

引用格式: 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. LI Tonglin, ZENG Fulong. 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.

基于5G技术的海上风电通信系统研究

李铜林[✉], 曾甫龙

(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] 海上风电项目众多设备位于海洋之上, 交通不便导致运维检修难度大。海上设备信息的快速、无延迟、安全送达陆上显得尤为重要。针对通信系统的特殊需求, 文章提出了基于5G技术的海上风电场通信系统方案。[方法] 首先建立信号覆盖面大、可靠性强的PTN+一体化小基站, 再将5G一体化小基站和PTN网关融为一体, 通过宽带PTN接入, 实现快速、便捷的5G信号覆盖, 并采用特定带宽的5G网络, 提高通信系统的安全性。[结果] 基于PTN+一体化小基站方式的5G通信系统建成后, 实现了基于光传输的、支持多业务且利用特定带宽的IP传输。此系统可以帮助规划梳理各风机子系统, 实现风机内部全方位信号覆盖, 并将风机、海上升压站等设备运行状态及数据快速、安全的传输到陆上运维中心, 解决风机多子系统、多业务实时安全传输困难的问题。[结论] 研究的5G通信系统改善了海上风电通信, 并利用特定带宽和新兴技术, 实现了海上风电场的通信及时性和可靠性, 提高了海上风电场海上运维人员的沟通效率, 符合海上风电项目海上设备的通信需求, 有望在工程中应用推广。

关键词: 5G技术; 海上风电; 通信系统; 信号; 一体化小基站

中图分类号: TK89; TN91

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)02-0051-08

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.2.05

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Research on Offshore Wind Power Communication System Based on 5G Technology

LI Tonglin[✉], ZENG Fulong

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

Abstract: [Introduction] Numerous equipment of offshore wind power projects is located on the ocean, and the inconvenient transportation makes operation and maintenance difficult. It is extremely important for offshore equipment information to be delivered to land quickly, without delay, and safely. In view of the special needs of the communication system, a communication system scheme for offshore wind farms based on 5G technology is proposed. [Method] First, a PTN+ integrated small base station with large signal coverage and strong reliability was built, and then the 5G integrated small base station with the PTN gateway were integrated to achieve fast and convenient 5G signal coverage through broadband PTN access. The 5G network with specific bandwidth improved the security of the communication system. [Result] After the completion of the 5G communication system based on PTN+ integrated small base station, IP transmission based on optical transmission, supporting multiple services and using specific bandwidth can be realized. This system can help plan and sort out the wind turbine subsystems, realize all-round signal coverage inside the wind turbine, and can quickly and safely transmit the operation status and data of wind turbines, offshore booster stations and other equipment to the onshore operation and maintenance center. This system can solve the problem of difficult real-time secure transmission of wind turbine multi-subsystems and multi-services. [Conclusion] The 5G communication system research improves offshore wind power communication, and uses specific bandwidth and emerging technologies to realize the timeliness and reliability of communication in offshore wind farms and improve the communication efficiency of offshore operation and maintenance personnel in offshore wind farms. It meets the communication requirements of offshore equipment in offshore wind power projects and is expected to be applied in engineering.

Key words: 5G technology; offshore wind power; communication system; signal; integrated small base station

2095-8676 © 2024 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

近些年来,海上风电项目快速发展^[1-3],且逐步向远海发展。海上升压站、风机等地理位置特殊^[4-7],为了实现海上工作人员之间的实时交流、方便运维人员了解海上风电各设备运行状况等,移动通信系统在海上风电项目成为标配^[8]。但基于 4G 的网络通信,重点关注如何实现最大范围覆盖,业务偏重于语音、上网和运维管理层面^[9-11]。5G 技术的发展,不仅是带宽和流量的提升,更解决了海上风电行业过去难以攻克的难题^[12-13]。

1 海上风电场移动通信系统概述

海上风电的风机和海上升压站等众多设备均在海中^[14],风机设备分布区域较广,且海中设备远离传统移动通信的信号覆盖范围^[15-16],利用陆上传统的移动通信系统十分困难^[17],因此,建立海上风电场移动通信系统十分必要^[18-19]。

海上风电场移动通信系统主要解决以下需求:

1) 实现风电设备附近海域的大范围信号覆盖,以满足海风项目基建、运维等通信需求。

2) 实现工作、运营人员的通信,满足建设期人员的通信、办公、以及项目的人员管理、安全管理等,满足项目投产后,运营期人员的日常运维和巡检需求等。

3) 实现对运维或工作船舶的调度管理,以实现人员对人员、船舶定位、轨迹跟踪的需求。

4) 实现对设备的实时监控,以减少工作人员的检修强度,缓解海上设备检修条件恶劣,不好检修的难题。

5) 基于无线通信系统,实现无线物联网和智能化运维。

2 基于 5G 的海上风电通信系统的建设思路及目标

相对于基于 4G 的海上风电通信系统,5G 技术的主要技术优势如下:

1) 大宽带场景:相比于 4G 技术,5G 首要解决的问题是提高网络速度^[20]。

2) 低时延场景:5G 技术通过引入移动边缘计算(Mobile Edge Computing, MEC),可以大大降低延长时间,提高信息的实时性。

3) 大连接场景:是物联网计划的一个重要应用场景,4G 技术支持 1000 个连接/小区^[21-23],而 5G 技术在大连接场景下,可以大大提高连接密度^[24]。该业务场景对应着未来智能电网泛在电力物联网的概念,真正可以实现电力设备的全互联互通,实现更加信息化、智能化的管理^[25-26]。

4) 定制化的行业专网服务:由于发电厂属于基础民生项目,对人民的生活乃至国家的正常运作都极为重要,而海上风电属于电厂中的一支,保证其安全运行是重中之重,而 5G 技术可以利用定制化专用网络来进行无线通信,与其他公网业务隔离,形成逻辑专网,以完成对海上风电信息的安全快速传递^[27-29]。

2.1 基于 5G 海上风电通信系统建设的基本思路

根据海上风电项目及 5G 技术的特点,基于 5G 的海上风电通信系统规划的基本思路如下:

1) 利用 5G 的大宽带特点,采用多频率规划的新模式^[30],以实现海上风电项目及附近区域全范围、全海域覆盖。

2) 探索光纤路由保护、海域基站保护的新模式,以提高无线通信的安全性、可靠性。

3) 在国家提出物联网概念下,本方案是海上风电项目互联网、物联网技术及验证其安全性的实践。

4) 适用于海上风电项目专用频段的海风无线专用网模式的建立。

5) 平台模式的建立以及各分系统、子系统划分模式的建立。

6) 利用移动通信系统的海风运行维护新模式的探索和建立,以最大程度的利用机器、设备来代替人员的工作,以减轻海风运维的难度。

7) 风机辅助业务通信方式和手段的新模式。

8) 利用移动通信,实现对人员、船舶定位技术的研究和实践。

2.2 基于 5G 海上风电通信系统建设的建设目标

从 4G 技术到 5G 技术, 不仅是解决风机塔筒内部移动信号的覆盖及通信速度问题^[31], 而是解决海风项目中许多难以攻克的难题:

1) 海上风电项目系统繁多, 很多子分系统需要通信传输, 因此需建立一套专业的、基于光传输的、支持多业务的 IP 传输网络, 为其它辅助系统提供传输通道。

2) 实现海风设备通信全面覆盖, 通信无死角。

3) 根据海上风电项目的系统构成, 全面梳理各个子系统, 以便使 5G 通信系统涵盖海上风电的全系统, 统一管理和规划; 如为对讲指挥调度业务、远程运维等业务提供理想的网络平台, 智能头盔, 执法记录仪等在风机运维过程中发挥作用。

4) 由于 5G 技术可以分配给海上风电项目专属网段, 因此可以提高网络安全的级别, 提高海上风电项目安全运行的可靠性。

5) 5G 技术和人工智能, 为无线物联网、风机智能化运维奠定通信网络基础。

3 基于 5G 的海上风电通信系统的建设方式

5G 技术推出后, 如何利用在海上风电这个特定场景, 利用什么方式进行风机移动信号的覆盖, 是一个重要研究内容。目前海上风电项目可以应用 5G 无线通信的功能有限, 因此几百兆的带宽已经可以满足当前需求。根据三大运营商对风机现场和运营商入网的实际测试, 测试结果如表 1 所示。

表 1 几种风机移动新高覆盖方式比较表

Tab. 1 Comparison of several wind turbine moving new high coverage methods

比较项目	方式一	方式二	方式三	方式四
	PON+一体化小基站	PTN+一体化小基站	数字光纤直放站	BOOK基站
传输方式	PON	PTN	RHUB	自带光模块
测试	广核如东、广核阳江已做测试	广核阳江测试中	国电投揭阳、三峡沙扒已做测试	待验证
4G	支持	支持	支持	支持
通道带宽/M	几十	1000以上	100~200	100~200
无线信号强度	较低	较高	较高	高
覆盖面积	和设备功率及天馈线分布有关	和设备功率及天馈线分布有关	和设备功率及天馈线分布有关	和设备功率及天馈线分布有关
5G	定制产品	定制产品	支持	支持
稳定性	低	较高	较高	高
环境适应性	低	较高	较高	高
多业务适用性	可实现多业务传输, 但光纤结构不适合风机网络结构	可实现多业务传输, 适合风机网络结构	接入宏基站、只能传输移动信号, 不能实现多业务传输, 适合风机网络结构	只能传输移动信号, 不能实现多业务传输, 适合风机网络结构
可接入的运营商	电信和联通	电信和联通	电信/联通/移动	只支持采用华为设备的运营商网络
优先级	不建议采用	1	2	3

通过表 1 我们不难发现, 基于 PON+一体化小基站的方式, 由于稳定性及环境适应性较低, 不符合海上风电对于移动通信可靠稳定的要求, 因此此方式不建议使用; 而基于数字光纤直放站和 BOOK 基站 2 种方式, 都是以宏站为基础, 但这 2 种方式传输信号有限, 只能传输移动信号, 而不能实现多业务的传输, 不能满足海上风电项目的通信需求; 而基于

PTN+一体化小基站的方式, 不仅具有较高的稳定性和较强的环境适应性, 且可以实现多业务的传输, 符合海上风电项目对通信系统的功能需求。

3.1 基于 PTN+一体化小基站方式的组网说明

基于 PTN+一体化小基站方式的组网方式如图 1 所示。

由图 1 可知, 一体化基站组网接入系统包括:

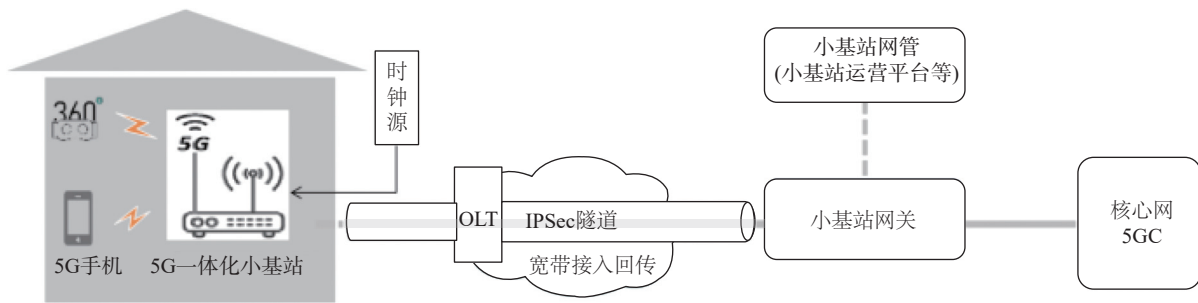


图 1 一体化基站组网接入示意图

Fig. 1 The schematic diagram of integrated base station network access

5G 一体化小基站、信号传输通道、小基站网关、小基站网管、核心网及同步时钟系统。他们各自的作用如下:

5G 一体化小基站: 高集成度微型 5G 基站系统, 可通过 PON/IPRAN/STN(电信网络传输设备) 进行 5G 数据回传到电信 5G 核心网。

小基站网关: 负责对一体化小基站数据进行安全认证, 并进行信令汇聚后接入 5G 核心网。

小基站网管: 负责对一体化小基站和小基站网关进行管理维护。

时钟同步: 采用北斗及 GPS 双对时主机, 实现对一体化基站组网的对时。

3.1.1 5G 一体化小基站

5G 一体化小基站是一种高度集成的微型基站, 内部集成 BBU、RRU 功能, 即一个“盒子”内实现整个基站功能, 具备接入 5G 的能力。将 5G 一体化小基站和 PTN 网关融为一体, 通过宽带 PTN 接入, 实现快速、便捷的 5G 信号覆盖, 以弥补 5G 室内覆盖的不足。一体化小基站的架构示意图如图 2 所示。

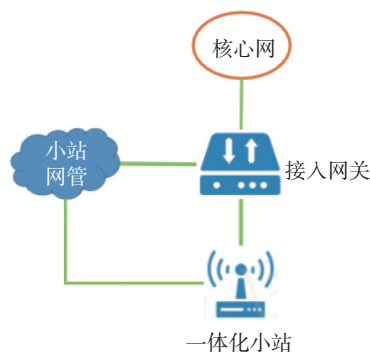


图 2 一体化小基站系统架构示意图

Fig. 2 The schematic diagram of integrated small base station system architecture

一体化小基站通过 PTN 传输网, 将数据回传至

通信机房内的小站网关, 小站网关可以确保数据安全, 再通过 PTN 传输网与 5G 核心网连接。组网方式如图 3 所示。

本方案通过 PTN 网络+一体化小站实现风机内的无线覆盖。升压站的 A 设备通过海底光缆回传陆地集控的 A 设备, 与小站网管, 再通过网管接到电信 5G 核心网。升压站与各风机, 以及各风机之间, 通过光缆进行连接, 连接升压台 A 设备与风机塔筒内的 A 设备, 各风机 A 设备串行连接。通过类似的组网方式, 实现整个风电场所有电气设备的可靠连接。海上风电场项目的最终组网方式如图 4 所示。

3.1.2 时钟同步系统

风电场的时间同步对无线通信系统十分重要, 是各设备保持时间同步, 及事后事件追溯的重要保障, 目前风电场的时间同步系统的组成如图 5 所示。

3.2 基于海上风电 5G 技术的业务范围

根据电力系统对智能电网的规划, 5G 技术可以在设备端的远程监控、信息传输的通道建设、监控后台的搭建及整个系统的安全隔离等方面有所建树。

1) 设备端的远程监控

海上风电项目设备众多, 基于 5G 的海上风电通信系统可以实现对全设备的数据采集及控制, 如无人机、摄像头、智能仪表等, 实现全设备的可靠监控。

2) 信息传递的通道建设

信息传输通道的合理建设, 是信息如实到达监控后台的前提条件, 5G 技术利用切片技术, 可以实现对不同的电力业务, 选择合适的通信通道, 以满足数据安全、可靠、事实的传递。

3) 监控平台的建设

该平台可以根据不同电力业务需求, 灵活分配

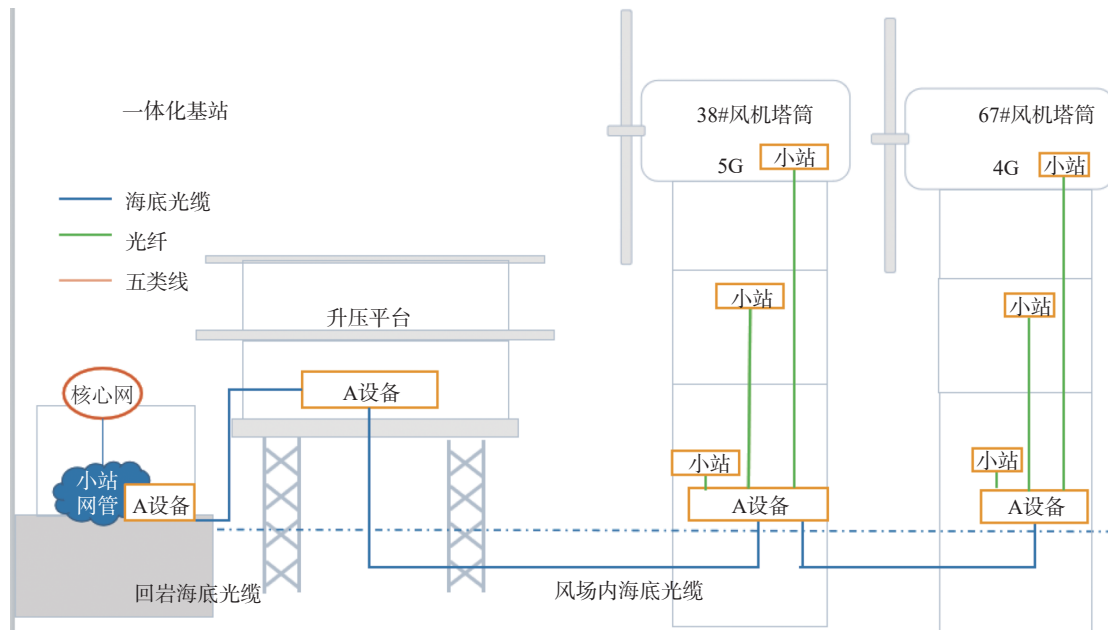


图 3 基于 PTN 传输网的一体化基站组网系统图

Fig. 3 The schematic diagram of integrated base station networking system based on PTN transmission network

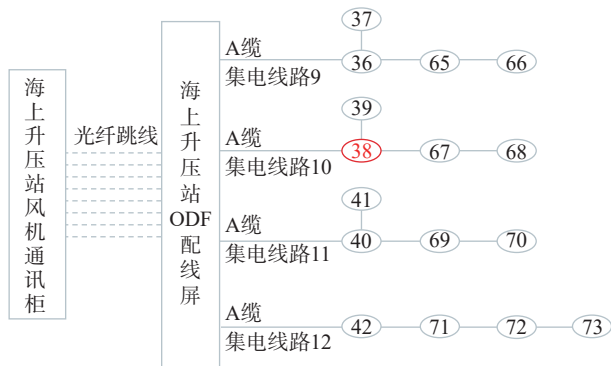


图 4 海上风电场风机无线通信组网图

Fig. 4 The schematic diagram of wireless communication network for offshore wind farm wind turbines

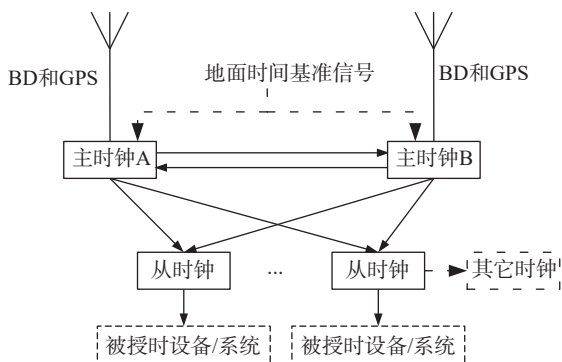


图 5 同步时钟系统的系统组成

Fig. 5 The schematic diagram of synchronous clock system's composition

通信资源, 实现高效利用。

4) 安全体系建设

5G 技术可以实现对电力行业的专网专用, 且可以对数据进行加密处理, 从而送到安全区, 且可以进行必要的隔离, 从而提高这套系统整体的安全性, 符合海上风电乃至电力行业对安全的首要需求。

4 结论

文章根据海上风电通信系统信息传递快、覆盖面积大等需求, 在基于传统 4G 通信系统的基础上, 通过对几种风机通信覆盖方式的实验与比较, 提出了一种基于 PTN+一体化小基站组网方式的 5G 通信系统, 该系统可以实现无线信号高速率、大面积的覆盖, 并设置专用频段, 保证通信系统的安全性, 有望在海上风电项目中推广使用。根据目前海上风电项目的发展现状及发展趋势, 提出了 5G 技术在设备端的远程监控、信息传输的通道建设、监控后台的搭建及整个系统的安全隔离等方面的展望, 对探索未来适用于海上风电项目的通信系统提出自己的一些设想。

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): 189-193,199. DOI: 10.7500/

- AEPS20130613018.
- 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): 189-193,199. DOI: 10.7500/AEPS20130613018.
- [2] 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. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.152761.
- 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. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.152761.
- [3] 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. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.009.
- ZHANG Z, YANG Y, YANG X. Design of offshore wind farm auxiliary monitoring system [J]. *Southern energy construction*, 2019, 6(1): 49-54. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.009.
- [4] 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. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.019.
- ZHOU B. Research on intelligent fault warning system of offshore wind turbines [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(2): 133-137. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.019.
- [5] 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. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.008.
- 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. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.008.
- [6] 国家能源局. 风电场工程 110 kV ~ 220 kV 海上升压变电站设计规范: NB/T 31115—2017 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2018. National Energy Administration. Code for 110 kV ~ 220 kV offshore substation design of wind power projects: NB/T 31115—2017 [S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [7] 黄玲玲, 曹家麟, 张开华, 等. 海上风电机组运行维护现状研究与展望 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(3): 729-738. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2016.03.017.
- HUANG L L, CAO J L, ZHANG K H, et al. Status and prospects on operation and maintenance of offshore wind turbines [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(3): 729-738. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2016.03.017.
- [8] 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.
- [9] 裴爱国, 何登富. 海上风电大数据发展研究——以广东省海上风电大数据中心建设为例 [J]. *南方能源建设*, 2018, 5(2): 19-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.003.
- PEI A G, HE D F. Research on the development of big data with offshore wind power: a case study of the construction of Guangdong offshore wind farm big data center [J]. *Southern energy construction*, 2018, 5(2): 19-23. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.003.
- [10] 郑钊颖, 冯奕敏. 广东海上风电产业发展路径与对策研究 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(4): 18-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.003.
- ZHENG Z Y, FENG Y M. Research on the development approach and policy recommendations of Guangdong offshore wind power industry [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(4): 18-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.003.
- [11] 房方, 梁栋场, 刘亚娟, 等. 海上风电智能控制与运维关键技术 [J]. *发电技术*, 2022, 43(2): 175-185. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22042.
- FANG F, LIANG D Y, LIU Y J, et al. Key technologies for intelligent control and operation and maintenance of offshore wind power [J]. *Power generation technology*, 2022, 43(2): 175-185. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.22042.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 风力发电机组 设计要求: GB/T 18451.1—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012. General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Wind turbine generator systems-design requirements: GB/T 18451.1—2012 [S]. Beijing: China Standards Press, 2012.
- [13] 崔金鹏, 张波, 田志磊, 等. 无线通信技术在海上风电工程中的应用 [J]. *信息技术与信息化*, 2022(1): 141-144. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9528.2022.01.039.
- CUI J P, ZHANG B, TIAN Z L, et al. Application of wireless communication technology in offshore wind power engineering [J]. *Information technology and informatization*, 2022(1): 141-144. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9528.2022.01.039.

- [14] 王焱, 文坤, 胡凯凯, 等. 新基建时代风电场智能运维技术的发展与展望 [J]. *控制与信息技术*, 2021(5): 6-11. DOI: 10.13889/j.issn.2096-5427.2021.05.002.
WANG D, WEN K, HU K K, et al. Development and prospect of wind power intelligent operation and maintenance technologies in the new infrastructure era [J]. *Control and information technology*, 2021(5): 6-11. DOI: 10.13889/j.issn.2096-5427.2021.05.002.
- [15] 陈晓露, 夏天. 5G 通信环境下虚拟电厂分布式能源调度方法研究 [J]. *微型电脑应用*, 2022, 38(9): 138-140. DOI: 10.3969/j.issn.1007-757X.2022.09.039.
CHEN X L, XIA T. Research on distributed energy scheduling method of virtual power plant in 5G communication environment [J]. *Microcomputer applications*, 2022, 38(9): 138-140. DOI: 10.3969/j.issn.1007-757X.2022.09.039.
- [16] 张亮亮. 通信系统在电厂工程的应用 [J]. *集成电路应用*, 2021, 38(8): 110-111. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2021.08.046.
ZHANG L L. Application of communication system in power plant engineering [J]. *Applications of IC*, 2021, 38(8): 110-111. DOI: 10.19339/j.issn.1674-2583.2021.08.046.
- [17] 孔英会, 高会生, 张铁峰, 等. 面向虚拟电厂的 5G 通信技术应用探讨 [J]. *电力信息与通信技术*, 2020, 18(8): 80-85. DOI: 10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2020.08.011.
KONG Y H, GAO H S, ZHANG T F, et al. Discussion on application of 5G communication technology for virtual power plants [J]. *Electric power information and communication technology*, 2020, 18(8): 80-85. DOI: 10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2020.08.011.
- [18] 韩新. 风电场海陆一体集控中心通信网络建设 [J]. *通信技术*, 2020, 37(4): 215-217. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2020.04.093.
HAN X. Construction of communication network of integrated control center for sea and land of wind power plant [J]. *Telecom power technology*, 2020, 37(4): 215-217. DOI: 10.19399/j.cnki.tpt.2020.04.093.
- [19] 张宪宝. 电厂电力通信系统的完善与优化 [J]. *电力安全技术*, 2019, 21(5): 50-52. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6226.2019.05.014.
ZHANG X B. Improvement and optimization of power communication system in power plant [J]. *Electric safety technology*, 2019, 21(5): 50-52. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6226.2019.05.014.
- [20] 宋彬彬, 赵延青. 基于 IEC61850 通信协议的电厂智能化监控系统 [J]. *黑龙江电力*, 2017, 39(2): 162-165, 177. DOI: 10.13625/j.cnki.hljep.2017.02.015.
SONG B B, ZHAO Y Q. Intelligent supervisory system in power plant based on IEC61850 communication protocol [J]. *Heilongjiang electric power*, 2017, 39(2): 162-165, 177. DOI: 10.13625/j.cnki.hljep.2017.02.015.
- [21] 张亮, 华荣锦, 孙寅. 浅析提高新能源电厂通信业务安全可靠性措施 [J]. *科技视界*, 2016(4): 262, 279. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2016.04.203.
ZHANG L, HUA R J, SUN Y. Analysis of the measures of improving the reliability and security of the communication service in new energy power plant [J]. *Science & technology vision*, 2016(4): 262, 279. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2016.04.203.
- [22] 田学成, 张五一, 江楠, 等. 基于 Modbus 协议新能源风电网络通信安全研究 [J]. *网络安全与数据治理*, 2022, 41(8): 61-67. DOI: 10.20044/j.csdg.2097-1788.2022.02.010.
TIAN X C, ZHANG W Y, JIANG N, et al. Research on communication boundary security of new energy wind power network based on Modbus protocol [J]. *Cyber security and data governance*, 2022, 41(8): 61-67. DOI: 10.20044/j.csdg.2097-1788.2022.02.010.
- [23] 周晓灵. 考虑变化通信时滞的风电机组试验台稳定性分析与转动惯量补偿策略 [D]. 南京: 南京理工大学, 2022. DOI: 10.27241/d.cnki.gnjgu.2021.003574.
ZHOU X J. Stability analysis and inertia compensation scheme of wind turbine test bench considering variable communication delay [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022. DOI: 10.27241/d.cnki.gnjgu.2021.003574.
- [24] 郭俊宸, 赵慧丽, 顾开祥. 基于风电机组监控安全通信的系统设计 [J]. *电子制作*, 2022, 30(4): 6-9. DOI: 10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2022.04.006.
GUO J C, ZHAO H L, GU K X. System design based on wind turbine monitoring safety communication [J]. *Practical electronics*, 2022, 30(4): 6-9. DOI: 10.16589/j.cnki.cn11-3571/tn.2022.04.006.
- [25] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 海上风力发电场设计标准: GB/T 51308—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for design of offshore wind farm: GB/T 51308—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [26] 杨源, 阳熹, 汪少勇, 等. 海上风电场智能船舶调度及人员管理系统 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(1): 47-52. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.007.

- YANG Y, YANG X, WANG S Y, et al. Scheme design of intelligent vessel dispatching and personnel management system for offshore wind farm [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(1): 47-52. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.007](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.007).
- [27] 杨源, 陈亮, 王小虎, 等. 海上风电-氢能综合能源监控系统设计 [J]. *南方能源建设*, 2020, 7(2): 35-40. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.005).
- YANG Y, CHEN L, WANG X H, et al. Design of integrated offshore wind power-hydrogen energy monitoring system [J]. *Southern energy construction*, 2020, 7(2): 35-40. DOI: [10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.005](https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.005).
- [28] 曹鹏, 熊圣新, 李建科, 等. 基于 5G 无线网络的风电机组监控系统组网研究 [J]. *船舶工程*, 2020, 42(增刊 2): 260-264. DOI: [10.13788/j.cnki.cbgc.2020.S2.050](https://doi.org/10.13788/j.cnki.cbgc.2020.S2.050).
- CAO P, XIONG S X, LI J K, et al. Research on wind turbine monitoring system networking based on 5G wireless network [J]. *Ship engineering*, 2020, 42(Suppl.2): 260-264. DOI: [10.13788/j.cnki.cbgc.2020.S2.050](https://doi.org/10.13788/j.cnki.cbgc.2020.S2.050).
- [29] 谭亮. 基于新型 5G 室分通信的远程监控系统应用 [J]. *通信与信息技术*, 2023(3): 103-105.
- TAN L. Application of remote monitoring system based on new 5G indoor communication [J]. *Communication & information technology*, 2023(3): 103-105.
- [30] 吴文斌, 杨泽辉. 5G 移动通信中的关键技术进展 [J]. *电子技术*, 2023, 52(5): 218-219.
- WU W B, YANG Z H. Progress of key technologies in 5G mobile communication [J]. *Electronic technology*, 2023, 52(5): 218-219.
- [31] 毛安家, 张丽婧, 盛倩倩. 考虑通信可靠性的 5G 基站储能聚合商优化调度研究 [J]. *电工技术学报*, 2023, 38(9): 2364-2374. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220148](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220148).
- MAO A J, ZHANG L J, SHENG Q Q. Research on optimal scheduling of 5G base station energy storage aggregators considering communication reliability [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2023, 38(9): 2364-2374. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220148](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220148).

作者简介:



李铜林 (第一作者, 通信作者)

1990-, 男, 工程师, 华中科技大学电气工程专业硕士, 主要从事发电控制保护自动化研究及设计工作 (e-mail) litonglin@gedi.com.cn。

李铜林

曾甫龙

1976-, 男, 高级工程师, 电气工程专业学士, 主要从事发电控制保护自动化研究及设计工作 (e-mail) zengfulong@gedi.com.cn。

(编辑 叶筠英)

广 告

- 《南方能源建设》封面图片：“风渔融合、多元发展”----- 封一
- 全球首台风渔一体化智能装备“明渔一号”成功收渔----- 封二
- “可控核聚变工程技术”专刊征稿启事----- P208
- “南方能源建设”微信订阅号----- 封三
- 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司----- 封四