

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.008

智慧海上风电场的定义、架构体系和建设路径

陈亮[✉], 阳熹, 杨源

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的] 海上风电场智慧化, 是提高海上风电场运行水平和效益的现实需要。[方法] 首次提出了智慧海上风电场的定义, 规划了智慧海上风电场的架构体系, 从智能设备、业务控制、场级管控、集团监管四个层级, 阐明了智慧海上风电场的建设路径, 提出了具体的工程实施建议。[结果] 实现了海上风电场设备、资产的智慧化监控与管理, 为覆盖项目设计、基建、运营的全生命周期过程、实现全场设备、资产的数字化、智慧化监控与管理的智慧海上风电场指明了发展路径。[结论] 海上风电场智慧化方案, 对提高海上风电场自动化水平和运维效率、降低运维成本、提高海上风电的经济和社会效益、提高抵御风险的能力具有重要意义。

关键词: 智慧海上风电场; 海上风电; 智能设备; 智能控制; 智能运维

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)03-0062-08

开放科学(资源服务)二维码:



Definition, Architecture and Constructive Route of Intelligent Offshore Wind Farm

CHEN Liang[✉], YANG Xi, YANG Yuan

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

Abstract: [Introduction] Intelligence of offshore wind farm is a realistic need to improve the operation level and benefit. [Method] Definition of Intelligent offshore wind farm was firstly proposed and then architecture of the intelligent offshore wind farm was established. The intelligence of offshore wind farm was formed vertically of four strata, such as intelligent device, service control, plant-grade control and group supervision. Construction means and detailed project practice advices were put forward, guiding the intelligence of offshore wind farm. [Result] The proposed intelligence method covered the entire life cycle of project, including the design, infrastructure and operation and realized intelligent monitoring and management of offshore wind farm equipments and assets. [Conclusion] The proposed method can improve the automation level, operation and maintenance efficiency of offshore wind farms, reduce operation and maintenance costs, and improve the ability of resisting risks.

Key words: intelligence of offshore wind farm; offshore wind power; intelligence device; intelligence control; intelligence maintenance

0 引言

能源是推进社会发展的驱动力。海上风电作为清洁的可再生能源, 距离电力负荷中心近, 风能资源丰富, 风速高, 紊流小, 且不占用珍贵的土地资源, 对环境影响小, 近年来获得了规模发展^[1-2]。

海上风电发展过程中, 呈现出与陆上风电不同的特点^[3], 其特点之一, 在于离岸距离远、运行环境恶劣、无人值守、运维困难、费用昂贵, 对于通过数字化、智慧化提升风电场运营水平和效益的需求非常迫切, 建设智慧海上风电场已成为行业共识。

然而, 智慧海上风电场建设, 没有统一的定义和标准, 目前开展的一些探索, 主要还停留在建设数字化物理载体阶段, 为向更高效、可靠的海上风

收稿日期: 2020-06-07 修回日期: 2020-09-07

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“近海深水区大容量风电场电气解决方案研究”(EV05011W)

电场发展奠定了一些基础。智慧海上风电场建设,需要进行顶层设计、全面规划、梳理理念、明确路径,并因地制宜、循序渐进地加以实施。

1 智慧海上风电场的定义

智慧海上风电场是指广泛采用云计算、大数据、物联网通信、人工智能等新技术,集成智能设备、控制和管理等技术,把传统风电场中无感知、

无思想的设备、系统,孕育成状态感知、自主适应、智能融合、精准可控的更安全、更高效、更经济的全新海上风电场。

智慧海上风电场实施的关键在于理清架构体系。智慧海上风电场包括四层结构:智能设备层、业务控制层、场级管控层和集团监管层。四层架构各有分工、高度融合,在保证网络传输安全的前提下高效组织指令流和信息流,如图1所示。

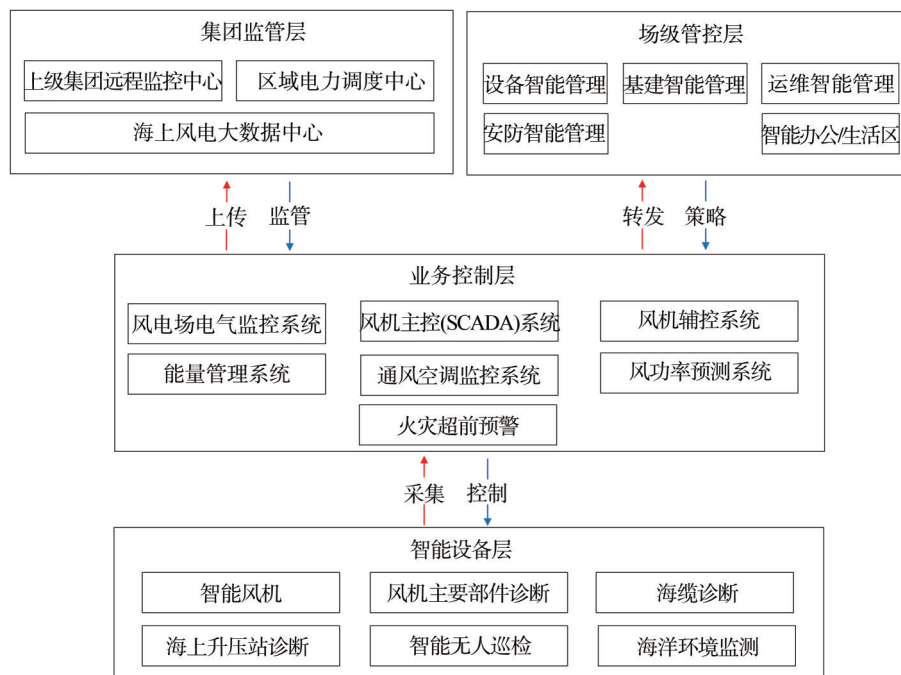


图1 智慧海上风电场结构

Fig. 1 Architecture of intelligent offshore wind farm

2 智能设备

智能设备层是智慧海上风电场的数据基础。智能装置是智能设备层的基本元素,应使用标准通信接口和协议,实现数字化监测和网络化控制;应具备就地综合评估、实时状态报告、故障诊断等功能。

2.1 智能风机

智能风机,是能够自主感知、分析和决策的风机,是在风机上采用先进的状态监测、数据分析、决策支持、智能控制技术,使机组准确地感知自身和外部条件,优化调整自身以运行在最佳工况。

2.1.1 个体智能

应能胜任高温或低温环境下的启动与保护运行、低/高电压穿越等涉网安全控制、风速/风向测

量、叶片状态判断及对应的运行策略;应能评估真实风电场环境下单个机组和整个风场的功率和载荷水平,确定对应风况下的风机调整导则,提高风场的效益和安全。

为风机匹配机械传动链、塔筒、基础、桨叶以及重要的螺栓载荷等重要元部件的状态监测,实现对机组参数渐变、突变事件的智能化故障预警与诊断,并具备从不利事件中安全逃逸的恢复功能。

2.1.2 群体智能

基于风电机组运行状态数据库中的海量样本,通过数据挖掘和机器学习,发现数据间的耦合规律,寻找风机集群在时间、空间、运行方式、预防性维护检修等维度上的配置,实现全场效益最优。

根据电网指令、环境条件、机组运行状况,对

各风电机组个体发送群体协同目标,风电机组个体在群体目标指引下,通过与相邻机组共享信息,感知自身的状态,同时判断出与相邻机组的相互影响,自动解析出自身单机目标,进而驱动单机控制。

2.2 海缆诊断

海底电缆是海上风电场电能传输的关键部件,海底电缆的事故将导致极大的损失。有必要实时监测海缆的温度和应力变化。

具体的方法,是借助海缆中的光纤线芯,采用光纤分布式传感新技术,判断电缆是否受损及周围环境是否发生变化,并对海缆异常进行报警和定位。

光纤分布式传感技术^[4]的基本原理是:激光在光纤线芯中传输时,激光脉冲和光纤分子的相互作用诱发三种散射:瑞利散射(OTDR)、拉曼散射(R-OTDR)和布里渊散射(BOTDA/R),其散射光谱分布如图2所示。

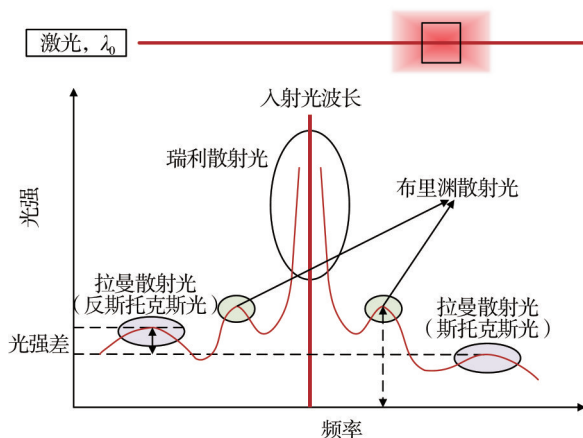


图2 激光在光纤中传输的散射

Fig. 2 Scattering when laser transmitted in optical fiber

几种散射模式的优缺点及应用场合简列如表1所示:

远距离海缆输电情况下,考虑到传输距离、空间分辨率、测量重复性的互相制约关系(这几个指标无法同时做到最佳),可在海缆两端采用双仪器配置,利用2根光纤组成环路,引入布里渊光时域分析(BOTDA)方法进行双端测量,并在后台合并优化两侧仪器的测量重复性。

2.3 海上升压站诊断

海上升压站平台在运行过程中受到海水冲击、

表1 几种散射的优点/缺点及应用情景

Tab. 1 Advantages and disadvantages of several scattering model and their application situation

工作模式	优点	缺点	检测对象	应用情景
瑞利散射(OTDR)	—	—	断点、损伤检测	Φ-OTDR 可用于海缆扰动监测
拉曼散射(DTS)	较高测温精度,检测时间短,成本低	随着检测距离的增加,返回的布里渊光强会减弱,检测距离短(约10 km)	温度	可用于35 kV 阵列海缆监测(多模光纤)
布里渊光时域反射(BOTDR)	测温精度和分辨率高,光纤断裂时可继续工作并定位断点	随检测距离增加,返回的布里渊光强会减弱,检测距离中等	应变、温度	可用于35 kV 及220 kV 海缆监测(单模光纤)
布里渊光时域分析(BOTDA)	测量精度和分辨率高,检测时间短,检测距离远	系统复杂,两端测量,不能测断点,成本较高	应变、温度	可用于35 kV 及220 kV 海缆监测(单模光纤)

泥沙冲刷、腐蚀等影响,其结构安全性会降低,有必要通过在线连续测量并存储主要结构件的关键安全参数,评估并判断海上升压站的结构响应是否在安全限值内,发现早期安全隐患及主要根源,避免倒塌等灾难性事故及恶性不可逆结构问题出现。

2.3.1 基础力学监测

通常应提供应力应变、结构振动、倾斜和地基不均匀沉降共4类功能监测模块,传感器选型、安装位置、安装数量如图3所示。

2.3.2 基础腐蚀监测

为了缓解腐蚀问题,防止钢结构寿命降低过快,一般采用防腐涂层、阴极保护(牺牲阳极法)作为防腐措施。安装牺牲阳极后,应定期测量保护电位,至少每半年测量一次,收集电位变化数据,掌握钢结构基础防腐情况^[5]。人工检测工作量大、耗时长,安全风险很高,因此有必要实时检测阴极保护电位。

应根据牺牲阳极的布置,在海上升压站钢基础(也含风机钢基础)距离水面的不同高度设置参比

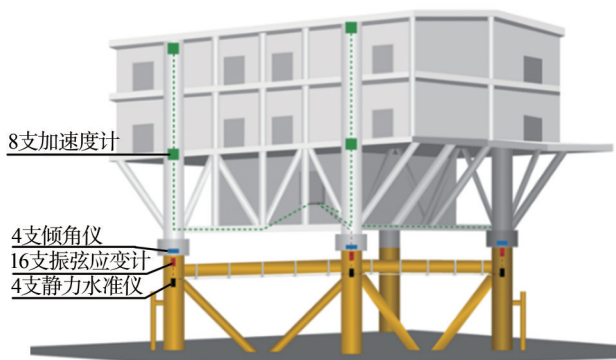


图 3 海上升压站结构监测

Fig. 3 Structure monitoring of offshore substation

电极, 用于采集保护电位信号, 实现电位实时监测、数据存储、电位超限报警、电位趋势预测等功能, 全面掌握钢结构基础的防腐情况。

2.4 机器换人智能巡检

鉴于海上风电水域大、环境复杂、维护人员少、海上升压站平台无人值班, 可在海上升压站 GIS 室、配电室等主要区域, 设置“机器换人”的智能巡检机器人; 对风机叶片进行全自动无人机航测、巡检, 结合物联网、远程图传、AI、射频识别、三维建模等多种先进技术, 从管理、安防、节能、隐患排查等多维度对海上风电场实施动态监控及预警。

3 业务控制

业务控制层位于智能设备层与场级管控层之间, 旨在实现风电场生产过程的智能监控, 确保风电机组在不同条件下达到最佳运行状态。

3.1 风机监控(SCADA)系统

风机监控(SCADA)系统是风机厂成套提供的风机监测控制系统。它对风机设备进行全面监视和控制, 监测功率、电流、电压、风速以及温度、压力等信号, 实现数据采集、设备控制、参数调节以及信号报警, 完成风机的能量管理。

3.2 风机辅控系统

风机监控(SCADA)系统侧重于监测电气信号, 而风机主要部件的初期机械损伤, 对众多电气信号基本没有影响, 故风机监控(SCADA)系统基本无法监测风机主要部件的初期机械损伤。

为了弥补上述不足, 可考虑配置风机主要部件状态监测——风机辅控系统^[6], 整合 2.1.1 节风机部

件状态监测系统的信息, 实现风机的动力设备、环境、安防的统一后台监控, 以及对风机多个关键部件的全面状态监测、故障早期预警和诊断。

辅助监控系统结构如图 4 所示。

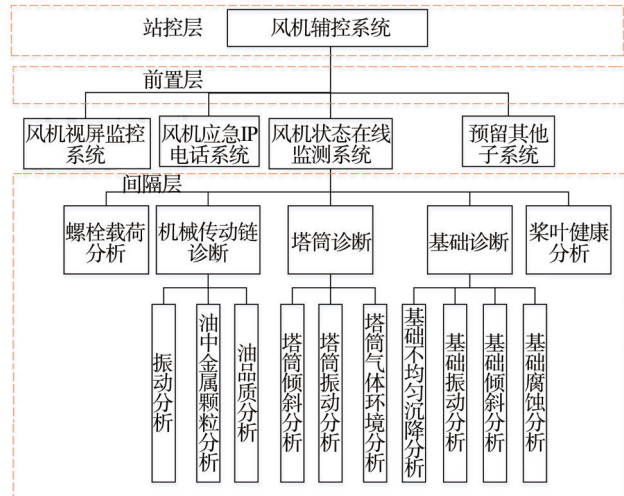


图 4 风机辅控系统结构示意图

Fig. 4 Architecture of wind turbine auxiliary monitoring system

3.3 海上风电场电气监控系统

海上风电场电气监控系统在陆上集控中心内实现对全场电气部分的统一监视与控制, 完成海上风电场远动信息上送, 并接受调度中心的调度指令(包括 AGC、AVC 控制), 完成电气设备五防功能。

电气监控系统采用星型拓扑, 采用开放、分层、分布式双网结构, 双网同时进行数据通信。

从纵向上看, 系统分成站控层和间隔层。站控层实现整个系统的监控及管理功能; 间隔层由就地智能单元组成, 在站控层及通信网络失效时, 间隔层能独立实现设备的就地监控闭锁。

从横向上看, 系统应按电力系统二次安全防护的有关规定, 按安全分区、网络专用、横向隔离的原则, 设置 3 个安全防护分区^[7]。安全区 I 是具有实时监控功能、总线连接使用电力调度数据网的实时 VPN 或专用通道的各业务系统构成的安全区域; 安全区 II 是不直接参与控制, 使用电力调度数据网的非实时 VPN 的各业务系统构成的安全区域; 安全区 III 为生产管理区。如图 5 所示。

4 场级管控

场级管控层以数据深度融合共享、大数据分析为基础, 以资产高效利用为目标, 实现对全场设备

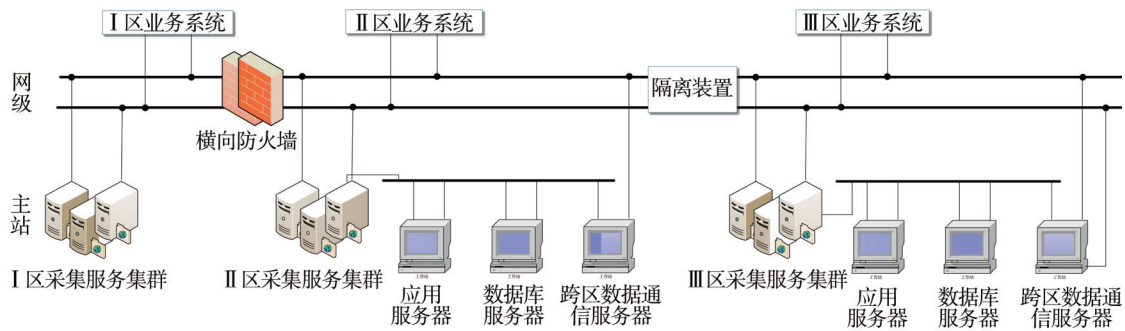


图5 海上风电场电气监控系统结构

Fig. 5 Architecture of offshore wind farm integration electrical monitoring system

资产数字化、智能化的监管，以及生产经营关键环节的辅助分析、智能诊断、决策支持。

4.1 设备智能管理

智慧海上风电场的主要设备都设置了设备状态诊断，如前文3.2节提到的风机辅控系统。基于风电场海量的历史数据，可以立起设备健康状态的预警模型^[8]，提取主要故障特征量，结合风机运行的实时数据，比对模型特征量，判断设备的实时运行状态，实现设备初期劣化和故障预警；基于设备状态初期预警，寻找设备可用、可靠和维修成本的最佳平衡，有效防止设备欠维护和过维护。

4.2 基建智能管理

海上风电项目建设、运维过程中，存在以下痛点问题：海陆之间通信困难；无法掌握海上作业船舶和人员的实时画面情况，安全管控难；施工作业环境特殊，施工窗口期对海上风电施工管理极为重要^[9]。有必要结合海洋工程的特点，建立一套实用有效、稳定可靠的海上风电场智慧基建管理系统。

可以建立海上气象及海洋环境观测，实时测量并显示风速、风向、气温、相对湿度、气压；并对作业海区未来7天的天气现象、气压、风向、风力、气温、浪高、能见度等要素进行预报，安排预警和预处理方案及出海作业策略。

可以在陆上项目部和海上测风塔设置甚高频（VHF）电台中继台，建立覆盖陆上项目部和海上作业现场的人、船通信对讲平台，确保可靠通信。

可以结合海事船舶信息系统（AIS），对海上升压站、风机、海缆敷设等所在海域进行船舶识别以及定位，对船舶减速、抛锚、停航等各种状态进行实时监测，通过在海图上划定警戒线，对进入警戒

线的船只进行重点监测，通过AIS接收的船舶海事部门备案信息，提醒船舶禁止抛锚、迅速离开；如果未见船舶响应则通过高频电台喊话通知，以防止海上风电场被入侵。

当人员落水后，救生衣AIS MOB设备（个人示位标）自动向AIS基站、卫星发送求救信号，系统收到求救信号后自动标记处落水人员在电子海图中的位置，实时发出报警警示，同时联动远距离光电设备功能，将摄像头自动对准落水位置，锁定落水人员，确保第一时间及时展开救援程序。如图6所示。

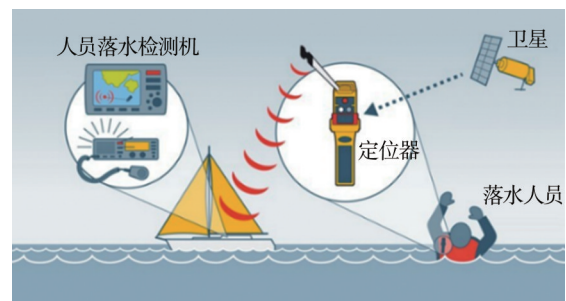


图6 人员落水监测示意图

Fig. 6 A maritime distress monitoring

针对没有安装或者没有开启AIS的船舶，可借助近海雷达实现监测区内全天候、全方位、无盲区监控。雷达也可与光电设备联合，通过摄像头实时、自动跟踪进入警戒区内的船舶，摄像头自动定位朝向威胁目标、跟随目标移动而实时调整摄像头位置，显示实时视频画面并留影。如图7所示。

4.3 运维智能管理

4.3.1 海上升压站环境监测与控制

除4.2节提到的海上气象及海洋环境观测外，



图7 光电摄像头和雷达的联动流程

Fig. 7 Progress of camera automatic correlated with radar

还可以:

对无人值守海上升压站,设置温湿度和压力自动化调节系统,实现对海上升压站暖通空调系统压力、温度、湿度的实时采集和处理,并对除湿机、空调、电动阀等设备进行联动控制,维持海上升压站压力、温度、湿度在设定范围;

构建电气火灾超前预警,实现剩余电流监测、绝缘老化实时监测和故障电弧监测,采用智能线型热点探测器,实时探测受热面大小,实现实时温度显示、温度超过设定值预警、温升速率预警,探测早期电气火灾隐患,实现从“报警”到“预警”跨越。

4.3.2 能效评估

开展场站风资源评估,结合功率预测系统的预测结果和能量管理设备的实时数据,评估风电场整体运行效果,开展风电机组间对比、可利用率和单机性能分析,促进风电机组性能提升、改造以及风电场运维优化。

4.3.3 风机调整

1)一机一控

一机一控是指通过风机本身的状态感知和智能调节,提升单台机组发电量,可采取的措施有:

辨识风机SCADA数据中风机出力与风速、风向角存在对应关系,寻找“顶点”进而标定偏航对风偏差角度,以提升单台机组发电量。

引入激光雷达精确测风,探测叶轮前部200 m左右的风速,以便机组提前根据风况做出最佳的反馈调节,从而降低机组载荷。

结合风场实际风况,分析风场超出切出风速的风频,测算发电量增加的潜力,如发电量增加明显,则进一步评估风机载荷。通过调整控制策略,优化机组切出风速,提升单台机组发电量。

2)集群出力优化

集群出力优化,是指风机集群在时间、空间、运行方式、预防性维护等维度上的配置,实现全场效益最优。

可以基于风机运行的历史数据,通过数据挖掘技术,找出问题机组及其差异存在点,通过在线矫正、补偿,改善问题机组的运行性能。

可以设置动态智能矫正算法,实现偏差自动矫正或最大功率自动追踪,实时响应由于制造安装过程中的细微偏差、或环境参数的变化,使风力机组性能控制更加精准。

可以持续开展风资源后评估,在风电场内选取少量代表机组,安装载荷测量设备,实时测量机组关键部件载荷,推算全场机组的载荷情况,在线估算每台风机的剩余寿命,掌握机组的健康状态,根据机组安全裕量动态调整机组控制,充分发掘机组发电潜力。

4.3.4 备件管理

恰当的备件管理能够适应海上风电场珍贵的可及时间,减少故障设备维修等待,做到因备件所耗用的成本小于该部件的故障停用损失^[10]。

综合设备实时运行监测信息和预判的设备工况走向,分析预测未来备件需求,针对长期闲置的备件物资给出预警及处理意见,形成备件采购和储备规则以及预警规则。结合备件调配的周转成本分析,还可以针对性地建立区域级备件集中仓储管理。

5 集团监管

海上风电项目分布相对分散、集中管理难,在当前海上风电降补贴的背景下,风电运营商开始建设区域集控中心/集团数据中心,实现“远程集中监控、现场少人值守、平台数据共享、专业运维检修”的创新管理模式。

区域集控中心/集团数据中心,是在电力专用网络或运营商企业专线网络环境下,满足二次安全防护要求设立的远程集控系统,其网络拓扑结构如图8所示。

从横向来看,安全区I(实时I区)和安全区II(非实时区II区)之间经硬件防火墙防护,生产

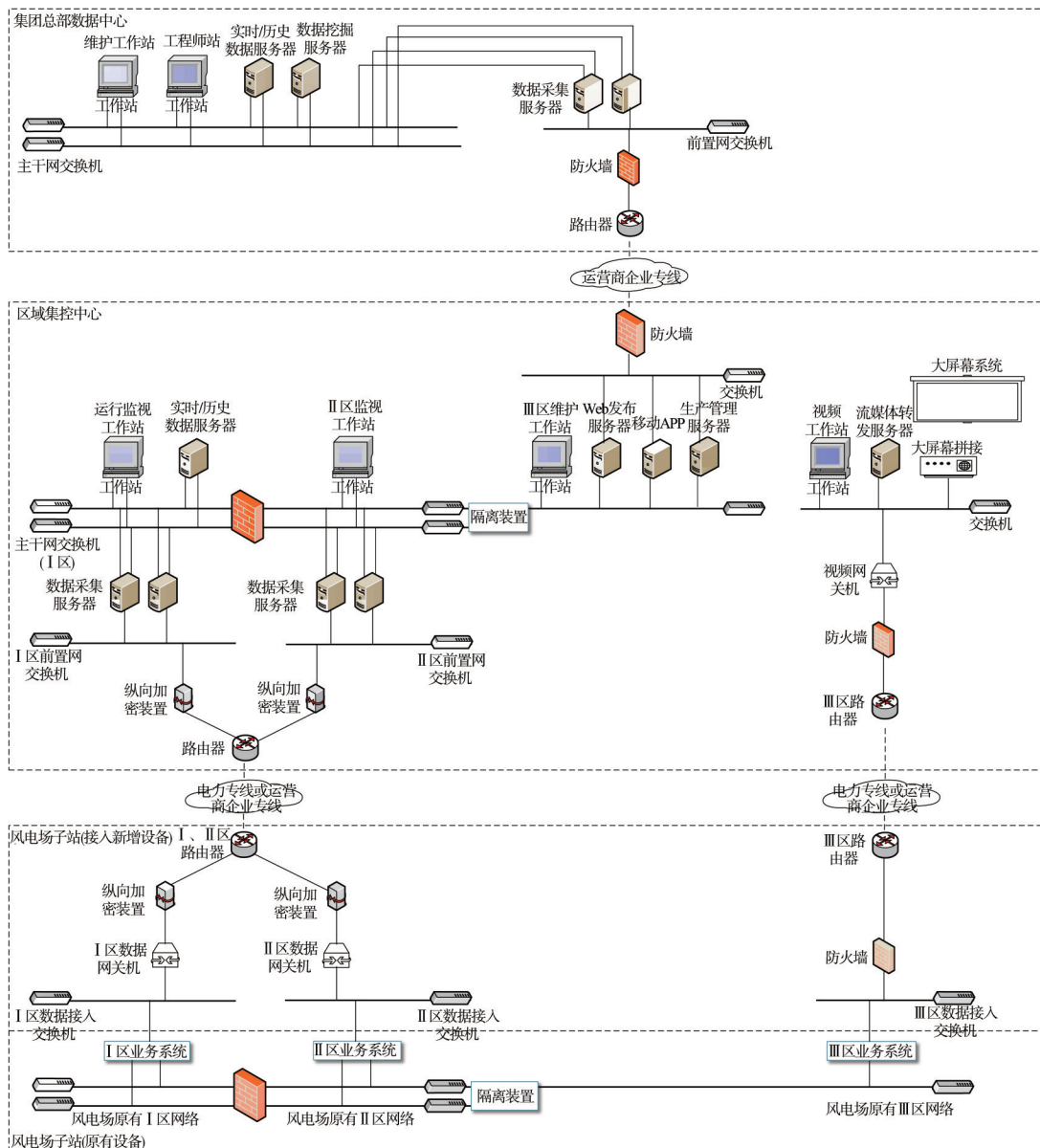


图8 集团监管系统结构图

Fig. 8 Structure of group supervision system

控制（I、II区）与生产管理区（III区）之间安装正向物理隔离装置，生产管理区（III区）和internet网之间经硬件防火墙防护。

从纵向上看，安全区I和安全区II数据通道两侧安装纵向加密装置，III区单独使用一条物理通道，通道网络通道两侧安装硬件防火墙。纵向通道可选用电力专线通道或运营商企业专线。

区域集控中心/集团数据中心挖掘各风电场子站的风机监控（SCADA）系统、风机辅控系统、电气监控系统融合的业务数据中所蕴含的关键信

息，提供安全可控乃至个性化的实时监测，结合海上风电大数据分析^[11]，实现生产过程监视、性能监测及分析、运行方式诊断、主要设备诊断及故障预警、远程维护指导，形成集团数据资产，形成“互联网+”电力技术服务业务。

6 结论

建设智慧海上风电场，实现海上风电场设备、资产的智慧化监控与管理，对提高风电场自动化水平和运维效率、降低运维成本、提高海上风电的经

济和社会效益、提高抵御风险的能力具有重要意义。

首次提出了智慧海上风电场定义,提出了智慧海上风电场的架构体系,从智能设备、智能控制、场级管控、集团监管四个层级,系统阐述了怎样建设智慧海上风电场,为覆盖项目设计、基建、运营的全生命周期过程、实现全场设备、资产的数字化、智慧化监控与管理的智慧海上风电场指明发展路径。

参考文献:

- [1] 徐龙博,李煜东,汪少勇,等.海上风电场数字化发展设想[J].电力系统自动化,2014,38(3):189-193.
XU L B, LI Y D, WANG S Y, et al. Digital development assumptions of offshore wind farms [J]. Automation of electric power systems, 2014, 38(3): 189-193.
- [2] 黄碧斌,张运洲,王彩霞.中国“十四五”新能源发展研判及需要关注的问题[J].中国电力,2020,53(1):1-9.
HUANG B B, ZHANG Y Z, WANG C X. New energy development and issues in China during the 14th five-year plan [J]. Electric Power, 2020, 53(1): 1-9.
- [3] 杨建军,俞华锋,赵生校,等.海上风电场升压变电站设计基本要求的研究[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3781-3788.
YANG J J, YU H F, ZHAO S X, et al. Research on basic requirements of offshore substation design [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3781-3788.
- [4] 吕安强.基于分布式光纤应变和温度传感的光纤复合海底电缆状态监测方法研究[D].北京:华北电力大学,2015.
LV A Q. Research on condition monitoring of optical fiber composite submarine power cable base on distributed strain and temperature sensing technology using optical fiber [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [5] 国防科学技术工业委员会.港工设施牺牲阳极保护设计和安装:GJB 156A—2008[S].北京:中国计划出版社,2008.
National Defense Science and Technology Industry Committee. Design and installation of sacrificial anode system for engineering structures in harbour: GJB 156A—2008 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008.
- [6] 张振,杨源,阳熹.海上风电机组辅助监控系统方案设计[J].南方能源建设,2019,6(1):49-54.
ZHANG Z, YANG Y, YANG X. Design of offshore wind farm auxiliary monitoring system [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(1): 49-54.
- [7] 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.
YANG X, YANG Y. Design of smart offshore wind farm integration monitoring system [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(1): 42-48.
- [8] 周冰.海上风电机组智能故障预警系统研究[J].南方能源建设,2018,5(2):133-137.
ZHOU B. Research on intelligent fault warning system of offshore wind turbines [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(2): 133-137.
- [9] 刘晋超.海上风电施工窗口期对施工的重要性[J].南方能源建设,2019,6(2):16-18.
LIU J C. Importance of window phase for offshore wind power construction [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(2): 16-18.
- [10] 符杨,许伟欣,刘璐洁,等.基于可及度评估的海上风机机会维修策略[J].中国电力,2016,49(8):74-80.
FU Y, XU W X, LIU L J, et al. An opportunistic maintenance strategy for offshore wind turbine based on accessibility evaluation [J]. Electric Power, 2016, 49(8): 74-80.
- [11] 汤东升.海上风电大数据分析技术及应用前景初探[J].南方能源建设,2018,5(2):65-66.
TANG D S. Preliminary study on the big data technology and its application prospect for offshore wind farm [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(2): 65-66.

作者简介:



陈亮

陈亮(通信作者)

1984-,男,湖北安陆人,电气工程专业硕士,高级工程师,从事电力系统电气二次线设计(e-mail)chenliang2@gedi.com.cn。

阳熹

1982-,男,湖南衡阳人,电气工程专业硕士,高级工程师,从事电力系统工程设计管理(e-mail)yangxi@gedi.com.cn。

杨源

1990-,男,广东湛江人,电气工程专业硕士,工程师,主要从事电力系统电气二次线设计,(e-mail)yangyuan@gedi.com.cn。

(责任编辑 李辉)