26] 龙英云, 黄尚雄, 黄坤. 基于AI换流站智能监控辅助运行决策系统应用探索[J]. 科学与信息化, 2019(19): 24-25, 27.

收稿日期: 2023-02-15

作者简介:

卿子龙(1965),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统保护、控制及其自动化, 13951958278@163.com;

王伟(1967),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统保护、控制及其自动化;

刘剑欣(1973),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统保护、控制及其自动化。



卿子龙