

# 新型电力系统通信技术应用及研究综述

山博轩<sup>1</sup>, 杨郁<sup>2</sup>

<sup>1</sup>纽卡斯尔大学科学、农业和工程学院, 英国 纽卡斯尔

<sup>2</sup>石家庄供电公司, 河北 石家庄

收稿日期: 2024年2月20日; 录用日期: 2024年3月27日; 发布日期: 2024年4月7日

## 摘要

以新能源电力生产、传输、消费为主体的新型电力系统是当前电力系统发展方向, 对保障能源供应与安全, 实现“碳达峰、碳中和”目标具有深远意义。其中, 通信技术作为新型电力系统的数字智能关键技术, 直接影响电网智能业务的开展和源网荷储双向互动。本文从新型电力系统的要求出发, 综述了目前电力系统应用通信技术的性能、新技术应用方向、特殊场景通信和信息技术融合等方面内容。

## 关键词

新型电力系统, 通信技术, 5G, 边缘计算

# Overview of Application and Research of New Power System Communication Technology

Boxuan Shan<sup>1</sup>, Yu Yang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculty of Science, Agriculture & Engineering, Newcastle University, Newcastle UK

<sup>2</sup>Electricity Power Supplying Company of Shijiazhuang, Shijiazhuang Hebei

Received: Feb. 20<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 27<sup>th</sup>, 2024; published: Apr. 7<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

The new power system, which focuses on the production, transmission, and consumption of new energy electricity, is the development direction of power system development, and has profound significance in ensuring source supply and security, and achieving the goals of “carbon peak and carbon neutrality”. Communication technology, as a key digital intelligence technology for the new power system, directly affects the development of smart business in the power grid and the two-way

文章引用: 山博轩, 杨郁. 新型电力系统通信技术应用及研究综述[J]. 智能电网, 2023, 13(6): 93-101.

DOI: 10.12677/sg.2023.136009

**interaction between source, network, load, and storage. Based on the requirements of the new power system, this article summarizes the performance of communication technology utilized in power system, the development of new technologies, and the integration of communication and information technology in special scenarios.**

## Keywords

The New Power System, Communication Technology, 5G, MEC

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

新型电力系统对实现碳达峰碳中和, 贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展具有重大意义。与传统电力系统相比, 新型电力系统在技术基础、运行机理与功能形态等方面发生了深刻变化, 未来将向高比例新能源供给消纳体系、源网荷储多向协同的复杂系统、生产消费双向柔性转换的弹性系统、多能源形式融合的综合系统与数字物理深度融合的信息物理社会系统发展[1] [2]。新型电力系统中, 大量分布式电源、储能装置接入电网, 为了保障安全可控, 就需要大量元件之间实现双向互动, 对通信系统的技术性能提出了更高的要求。

要求优化形成适应新型电力系统的技术发展路线, 要求强大的通信基础支撑、强力的通信安全防线, 要求提升电力通信网性能指标, 满足面向分布式能源、源网荷储、智慧园区、新能源汽车等的大带宽通信需求, 满足配网自动化、分布式能源大规模并网的低时延通信需求, 满足电网控制类业务、分布式能源采集类业务等的高可靠通信需求[3]。

## 2. 常用通信接入技术性能概述

### 2.1. 载波通信

载波通信技术应用广泛, 具有投资小、即插即用的特点, 无需基础设施建设网络覆盖范围广阔, 信号强度不会因受墙体阻挡而出现严重衰减。但是存在通信环境较为复杂、稳定性较差的问题。

电力线阻抗造成信道衰减, 而快时变的阻抗则造成衰减计算困难。同时, 电力线也存在多径效应, 反射折射互相叠加造成失真或错误[4]。且信道存在多种噪声, 也影响了通信质量[5]。

为提高电力线通信的有效性和可靠性, 相关研究从提升电力线通信物理层和数据链路层的点对点通信质量和提高网络层性能两个方面着手。

### 2.2. 光纤通信

光纤通信具有频带高、通信容量大, 通信可靠性高、时延低, 抗电磁干扰能力强, 传输损耗低等优点, 且光纤重量轻、体积小, 具有超长的中继距离。其主要应用在核心节点以及关键业务的高速率传输方面。

光纤通信的传输速率很高, 但是不足也很明显, 主要体现在灵活性差、成本较高。石英型光纤质地脆、机械强度低、可绕行能力差, 光纤的分路、耦合和连接等操作复杂[6]。同时, 光纤网络成本高、铺

设周期长, 后期维护管理的工作量大。高分子光纤拥有更高的柔韧性, 可弯曲不易折断, 但制作工艺尚未成熟, 且衰减较大, 只适合短距离通信, 并且仍然存在建设成本高的问题。

### 2.3. 无线公网通信

应用无线公网数据传输方案, 能够快速建立通信连接, 投资小、工作量小, 调试和维护等工作全部由运营商承担。无线公网在大多数地域的通信接入率较高。

但无线公网存在租赁成本较高、信道安全性差、信道资源竞争激烈、通信质量不可控等问题。在使用无线公网进行信息的传输时, 考虑到系统的安全性和保密性, 应采取接入点名称(Access Point Name, 简称 APN)和虚拟专用网络(Virtual Private Network, 简称 VPN)等安全隔离、访问控制和认证加密举措[7]。

### 2.4. 无线专网通信

电力行业能够使用的无线频率资源包括 230 MHz 和 1800 MHz。

国家无线电委员会批准的电力专用无线通信 230 MHz 频段范围内有专用的 15 对双工频点和 10 对单工频点。LTE230 系统使用离散载波聚合技术, 通过修改 LTE 空口帧结构、射频处理等功能, 实现 230 MHz 频段多个 25 kHz 的聚合使用。1800 MHz 处于两段公众无线通信频谱之间, 共计 20 MHz 的连续频谱资源。该频段内主要是政府、民航、电力等专用网络, 频段资源具体使用存在竞争关系, 情况在各地也大不相同。国家电网在此频段主要采用 3GPPLTE 及其优化技术。

由于 230 MHz 和 1800 MHz 频段资源使用情况各地大不相同, 而智能配电网的建设需要全面覆盖, 可以初步通过频谱分析仪, 对周围环境进行电磁环境的扫频测试, 得到周围环境的 230 MHz 或 1800 MHz 频段资源的使用情况。

LTE230 系统覆盖广、成本低, LTE1800 系统频段干净可靠性强、信道带宽大且吞吐率高。LTE230 系统比较适合解决传输业务数据少, 覆盖广的问题, LTE1800 系统则适合于用户集中的热点覆盖[8]。

## 3. 新兴关键技术研究现状

### 3.1. 5G 通信

5G 通信具有高速率、高容量、高可靠性、低时延、低能耗的特点, 符合电力系统的通信需求, 可作为电力物联网的网络接入层推荐技术。

在电力系统中, eMBB 业务发挥 5G 网络通信速率优势, 应用于电力智慧巡检等业务。mMTC 业务发挥 5G 技术高频谱效率和超宽频带优势, 应用于源-网-荷-储-充协同互动中的精准负荷控制、设备状态在线监测, 实现海量数据采集, 满足实时通信需求。uRLLC 业务发挥 5G 技术通信稳定优势, 应用于分布式配电自动化控制、电动汽车与智能驾驶、车联网等[9]。

#### 3.1.1. 5G 通信主要应用

5G 技术特点与“源-网-荷-储”业务的广域、可靠、实时通信/数据处理需求十分吻合, 当前已有相当数量的应用和研究成果。

应用方面以 5G+ 应用场景的方式, 通过网络切片、边缘计算等方面探索 5G 与电力业务的融合应用。国网青岛供电公司、中国电信和华为定制化部署了一套用于电力行业具备边缘计算功能的 5G 试验网络, 对 5G 在控制类业务中的应用做了探索, 在配电自动化业务中, 实现了将非故障区段停电时间缩短至秒级[10]。国网浙江省电力有限公司基于 5G 电力虚拟专网, 根据承载电力不同网络分区业务的情况, 分为 5G 硬切片应用模式和 5G 软切片应用模式。硬切片用于承载生产控制类业务, 软切片用于承载管理信息类和其他业务。利用基于 5G 通信技术的配电自动化开关, 实现了高弹性的数据传输、可靠的“三遥”

功能、高精度的智能感知能力、高准确率的故障研判与隔离[11]。国网信息通信产业集团与国网上海市电力公司依托自主研发的电力 5G 通信终端及运营商 5G 网络切片, 构建面向用电负荷管理系统接入的无线网络架构, 充分验证 5G 承载负荷控制业务的组网方案和安全接入能力。

### 3.1.2. 5G 通信相关研究

1) 5G 通信性能计算与分析, 评估其满足电力业务特殊需求的可行性。

针对电力业务要求通信通道的指标要求, 对 5G 网络切片技术和性能进行分析, 并论证 5G 通信在速率、时延、可靠性和安全性等方面, 能否完全满足智能电网业务需求。文献 12 针对配电网差动保护对通道的要求, 通过分析确认在最严重的情况下 5G 切片技术也可以满足业务需求[12]。文献 13 对差动保护、精准负荷调控与视频监控三个典型业务端到端时延进行了准确分析, 表明 5G 电力切片可以满足业务的时延需求, 为后续研究提供了指标参考[13]。

2) 网络切片相关实践应用研究

一是网络切片与资源分配。

网络切片是在同一张 5G 网络内满足不同业务差异化的需求的 5G 网络关键技术。当场景内用户较资源过多时无法满足所有用户需求, 资源分配算法可以在切片内部或公共资源池根据业务的需求及实施状态进一步对无线资源进行分配。文献 13 构建了一种切片动态资源预留算法, 在核心网切片构建了用户面路由模型, 在 5G-air-simulator 软件上实现并验证了模型有效性。同时, 在模型基础上提出了一种时延速率保障加权算法。量化并引入了时延、速率保障程度因子, 保障了电力业务的时延、丢包率与速率, 对外部负载具有较强隔离作用。

为了确保每个切片的资源满足对应电网业务的实际需求, 以及对电力网络状态和性能进行综合评估, 有必要进行 5G 网络流量分析。文献 14 设计了一个 5G 端到端网络切片管理系统, 利用软件定义网络控制器实现网络资源的定制化分配。针对切片系统的流量分析问题, 提出了一种基于 CNN-GRU (Convolutional Neural Networks-Gate Recurrent Unit)混合神经网络的预测方法。实验表明, 对比传统算法, 该方法在误差控制和训练速度方面表现得更好[14]。

二是网络切片与边缘计算。

MEC 边缘计算(Mobile Edge Computing)与 MCC 移动云计算(Mobile Cloud Computing)相比, 可以将无线通信和移动计算无缝融合, 并将原来云计算中心所拥有的任务计算和数据存储能力下沉到用户侧, 大幅降低延迟和移动资源的消耗, 解决实现 5G 应用场景的关键挑战。

基于 MEC 的资源分配策略是当前的重点研究内容。

与传统的基于计算资源整合的中央云计算相比, MEC 能够使用的资源较为匮乏。资源分配主要包括移动设备与 MEC 服务器进行通信时所需要的通信资源和 MEC 服务器所拥有的计算资源。对于通信资源的分配通常考虑移动设备发送功率、不同信道状态的子信道、带宽资源等, 研究主要集中在最小化数据传输能耗以及最小化数据传输时延上, 通过优化信道选择及功率分配来达成目标[15]。对于 MEC 服务器上的计算资源, 则要考虑数据处理任务在用户侧和 MEC 服务器侧处理时间对分配的影响, 通过对数据任务卸载策略进行优化, 来达到对 MEC 服务器的计算资源合理分配的目标。文献 16 构造了一个混合整数非线性最佳化问题, 使任务完成时间最小化, 并提出了任务卸载决策和资源分配的联合优化策略。仿真结果表明, 该算法能够在资源有限的情况下最小化电子终端的任务延迟, 提高终端用户的用户体验[16]。

在实际场景中, 不同的资源之间会产生耦合, 因此通常需要联合考虑通信资源和计算资源以构建合理的资源分配策略, 对不同的优化目标进行折衷。文献 17 研究了多电力设备单 MEC 服务器组成的信息交互系统, 针对信息交互系统的数据传输时延和计算时延问题, 以 MEC 服务器和电力设备的任务计算时

间为影响因子,以数据传输和计算时延最小化为目标,提出了基于 MEC 的任务卸载及传输策略联合优化方法,仿真结果表明,与任务均匀分配方案相比,所提方案显著降低了数据传输及计算时延[17]。

三是物理层技术研究。

5G 性能增强技术范围非常广泛,包括毫米波、大规模 MIMO,全双工 D2D,超密集异构等。这些技术相对更为底层,电力系统很少参与创新与设计。现有 5G 标准中信号与系统设计主要面向民用需求,无法完全满足时延和可靠性更为苛刻的电力控制场景。文献 18 从信号处理出发,在 5G 标准基础上,将子载波跳频技术(FH)应用于可配置正交频分复用(OFDM)系统中,形成 OFDM/FH 传输新体制,同时将 OFDM/FH 信号传输与 5G/6G 微时隙(mini-slot)调度策略融合,以 mini-slot 为基本单位的资源调度和重传机制能有效降低时延[18]。

### 3.2. 卫星通信

为实现卫星通信的深化应用和更广泛民用,相关研究集中于优化信道资源的优化分配、通信容量的提升等方面。文献 19 基于信道资源的有限性,以低轨卫星通信就为研究重点,提出通信信道分配策略[19]。文献 20 研究卫星/太阳能网状综合网络(SMIN),它由通信卫星、地面站(ESs)和太阳能网状路由器(MRs)组成。SMIN 可以通过卫星连接到外部网络,并通过无线网状网路(WMN)在大范围内提供通信服务。通过优化 ESs 的数量及其部署 WMN 的通信流量最大化[20]。为了有效扩大容量、提高传输能力和频谱利用率,文献 21 建立多状态陆地移动卫星信道模型,在此基础深入研究包括天线、信道终端高度角等对信道容量影响的参数,通过仿真得到若干结论[21]。

低轨卫星互联网的不断发展建设,使得卫星互联网垂直行业的应用研究成为关注焦点。近年来,伴随中国特高压电网的快速发展,迫切需要大范围、低成本、全天候的监测手段,以及现场数据大空间远程传送能力。因此,充分发挥低轨卫星网络大带宽、大容量、广覆盖、低时延的空间信息网络优势,构建电网全范围、全时相、全状态感知和高可用、大容量的天地一体化融合电力通信网络,成为卫星互联网在电网业务领域应用拓展的重要方向。在电力通信应用实践方面,开展电力终端设备与低轨宽带卫星网络联通方案设计和测试,重点验证在无地面公网环境下低轨网络搭载电力业务的科学性、可行性和实用性。针对电网建设、电网运行和应急救援 3 个核心业务,提出基于低轨宽带卫星互联网的电网业务应用方案,给出低轨卫星网络的系统组成和 workflows,以及“动中通”卫星终端的架构设计。测试验证可为电网业务提供远距离、低时延、大容量、高可用的数据传输能力支撑[22]。

文献 23 构建电力应用场景下卫星与地面站组网模型,研究设计了一种基于社团发现的卫星与地面站组网方法,并对该组网算法进行仿真验证,结果显示可以有效提高卫星天线波束的负载均衡性能。同时,在电力应用场景下高效利用卫星通信资源基础上,研究设计了一种基于改进熵权法与灰色关联算法结合的高、低轨卫星网络切换方法,在保证业务服务质量的提前下减少了不必要的切换次数,为建设高效智能电网和全面推进能源互联网战略创造有利条件[23]。

### 3.3. 北斗应用

北斗卫星导航系统(简称北斗系统,英文缩写为 BDS)是我国自主研发的全球卫星导航定位与通信系统。2012 年底,覆盖亚太地区的导航定位、授时与短报文通信功能开始正式投入运行;2018 年底,覆盖范围由亚太地区扩展至全球,北斗系统开始迈入全球时代。

北斗应用可以在空间定位、时间、通信、安全性四个方面满足电力系统应用需求。

空间定位方面,结合 GIS 系统,导航卫星系统可提供电力设施(如输电线路,杆塔)的位移状况,实现远程监测。时间信号和同步方面,理论上北斗授时装置能够保证各地的时间信号与协调世界时的相对

误差小于 20~100 ns, 实现各电站之间的同步。通信需求方面, 北斗的短报文通信功能具有用户机与用户机、用户机与地面控制中心之间双向数字报文通信功能, 可以为电力系统在通信薄弱的情况下提供及时有效的信息传输功能。安全性需求方面, 相比 GPS、伽利略等导航系统, 北斗卫星导航系统自主可控, 信息安全程度高, 可保障系统安全[24]。

2019 年开始, 国家电网公司建设了电力北斗精准时空服务网、电力北斗时频服务网和北斗时空智能综合服务平台, 简称“两网一平台”[25]。北斗在电力系统中的典型应用, 包括电网故障诊断、电网资源信息采集与更新、智能电网中的高精度授时等。

在北斗应用方面, 已有一定实践成果。如一种基于北斗卫星通信导航的电力应急抢修指挥系统。硬件以北斗卫星通信导航平台作为核心, 根据模块化的设计理念, 设计故障定位与最佳路径规划的软件程序, 针对不同等级应急状态安排相应的抢修策略, 完成电力应急抢修的指挥, 抢修时间短、故障定位效果好、失负荷量小[26]。如基于北斗的光缆定位及故障监测系统, 深度融合北斗二代的定位系统和短报文功能, 提升了电力通信光缆运维的国产化、智能化和信息化水平[27]。在自然灾害频发的地域, 北斗短报文通信是一种有效的应急通信方案。在地理位置偏远且没有公网覆盖的地区, 可以采用短报文实现用电信息采集[28]。文献 4 设计并研制了一种基于北斗短报文通信的用电信息采集系统。在集中器端和主站端, 同时部署北斗短报文通信一体机, 在不改变已投运相关电力设备和系统的情况下, 以低廉的北斗通信链路为信道, 完成对偏远山区用电信息采集。

## 4. 特殊通信场景

### 4.1. 应急通信

全球气候变化导致小范围极端自然灾害频发, 这对电力系统安全运行构成了很大的威胁。新型电力系统下, 电力物理层和信息层的耦合关系愈加紧密。正常运行时, 信息系统和物理系统之间的强耦合关系可以保障电力系统的安全可靠运行。但是在极端灾害下, 信息物理深度耦合特性会增加系统的脆弱度, 给配电系统带来更加复杂的问题[29]。

依靠地面基础设施的通信技术无法满足灾害情况下应急通信的特殊需求, 无线应急通信和卫星通信能更好的解决这个问题。

#### 1) 基于无人机的无线应急通信

在基于无人机的无线通信网络部署方面, 已有大量研究提出了空中移动基站的快速部署和调度方案。其应用主要是解决受灾区域人员的公共通信问题。电力应急通信的重点任务在于恢复电网感知。文献 32 提出了一个两阶段的数学框架, 解决电力系统故障评估的无人机灾前部署和灾后的路径规划问题。在第一阶段进行损害评估, 确定预测极端天气事件到达的最佳无人机位置, 必要时进行位置调整。第二阶段扫描电网路径, 以最小化无人机的运行成本和最终损伤评估完成时间[30]。文献[31]研究了无人机在电网故障定位方面的应用, 在常规通信非覆盖区域, 使用基于无人机的故障指示器发送故障信号, 并找出最佳无人机数量及位置[31]。

综合考虑无人机的通信恢复能力和电网感知能力, 文献 34 发挥无人机在配电自动化的通信系统恢复方面的潜力, 综合考虑配电网信息层与物理层的恢复决策, 提出了一种基于无人机应急通信的两阶段配电网信息物理协同恢复策略。第一阶段解决无人机基站部署选址问题, 第二个阶段求解无人机通信路径规划以及配电网负荷协同恢复优化模型, 求解生成无人机的最优路径、配电网负荷恢复最优顺序, 方法的有效性已得到验证[32]。

#### 2) 卫星通信

目前, 国家电网公司已部署高轨卫星设备, 如移动车载卫星 VSAT 系统、卫星电话等。文献 22 中论

述了应急救援业务的卫星通信方案。通过低轨卫星网络的连续覆盖,以及在应急现场部署的车载、无人机载“动中通”卫星终端以及单兵小站等,提供电力内外网接入、灾情遥感监测、灾情评估/预警等能力,快速构建直连应急指挥中心的可靠卫星宽带回传通道,实现“三断”区域应急抢修、重大救援活动通信保障;通过在长航时无人机通信平台上部署专网基站设备,提供现场大规模用户终端的快速接入能力支撑,实现灾难环境下的高效、快速组网和低时延应急通信网络部署,提升灾难应对反应速度。

## 4.2. 量子保密通信

随着能源互联网的建设,配用电网络的业务规模和终端数量越来越大,海量信息的采集频次和交互频率也越来越高,分布式能源、负荷聚合商、电动汽车、虚拟电厂等多元主体的混合接入,新业态的产生推动配用电网络更加开放,同时也带来了数据传输安全的严峻挑战,采用量子保密通信技术保障配用电业务安全成为一种选择。

与经典密码通信不同,量子保密通信的安全性不是基于计算的复杂性,而是源于量子物理学的基本特性,其安全性由海森堡测不准定理和不可克隆原理所保障。这使得量子保密通信具有通信无条件安全性及对窃听的可检测性,这两个特征在经典通信几乎无法实现。

在量子保密通信在电力系统中已开展了相关的应用与研究。针对光纤为主的电力量子保密通信网络难以支撑源网荷储互动需求,以及现有量子加密方式应用接入困难的问题,文献 35 设计了星地一体电力量子保密通信网络架构,研究了星地量子密钥广域分发、可信中继、统一管控和灵活应用技术,并在北京和福建之间构建了星地一体电力量子保密通信网络,基于广域应急指挥视频会商业务进行了应用验证[33]。针对配电业务复杂性和能源互联网末端海量终端接入面临的网络安全需求,文献 36 提出了一种适用于配用电业务场景的量子密钥分发网络架构,并通过分析配用电业务的不同场景,灵活运用量子密钥在线更新和离线更新的方式,达成了安全和成本的平衡。测试结果表明提出方法满足配用电业务的运营需求,可有效全面提升基于中频带电力线宽带通信的配用电业务信息安全防护能力[34]。文献 37 分析现有电力通信网络面临的安全问题,特别是配电环节安全问题,提出基于 CVQKD 连续变量量子密钥分发技术的量子保密通信技术在配网场景的解决方案,大力提升了架空线路运行和故障处理效率,提高了配网架空线路供电可靠性[35]。

## 5. 结语

电力通信技术是新型电力系统中,乃至数智化电网建设过程中的关键技术要素,对整个电力系统的安全、可靠、绿色、高效运行有着重大的意义。在信息通信和电子技术不断更新的背景下,与人工智能、边缘计算等技术开展融合应用,电力通信技术将不断向更大容量、更广覆盖、更低时延、更高安全性等方向发展。

## 参考文献

- [1] 《新型电力系统发展蓝皮书》编写组. 新型电力系统发展蓝皮书[M]. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [2] 刘吉臻, 王庆华, 胡阳, 等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术[J]. 新型电力系统, 2023, 1(1): 49-65.
- [3] 欧清海, 王盛鑫, 余蕊, 等. 面向新型电力系统的电力通信网需求及应用场景探索[J]. 供用电, 2022, 39(2): 2-8, 21.
- [4] 陈玉卿. 基于北斗短报文通信的用电信息采集系统研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2020.
- [5] Mlynek, P., Fujdiak, R., Misurec, J., et al. (2016) Experimental Measurements of Noise Influence on Narrowband Power Line Communication. *Proceedings of the International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control System and Workshops*, Lisbon, 18-20 October 2016, 94-100. <https://doi.org/10.1109/ICUMT.2016.7765339>

- [6] Kikuchi, K. (2016) Fundamentals of Coherent Optical Fiber Communications. *Journal of Lightwave Technology*, **34**, 157-179. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2463719>
- [7] 任启. 无线通信技术在电力通信中的应用[J]. 新技术应用与实践, 2018, 12(10): 157-158.
- [8] 肖振锋, 伍晓平, 任浪, 等. 电力无线专网混合组网的测试与实现[J]. 电气应用, 2018, 37(23): 12-16.
- [9] 任晓东, 徐敬国. 基于 5G 移动通信技术的电力通信系统研究[J]. 光源与照明, 2023(11): 69-71.
- [10] 朱从亮. 基于 5G 电力物联网的低压智能台区管理平台[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2022. <https://doi.org/10.27461/d.cnki.gzjdx.2022.000145>
- [11] 阚拓, 赵天剑, 马琳娜, 等. 5G 网络切片技术在电力通信中的研究与应用[J]. 电工技术, 2023(13): 214-217. <https://doi.org/10.19768/j.cnki.dgjs.2023.13.058>
- [12] 高维良, 高厚磊, 徐彬, 等. 5G 用作配电网差动保护通道的可行性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 1-7. <https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.201209>
- [13] 任腾龙. 面向电力通信的 5G 网络切片资源管理算法研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [14] 郭娘容. 基于网络流量分析的 5G 切片管理系统研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2023. <https://doi.org/10.27029/d.cnki.ggdgu.2022.001448>
- [15] 毛莺池, 周彤, 刘鹏飞. 基于延迟接受的多用户任务卸载策略[J]. 计算机科学, 2021, 48(1): 49-57.
- [16] Dou, H., Xu, Z., Jiang, X., Cui, J. and Zheng, B. (2021) Mobile Edge Computing Based Task Offloading and Resource Allocation in Smart Grid. 2021 13th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Changsha, 20-22 October 2021, 1-5. <https://doi.org/10.1109/WCSP52459.2021.9613160>
- [17] 巩龙豪. 基于移动边缘计算的智能电网传输与计算时延优化研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2023. <https://doi.org/10.27251/d.cnki.gnjdc.2022.000673>
- [18] 曾琦, 刘友波, 李梓玮, 等. 支持新型电力系统的 5G/6G 高可靠低时延电力物联网通信设计与分析[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-10. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.230647>, 2024-02-10.
- [19] 党大鹏. 低轨卫星通信信道分配策略探析[J]. 通讯世界, 2019, 26(9): 203-204.
- [20] Koseki, S., Nishiyama, H., Kato, N., Jeong, B. and Toyoshima, M. (2015) Earth Stations Deployment for Maximizing System throughput in Satellite/Solar-Powered Mesh Integrated Network. 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC), London, 8-12 June 2015, 832-837. <https://doi.org/10.1109/ICC.2015.7248425>
- [21] 陈栋. 基于 MIMO 空时编码和信道容量在现代卫星系统中的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2022. <https://doi.org/10.27206/d.cnki.gsgsu.2021.001383>
- [22] 朱亮, 戚少博, 杨波, 等. 低轨宽带卫星互联网承载电网业务应用[J]. 天地一体化信息网络, 2023, 4(2): 103-113.
- [23] 朱秋莎. 面向电力应用的高低轨卫星混合组网通信研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2022. <https://doi.org/10.27140/d.cnki.ghbbu.2021.000308>
- [24] 薛安成, 罗旷, 徐飞阳, 等. 北斗在新能源电力系统的应用[J]. 卫星应用, 2019(7): 28-34.
- [25] 李静, 赵光, 宋新艳, 等. 电力北斗应用及商业化运营展望[J]. 江西科学, 2022, 40(6): 1166-1171, 1210. <https://doi.org/10.13990/j.issn1001-3679.2022.06.023>
- [26] 高正浩, 李航峰, 何沛林, 等. 基于北斗卫星通信导航的电力应急抢修指挥系统设计[J]. 现代电子技术, 2024, 47(4): 53-58. <https://doi.org/10.16652/j.issn.1004-373x.2024.04.011>
- [27] 高云嵩, 陈健. 基于北斗的光缆定位及故障监测系统研究[J]. 机电信息, 2023(21): 42-44. <https://doi.org/10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2023.21.012>
- [28] 王娟, 朗珍白桑, 刘雪强, 等. 基于北斗短报文通信的用电信息采集系统[J]. 光源与照明, 2021(4): 30-31.
- [29] Liu, X., Chen, B., Chen, C. and Jin, D. (2020) Electric Power Grid Resilience with Interdependencies between Power and Communication Networks—A Review. *IET Smart Grid*, **3**, 182-193. <https://doi.org/10.1049/iet-stg.2019.0202>
- [30] Lim, G.J., Kim, S., Cho, J., Gong, Y. and Khodaei, A. (2018) Multi-UAV Pre-Positioning and Routing for Power Network Damage Assessment. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **9**, 3643-3651. <https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2637408>
- [31] Derakhshandeh, S.Y., Mobini, Z., Mohammadi, M. and Nikbakht, M. (2019) UAV-Assisted Fault Location in Power Distribution Systems: An Optimization Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 4628-4636. <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2865977>
- [32] 刘瑞环, 陈晨, 叶志刚, 等. 基于无人机应急通信的配电网灾后信息物理协同恢复策略[J]. 电网技术, 2023,



---

47(3): 1218-1230. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.0913>

- [33] 冯宝, 刘金锁, 牟霄寒, 等. 星地一体电力量子保密通信关键技术研究及应用[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19(11): 1-8. <https://doi.org/10.16543/j.2095-641x.electric.power.ict.2021.11.001>
- [34] 赵丙镇. 配用电业务用中频带电力线宽带通信技术及其安全性研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2023. <https://doi.org/10.27379/d.cnki.gwhdu.2021.001022>
- [35] 项海波, 鲍聪颖, 费武, 等. 基于量子保密通信的电力系统技术研究与应用[J]. 长江信息通信, 2023, 36(3): 132-135.