

基于 IoT - G 230 MHz 电力无线通信关键技术分析

赵晓坤, 高 洁, 郭冰洁, 曾 建

(国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:随着电网技术的发展,传统电网逐步迈向能源互联网,电力无线专网能全联接智能电网,已逐渐成为能源互联网的基础。首先,分析了 IoT - G 230 MHz 关键性能指标与国家电网公司核心业务的匹配度;然后,对 IoT - G 230 MHz 电力无线通信关键技术进行分析,总结了 IoT - G 230 MHz 电力无线通信技术的九大技术优势;最后,分别对 IoT - G 230 MHz 现阶段的应用情况及未来发展部署进行了介绍。通过文中的分析介绍,可以得出 IoT - G 230 MHz 关键性能指标与国家电网公司核心业务具有高度匹配性,为 IoT - G 230 MHz 电力无线通信技术的发展方向提供了建议。

关键词:智能电网;IoT - G 230 MHz;电力无线通信;无线专网

中图分类号:TN 929.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2021)06 - 58 - 05

DOI:12.16527/j.issn.1003 - 6954.20210612

Key Technology Analysis of 230 MHz Power Wireless Communication Based on IoT-G

Zhao Xiaokun, Gao Jie, Guo Bingjie, Zeng Jian

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:With the development of power grid technology, traditional power grid is gradually moving towards energy Internet, and wireless private power network can fully connect to smart power grid, which has gradually become the foundation of energy Internet. Firstly, the matching degree between the IoT-G 230 MHz key performance index and the core business of State Grid is analyzed. And then the key technologies of IOT-G 230 MHz power wireless communication are analyzed, and the nine technical advantages of IoT-G 230 MHz power wireless communication technology are summarized. Finally, the current application and future development of IoT-G 230 MHz are respectively introduced. Through the analysis and introduction, it can be obtained that the key performance index of IoT-G 230 MHz is highly matched with the core business of State Grid, which provides suggestions for the development direction of IoT-G 230 MHz power wireless communication technology.

Key words:smart grid; IoT-G 230 MHz; power wireless communication; wireless private network

0 引 言

电网是国家能源结构发展中十分重要的组成部分,社会经济发展以及日常生活的方方面面都离不开电网的支撑。随着电网技术和信息通信技术的快速发展以及中国特色国际领先的能源互联网企业目标的提出,为电网的发展提供了新的方向。随着智能电网的兴起,电网的发、输、变、配和用环节都需要全面升级。其中配电网作为智能电网的“最后一公里”,对实现智能电网和能源互联网战略目标起着关键作用^[1-2]。

当前配电网的通信技术主要采用包括光纤、电力线载波、无线公网和无线专网等^[3-4]。光纤通信难以适应配电网节点量大、覆盖面广、复杂多元的业务特点^[1]。电力线载波通信传输速率和稳定性差,传输通信量低,无法承载部分大流量业务^[5]。无线公网通信存在信号覆盖盲区,时延性高,系统漏洞多,易遭受攻击,承载能力差,且其运营成本较高,难以满足智能电网发展的需求^[6]。随着“新能源、新业务”不断接入电网中,输电、变电控制向末端拓展,控制点数量成百万量级,电力无线专网由于是电力业务专用,能够满足电力系统的电力业务对通信高质量的需求,提供可靠的带宽速率、安全隔离和良

好的信号覆盖^[7]。

电力无线专网有 230 MHz 和 1800 MHz 两种频段,分别有适合承载的智能配电网电力业务^[6]。其中 LTE - 1800 MHz 系统存在网络覆盖小、信号穿透性较差和信号较弱的缺点,且部分地市的相应频点资源已被其他行业占用,对电力无线专网的建设造成一定阻碍^[8]。2018 年 9 月,工信部下发《关于调整 223 ~ 235 MHz 频段无线数据传输系统频率使用规划的通知》,明确了 230 MHz 频段 7 MHz 带宽用于电力等行业无线数据传输和能源互联网应用^[9]。同时明确规定工信部发布自电力行业增加 230 MHz 的带宽之日起,不再受理电力 1800 MHz 频率的申请。

因此,下面选择对 IoT - G 230 MHz 电力无线通信关键技术进行分析,分别从 IoT - G 230 MHz 关键性能指标与国家电网公司(以下简称国网)核心业务的匹配度、IoT - G 230 MHz 电力无线通信关键技术以及 IoT - G 230 MHz 电力无线通信技术的未来发展部署进行分析,为促进 IoT - G 230 MHz 电力无线通信技术的发展提供参考。

1 IoT - G 230 MHz 关键性能指标与国网核心业务需求匹配度

国网核心业务中基础业务的需求分析如表 1 所示,基础业务主要针对日常中有关生产类业务。从表中可以得出国网基础业务对速率需求为 10 ~ 100 kb/s;时延需求为小于 50 ms;容量需求为数千至数万每平方千米,有低功耗需求;安全需求为高;网络需求为广域连续覆盖。

表 1 国网基础业务需求分析

基础业务	时延/s	速率带宽/(kb·s ⁻¹)	场景
配电自动化	2.0	19.2	10 kV 配电站点
用电信息采集	2.5	2.5 ~ 10	公用变压器/专用变压器/居民楼
精控业务	0.02 ~ 0.05	48.1 ~ 1 157.12	10 kV 及以上电压站点
电能充电桩	2.5	>4.0	
分布式能源	2.5	4.0	光伏/风电等

国网核心业务中扩展业务的需求分析如表 2 所示,扩展业务主要针对日常中有关信息化类业务。从表中可以得出:国网扩展业务对速率需求为 2 ~ 4096 kb/s;时延需求为几百毫秒至秒级;容量需求为几十至上百每平方千米;安全需求为中高;网络需

求为局域为主。

表 2 国网扩展业务需求分析

扩展业务	时延/ms	速率带宽/(kb·s ⁻¹)	场景
输变电状态监测	<300	>2048	输电塔/变电站
配电所综合监测	<300	20 ~ 2048	环网柜/配电室等
输配变机器人巡检	<120	>2048	电力线/杆塔/变电站等巡检
电能质量监测	4000	>19.2	台区
智能家居	<1000	2.4 ~ 4096	用户家庭
开闭所环境监测	<300	20 ~ 2048	开闭所
移动作业	<300	8 ~ 2048	线路走廊/配电站点

IoT - G 230 MHz 关键性能指标如图 1 所示。对比表 1 和表 2 对国网核心业务的需求分析,IoT - G 230 MHz 支持 7 M 全带宽需求,采用 10 ms 短帧结构以及低时延免调度算法,支持 20 ms 最低空口时延,支持 4.5G D2D 100 dB 深度覆盖,可达 20% 覆盖领先以及 0.15 W 最低静态功耗。综上, IoT - G 230 MHz 关键性能指标完全满足国网核心业务需求。

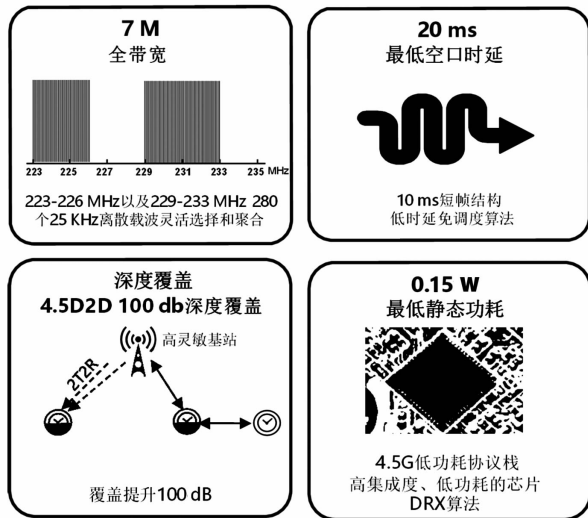


图 1 IoT - G 230 MHz 关键性能指标

2 IoT - G 230 MHz 电力无线通信关键技术分析

IoT - G 230 MHz 通信技术基于第三代合作伙伴计划的 4.5G 技术,面向物联网应用场景,适配电网业务和频谱特点,定义了标准 3.75 kHz 子载波间隔,有效利用窄带和离散频谱,符合电力无线通信接入要求,包括配电自动化“三遥”和控制类等低时延、高可靠业务^[10]。IoT - G 230 MHz 电力无线通

信系统通过 4.5G 技术重耕 230 MHz 频谱,并支持向 5G 平滑演进,满足未来新兴业务需求。

IoT - G 230 MHz 电力无线通信系统除了采用标准 TD - LTE 的 OFDMA、多进多出、小区间干扰抑制、自适应调制与编码、混合自动重传请求 (hybrid automatic repeat request, HARQ)、功率控制等多种技术外,还根据电力业务和频谱特点引入离散载波聚合、低时延、控制信道效率提升、跳频抗干扰等关键技术。

2.1 IoT - G 230 MHz 离散载波聚合技术

IoT - G 230 MHz 离散载波聚合技术将经过信道编码和交织后的信息比特均分为多个子块,每个子块分配至一个载波上发送,从而通过增加承载业务数据的载波数提升单位时间内发送的数据量,显著提高传输速率。接收侧只需将多个载波上的接收信号解调得到的多个软比特信息子块级联为一个完整的码块,然后经过解交织和信道译码,即可获得完整的业务数据包。相比于长期演进技术 (long term evolution, LTE) 系统复杂的层二载波聚合技术, IoT - G 230 MHz 采用的物理层离散载波聚合技术显著降低了发送端和接收端的处理复杂度,匹配 230 MHz 频段窄带载波聚合的特点,有助于提高设备可支持的聚合载波数目。IoT - G 230 MHz 离散载波聚合技术如图 2 所示。

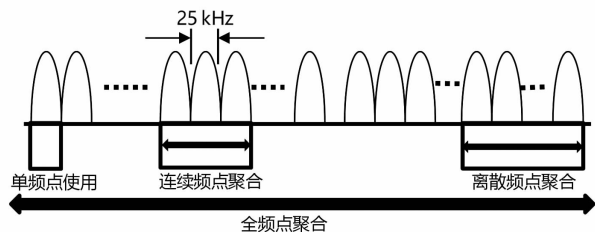


图 2 离散载波聚合技术

2.2 低时延技术

IoT - G 230 MHz 电力无线通信系统通过帧结构设计、无调度传输、快速反馈模式等关键技术,满足毫秒级控制业务的低时延需求。

1) 帧结构设计

IoT - G 230 MHz 电力无线通信系统空中接口物理层帧长设计为 10 ms,使得业务数据等待可承载其传输的下行资源的时延不超过 10 ms,等待时延和传播时延之和不超过 15 ms。即使考虑业务数据因信道小尺度衰落较严重而重传一次,整体通信时延也不超过 30 ms,可以满足毫秒级控制类业务的时延要求。IoT - G 230 MHz 短帧结构设计如图 3 所示。

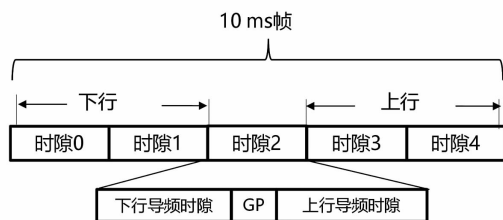


图 3 短帧结构设计

2) 无调度传输

当业务数据传输需通过物理下行控制信道进行调度时,业务数据在空中接口的整体传输时延包含传输资源等待时延、下行控制信息传输时延、下行控制信息处理时延、业务数据传输时延以及业务数据接收状态反馈时延 5 个部分。传输资源等待时延最恶劣情况可接近 10 ms。为满足毫秒级控制类业务低时延要求,需尽可能节省其余四项时延。为此, IoT - G 230 MHz 电力无线通信系统引入了免调度传输技术,如图 4 所示。

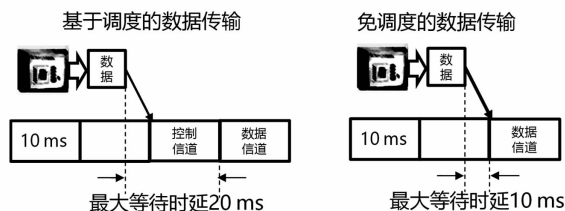


图 4 免调度算法技术

无调度传输技术中,业务数据传输无需经过物理下行控制信道调度,基站或终端可根据网络配置的时频资源直接将业务数据信号发送至空中。基于该技术,可节省下行控制信息传输时延和下行控制信息处理时延,使空中接口整体传输时延减少 10 ms 以上,为满足毫秒级控制类业务低时延要求提供保障。

3) 快速反馈技术

为减少业务数据接收状态反馈时延, IoT - G 230 MHz 电力无线通信系统还支持快速反馈技术。当业务数据传输配置为快速反馈技术时,业务数据及其反馈信息均承载于截短的时频资源块传输,从而在业务数据及其反馈信息之间预留足够的处理时延,使接收端可在当前帧即可反馈业务数据是否正确接收,而无需等待至下一帧反馈。快速反馈技术显著减少了业务数据接收状态反馈时延,进一步保障毫秒级控制类业务低时延要求得到满足,如图 5 所示。

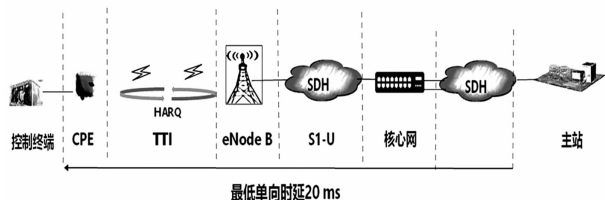


图 5 低时延快速反馈技术

2.3 控制信道效率提升技术

下行方面,根据 LTE 和 NB - IoT 系统的实际网络部署经验,当网络中存在大量突发性小包传输业务时,由于每一次上行或下行业务数据或信令的传输均需通过物理下行控制信道调度,物理下行控制信道的容量通常成为系统容量瓶颈。若上行业务数据或信令传输的 HARQ 反馈信息也都通过物理下行控制信道传递给终端,则会进一步占据已非常紧缺的物理下行控制信道资源。为缓解物理下行控制信道的容量问题,可引入 LTE 采用的物理混合自动重传指示信道,对于每次上行业务数据或信令传输只需反馈 1 bit 信息,以替代用物理下行控制信道进行反馈所携带的数十比特信息,从而显著提升 HARQ 反馈信息的传输效率,节省物理下行控制信道资源。

上行方面,为应对用电信息采集业务海量终端接入,IoT - G 230 MHz 电力无线通信系统的物理上行控制信道支持多用户码分复用,使多个用户对下行业务数据或信令传输的 HARQ 反馈信息可采用相同的时频资源发送至基站,从而成倍提升物理上行控制信道的传输效率,节省上行传输资源。

2.4 跳频抗干扰技术

230 MHz 频段为多个行业共同使用,因此,IoT - G 230 MHz 电力无线通信系统的空中接口设计需具备抑制异系统数传电台窄带干扰的能力,并尽可能降低对异系统数传电台的干扰。为此,IoT - G 230 MHz 电力无线通信系统采用了跳频干扰抑制技术,可通过灵活的调度方式对异系统干扰进行规避。

跳频是指收发双方传输信号的载波频率按照预定规律进行离散变化的通信方式,也就是说,通信中使用的载波频率受伪随机变化码的控制而随机跳变。通过跳频技术,可有效降低异系统对 IoT - G 230 MHz 电力无线通信系统的干扰,同时也可有效降低对异系统的干扰。此外,跳频还可获取频率分集增益,提升覆盖性能,抑制慢变深衰落信道对终端性能的影响。IoT - G 230 MHz 电力无线通信系统

的上行和下行均支持信道间跳频技术。

此外,对于射频带宽受限的低成本窄带终端,IoT - G 230 MHz 电力无线通信系统还支持分组跳频技术,使得终端在使用载波聚合时,成员载波成组进行跳频,保证了跳频后成员载波之间的间距不超过终端射频带宽,从而使低成本终端也可采用跳频和载波聚合相结合的方式传输业务数据,同时满足 IoT - G 230 MHz 电力无线通信系统对传输速率和传输可靠性的要求。

综上所述,单载波跳频以 25 kHz 载波为最小单位跳频,提升单载波业务(如配电自动化、用电信息采集)抗干扰能力。分组载波跳频将多个 25 kHz 载波绑定为一组,以载波组为最小单位,在系统指定的载波集合内跳频。

3 IoT - G 230 MHz 优势及其应用部署

3.1 IoT - G 230 MHz 优势

基于第 2 节对 IoT - G 230 MHz 电力无线通信关键技术的分析,总结出 IoT - G 230 MHz 九大优势,分别是全带宽、低延时、抗干扰、覆盖强、低功耗、多样性、易演进、全融合、IPv6。

1) 全带宽。离散载波灵活选择和聚合,223 ~ 226 MHz、229 ~ 233 MHz 带宽内 280 个离散载波灵活选择,满足多样的电力业务要求。

2) 低时延。采用 10 ms 帧长结构以及无调度算法,可达到空中接口 20 ms 超低延时,满足控制类业务时延需求。

3) 抗干扰。跳频的通信方式,控制信道备份,其有 7 M 带宽的跳频范围,且分组跳频支持窄带聚合,同时控制信道备份提高其可靠性。

4) 覆盖强。2T2R 数据信道时域重复,最大耦合线损 155 dB +。

5) 低功耗。简化协议栈,终端模组静态功耗小,支持电表和故障指示器。

6) 多样性。采用业务切片技术,资源隔离实现控制类、采集类业务隔离和不同需求。

7) 易演进。采用类 LTE 与 NB - IoT 协议栈,复用 LTE/NB - IoT 产业链,具有更开放的生态能力。

8) 全融合。基于宏站 LTE 分支开发,架构上支持同厂家 230 MHz 和 1800 MHz 网络融合,保护投资,简化运维。

9) IPv6。支持 IPv4/v6 双栈,满足未来海量终端部署需求。

3.2 IoT - G 230 MHz 应用情况

目前,IoT - G 230 MHz 技术在无人值守变电站、配电自动化、电力园区以及输电线路视频监控等方面已取得突出成绩。

无人值守变电站的应用如图 6 所示,其可实现单基站覆盖全变电站(典型变电站:200 m × 200 m);50 ms 切换时延,0 丢包;单基站可同时调度 128 用户;具有基于 LTE 的调度机制和抗干扰等特性。

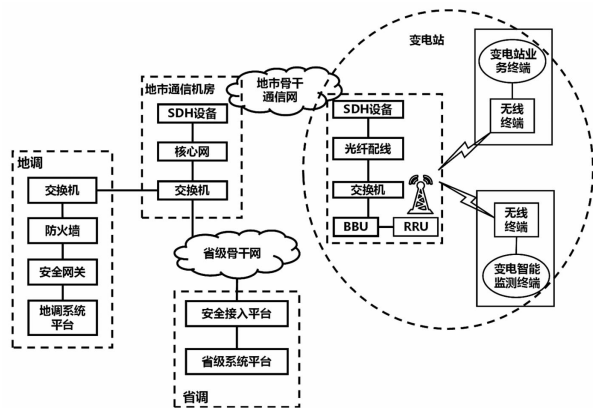


图 6 无人值守变电站应用

配电主站通过信息交互总线与上一级调度自动化系统、配电 GIS 系统、生产管理系统、营销管理信息系统实现信息交互。配电自动化终端采用 IoT - G 230 MHz 接入配电自动化主站和子站。配电终端包括馈线终端 (FTU)、站所终端 (DTU)、配变终端 (TTU)。

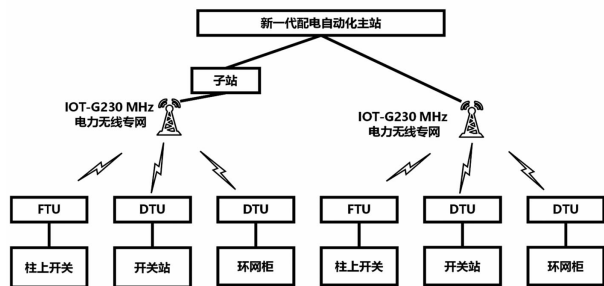


图 7 配电自动化接入应用

目前配电自动化已完成 A +、A 和 B 类区域覆盖,配电三遥站点 2455 个,二遥站点 198 个,三遥站点覆盖率 100%。如图 7 所示,使用 IoT - G 230 MHz 电力无线专网高效回传,实现各类终端站点集成交付运维。其中接入回传特点有:专用频段,任意地形无需布线;视通/非视通任意组网;支持 360° 全向部署密集接入;时分多址 (time division multiple access,

TDMA) 抗干扰,IP67,工作温度为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C} \sim +70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、10 kV 防雷、99.99% 高可靠;极简配置,即插即用,集中监控、免现场运维;接口丰富 RJ45/RS232/RS485/RS422。

3.3 IoT - G 230 MHz 未来发展部署

集群业务是未来发展的一个重要方向,集群业务包括了语音集群业务、集群数据业务以及集群补充业务,表 3 详细介绍了集群业务的类型及其功能。

表 3 集群业务类型及其功能

集群业务类型	功能
语音集群业务	语音单呼、语音组呼(组呼建立和释放、话权管理、通话限时、迟后进入、讲话方识别)
集群数据业务	实时短数据、组播短消息、广播短消息、状态消息、可视单呼、同源视频组呼、视频推送、视频转发
集群补充业务	动态重组、遥毙/遥晕/复活、强插/强拆、调度台订阅、故障弱化、集团短号、预占优先呼叫、紧急呼叫、调度区域选择、全播呼叫、组播呼叫、合法监听、环境监听、环境监视、定位

根据表 3 的介绍,为支持组播呼叫/全播呼叫,空中接口应支持组播/广播功能,以满足传输时延要求,并显著提升资源利用率;应急通信可能存在部分区域的基站由于灾害等因素无法正常工作的场景,此时需支持终端间直连通信 (direct mode operation, DMO);应急通信需支持通过终端中继的方式扩展覆盖至基站难以覆盖的区域;跨小区的移动性,支持低时延切换等。

4 结论

智能电网是国家能源发展战略中十分重要的一部分,智能电网的发展离不开通信技术的支持。无线专网在电网中由于是电力业务专用,能够满足电力系统的电力业务对通信高质量的需求,提供可靠的带宽速率、安全隔离和良好的信号覆盖。IoT - G 230 MHz 电力已成为智能电网发展中的关键无线通信技术。通过对国网关键核心业务与 IoT - G 230 MHz 关键性能指标的匹配性以及 IoT - G 230 MHz 电力无线通信关键技术的分析,总结了 IoT - G 230 MHz 的九大优势,并对其未来发展部署进行了展望,为促进 IoT - G 230 MHz 电力无线通信技术的发展提供建议。

(下转第 73 页)

中国电机工程学报,2021,41(6):2101-2115.

- [10] 潘光胜,顾伟,张会岩,等.面向高比例可再生能源消纳的电氢能源系统[J].电力系统自动化,2020,44(23):1-10.
- [11] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
- [12] 曾鸣,杨雍琦,刘敦楠,等.能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J].电网技术,2016,40(1):114-124.
- [13] 刘敦楠,徐尔丰,许小峰.面向园区微网的“源-网-荷-储”一体化运营模式[J].电网技术,2018,42(3):681-689.
- [14] 朱涛,陈嘉俊,段秦刚,等.基于近似动态规划的工业园区源-网-荷-储联合运行在线优化算法[J].电网技术,2020,44(10):3744-3752.
- [15] 曾顺奇,汤森垚,程浩忠,等.考虑源网荷储协调优化的主动配电网网架规划[J].南方电网技术,2018,12(3):35-43.
- [16] 张宁,杨经纬,王毅,等.面向泛在电力物联网的5G通信:技术原理与典型应用[J].中国电机工程学报,2019,39(14):4015-4025.
- [17] 任浩,孟仁杰,窦仁晖,等.基于5G网络的“源-网-荷-储”优化调控系统设计[J].电力信息与通信技术,2020,18(12):23-28.
- [18] 赵昊天,王彬,潘昭光,等.支撑云-群-端协同调度的多能园区虚拟电厂:研发与应用[J].电力系统自动化,2021,45(5):111-121.
- [19] 司羽飞,谭阳红,汪泓,等.面向电力物联网的云边协同结构模型[J].中国电机工程学报,2020,40(24):7973-7979.
- [20] 白昱阳,黄彦浩,陈思远,等.云边智能:电力系统运行控制的边缘计算方法及其应用现状与展望[J].自动化学报,2020,46(3):397-410.
- [21] 孙毅,李泽坤,许鹏,等.异构柔性负荷建模调控关键技术及发展方向研究[J].中国电机工程学报,2019,39(24):7146-7158.
- [22] 孙毅,许鹏,单葆国,等.售电侧改革背景下“互联网+”电能替代发展路线[J].电网技术,2016,40(12):3648-3654.
- [23] 许鹏,孙毅,石墨,等.负荷态势感知:概念、架构及关键技术[J].中国电机工程学报,2018,38(10):2918-2926.
- [24] 陈庆,闪鑫,罗建裕,等.特高压直流故障下源网荷协调控制策略及应用[J].电力系统自动化,2017,41(5):147-152.
- [25] 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.
- [26] 曾璐琨.需求侧聚合负荷协同控制策略研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [27] 曹雨洁,丁肇豪,王鹏,等.能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(二):机遇与挑战[J/OL].中国电机工程学报:1-16[2021-10-08].<http://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210814>.

作者简介:

许鹏(1990),男,博士,工程师,研究方向为电力系统及其自动化;

何霖(1990),女,硕士,工程师,研究方向为电力系统通信。
(收稿日期:2021-09-06)

(上接第62页)

参考文献

- [1] 李振玲.230 MHz 电力无线专网演进及业务测试研究[D].北京:华北电力大学,2020.
- [2] Lovepreet Kaur. Energy-Efficient Routing Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey [J]. International Journal of Computer Applications,2014:25-29.
- [3] 单泽,范菁,曲金帅,等.智能电网CPS关键技术综述[J].云南民族大学学报(自然科学版),2019,28(5):517-522.
- [4] 余贻鑫,刘艳丽.智能电网的挑战性问题[J].电力系统自动化,2015,39(2):1-5.
- [5] 马文静,孙凤杰,高波,等.融合工频通信的电力线载波路径搜索算法[J].电力系统自动化,2017,41(3):141-146.
- [6] 颜军.电力无线专网230 MHz和1800 MHz关键技术对比分析[J].移动通信,2020,44(2):58-63.
- [7] 赵训威,白杰,丁高泉,等.230 MHz 电力无线通信技术的优化[J].电信科学,2019,35(9):158-164.
- [8] 马钊,周孝信,尚宇炜,等.未来配电系统形态及发展趋势[J].中国电机工程学报,2015,35(6):1289-1298.
- [9] 徐长福,王小波,周超,等.面向应急通信的LTE电力无线专网应用研究[J].电力信息与通信技术,2015,13(1):27-31.
- [10] 孔令华.窄带物联网NB-IoT关键技术应用分析[J].电子技术与软件工程,2020(12):15-16.

作者简介:

赵晓坤(1983),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统通信;

高洁(1981),女,硕士,工程师,研究方向为电力通信;郭冰洁(1987),女,工程师,从事电力信息通信工作;

曾建(1971),男,硕士,高级工程师,从事电力信息通信工作。
(收稿日期:2021-07-26)