

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201970

基于 5G 的泛在电力物联网

陈皓勇¹, 李志豪¹, 陈永波², 陈锦彬¹, 王晓娟¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510641; 2. 中兴通讯股份有限公司, 江苏 南京 210012)

摘要: 在大规模分布式发电和储能的接入下, 能源行业结构不断调整。能源互联网和泛在电力物联网的概念相继被提出, 要实现电力系统数据的泛在连接, 电网建设进入新阶段。5G 技术飞速发展, 有着带宽更大、传输速率更高、时延更低的特点, 与泛在电力物联网网络层的建设紧密结合。介绍了泛在电力物联网的概念, 结合 5G 技术的关键技术和特点, 探讨 5G 在泛在电力物联网中的应用场景。最后指出了基于 5G 的泛在电力物联网面临的安全性挑战和未来发展方向。

关键词: 能源互联网; 泛在电力物联网; 5G; 数据科学

Ubiquitous power internet of things based on 5G

CHEN Haoyong¹, LI Zhihao¹, CHEN Yongbo², CHEN Jinbin¹, WANG Xiaojuan¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. ZTE, Nanjing 210012, China)

Abstract: With the access of large-scale distributed generation and battery storage, the structure of energy industry is continuously adjusted. The concepts of Energy Internet (EI) and Ubiquitous Power Internet of Things (UPIoT) have been proposed successively. To achieve the ubiquitous connection of the power system data, the construction of the power grid has entered a new phase. 5G technology has the characteristics of larger bandwidth, higher transmission rate, and lower delay, and is closely integrated with the construction of the UPIoT. After the introduction of the concept of UPIoT, the key technologies, characteristics and application scenarios of 5G in UPIoT are discussed. The security challenges and future development directions of 5G in UPIoT are pointed out.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51937005).

Key words: energy internet; ubiquitous power internet of things; 5G; data science

0 引言

在大电网的发展阶段, 电力行业高度依赖化石能源, 发展不可持续。而现在, 在大规模分布式发电和储能的接入下^[1], 能源结构行业结构不断调整, 可再生能源逐渐获得大众青睐^[2]。Jeremy Rifkin 提出“能源互联网(Energy Internet)”的概念^[3], 其目标是以可再生能源为主要一次能源, 实现如冷、电、热、气等多种能源形式的互补互联和综合利用^[4], 基于互联网实现能源信息的共享, 在何时何地, 何人何物都能顺畅通信, 从而提升整体的能源利用率。

2016 年, 国家发改委发布《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》, 加快了能源互联网的建设。2019 年 3 月, 国家电网有限公司对泛在电力物

联网(Ubiquitous Power Internet of Things, UPIoT)做出了全面部署安排。同年, 南方电网将数字化作为发展战略, 提出了“4321”行动, 要将发、输、变、配、用、调全面智能化, 实现多源管理, 进行新业务、新形态拓展。文献[5]在智能电网中, 提出适应自动发电控制新变化的控制框架和关键技术。文献[6]对综合能源系统中的稳态问题进行建模, 进行了总结与归纳, 提出一种基于能源集线器概念和多能互补思想的综合能源系统。文献[7]在主动配电网中分析了用电采集系统和在线监控系统中的大数据, 结合主动配电网, 对大数据技术可能的应用场景做了展望。文献[8]对于具有高风电渗透率的大型 AC/DC 混合输电系统, 提出了一种分布式调度方法来解决安全约束单元承诺问题, 促进了区域间风力发电适应性和改善整体系统运行经济性, 同时减轻了接收侧系统的峰值调节压力。

基金项目: 国家自然科学基金重点项目资助(51937005)

与此同时，在 2019 年，5G 作为最新一代蜂窝移动通信技术，得到了飞速的发展。文献[9]提出了一种针对 5G 移动应用的具有波束控制特性的毫米波(mm-Wave)阵列天线封装的新设计，可在保持高增益波束的同时选择所需的覆盖区域。文献[10]针对 5G 应用，研究并实现了一种新型的宽带磁电偶极天线。与 4G 等无线技术相比，5G 通信技术带宽更大，传输速率更高，时延更低^[11-12]。文献[13]系统地评估了由实时地球静止卫星回传支持的 5G 核心网络上的实时 4K 视频流的性能。

在 5G 技术兴起之前，电力系统通过有线的方式进行数据通信，若是泛在物联网也采用有线的方式来连接万物，成本很高，而且效率低下。因此物联网一般采用无线来连接。而 5G 的兴起，刚好碰上了泛在电力物联网的建设热潮，二者有望实现紧密的结合^[14]，前者所提供的高质量通信，完全可以满足泛在电力物联网的建设需求。

本文主要分析研究了 UPIoT 的含义和现状，指出了 UPIoT 中的通信挑战，指出 UPIoT 网络层中 5G 建设的重要意义，重点分析了 UPIoT 中 5G 通信的关键技术和技术特点，并对 5G 的 UPIoT 应用场景进行了阐述，还对 5G 所面临的挑战进行了进一步的分析，最后展望了 UPIoT 中 5G 的发展方向。

1 泛在电力物联网(UPIoT)

泛在电力物联网(UPIoT)，可分为三个方面对其进行解读。首先，物联网(Internet of Things, IoT)，即“万物相连的互联网”，其核心仍是互联网，是互联网的延伸和拓展，其次则是把原来的用户终端延伸至任何物品和物品之间。这一词语最早于 1995 年比尔·盖茨的书籍《未来之路》中出现^[15]。物联网的前身是传感网络，只代表着物与物之间的信息交互。其次是电力网，电力网是物联网中的一种具体形态。最后则是“泛在网”(Ubiquitous Network)，图 1 表示了传感网络、物联网、泛在网络之间的关系

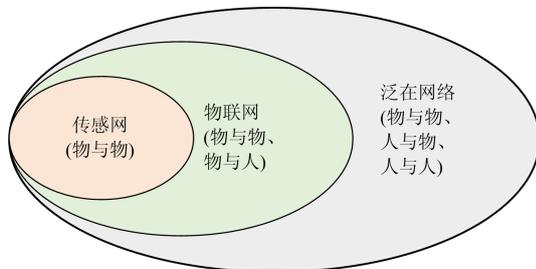


图 1 泛在网络、物联网、传感网之间的关系

Fig. 1 Relationship between ubiquitous network, internet of things, and sensor network

系^[16]。泛在网表示的是，无论是时间还是空间，抑或是任何对象的任何范围内，都存在相互的连接网络。而“泛在物联”即是任何时间、任何地点、任何人、任何物之间，都会存在信息的连接和交互。

而泛在电力物联网，就是围绕电力系统各环节，充分应用移动互联、人工智能等现代信息技术、先进通信技术，实现电力系统各环节万物互联、人机交互，具有状态全面感知、信息高效处理、应用便捷灵活特征的智慧服务系统^[17]。原来的电力网络，只能体现电能的“泛在”，却不能实现电力信息的“泛在”，泛在电力物联网将把电网从单纯的能量网络变为“能量+数据”网络。要想实现电力物联网的泛在，必须对电力网络中的关键数据和信息进行采集和连接，如用户的用电数据、配电系统中的状态信息、分布式电源的数据等等，因此需要基于先进的信息技术。

泛在电力物联网的结构如图 2 所示^[18]，包含 4 个层次。

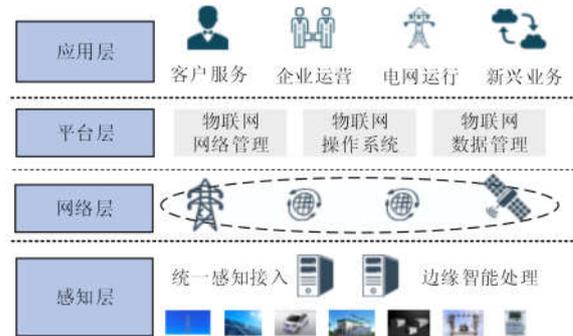


图 2 泛在电力物联网结构

Fig. 2 Network architecture of ubiquitous power internet of things

1) 感知层重点是统一终端标准，推动跨专业数据同源采集，实现配电侧、用电侧采集监控深度覆盖，提升终端智能化和边缘计算水平^[19]。

2) 网络层重点是推进电力无线专网和终端通信建设，增强带宽，实现深度全覆盖，满足新兴业务发展需要。

3) 平台层实现各类采集到的数据管理，是公共基础平台，重点是实现超大规模终端统一物联管理，深化全业务统一数据中心建设，推广“国网云”平台建设和应用，提升数据高效处理和云雾协同能力。

4) 应用层是应用和控制中心，重点是全面支撑核心业务智慧化运营，全面服务能源互联网生态，促进管理提升和业务转型。

只有把感知层和网络层建设好，应用层和平台层才能得到好的硬件条件支持。其中，5G 技术属于

泛在电力物联网中的网络层。

2 5G 技术简述

2.1 电力物联网的通信挑战

现代通信技术在电力系统中获得了广泛的应用。除了光纤和微波通信, 电力线载波通信作为电网特有的通信方式^[20], 利用输电线路, 将模拟或数字信号进行高速传输, 速度快, 成本低^[21], 但由于配电变压器阻隔、三相损耗、线路耦合损耗、电力线本身的脉冲干扰等原因^[22], 通信的可靠性降低, 电力线载波通信并不能实现大规模的应用。

泛在电力物联网发展的前提是充分的连接。文献^[17]介绍了基于低功率广域网络(LPWAN)技术的泛在电力物联网的基本概念、体系架构及相关前沿技术。在配电网中, 大量新能源、节能服务、储能元素接入, 需精细调控, 配网连接必不可少。如图 3 所示, 在配电及用户接入侧, 电动汽车、分布式光伏电池、智能家居、配电终端等智能终端, 会产生大量的数据。这些海量的数据属于基础小数据, 有着巨大的价值。

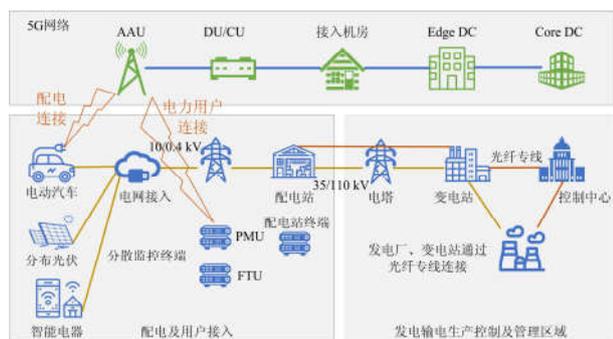


图 3 电力网终端接入图

Fig. 3 Diagram of power grid communication terminal access

在现在及未来的电力业务通信中, 有着三大需求, 分别是:

1) 实时、可靠, 电力业务需要大于 99.999%的可靠性和可用性, 并且数据的传输时延不能大于 20 ms, 时延抖动要小于 3 ms, 甚至要到 μs 级。

2) 安全、可控, 电力业务通信过程必须有着独特的通信资源, 不能被随意截取, 而且要全面监控, 专门管理。

3) 灵活、方便、经济, 在点多面广的海量智能终端的设备连接上, 如何降低其连接的复杂程度和成本, 也是电力业务通信的需求之一。

然而, 面对点多、面广的智慧终端和用户终端, 以以往的通信技术, 在通信信息获取的终端一公里内, 有着连接困难、连接匮乏、无线通信质量低等

问题。比如, 4G 等无线方式, 时延大多在 50 ms 到 100 ms 以上, 带宽不足, 难以完成高清视频的传输, 安全性和投资的使用成本也难以保障。光纤等有线方式则有着投资大、施工和维护困难的缺点, 而且覆盖的范围仅仅只包含了高价值用户, 灵活性差, 需要物理连接到每一台设备。

为了实现充分连接和提高通信质量, 5G 技术成为泛在电力物联网通信技术中的一大发展热点。5G 是面向 2020 年后新一代的移动通信技术, 与 2G/3G/4G 相比, 5G 的无线覆盖性能、传输时延、系统安全性和用户体验都得到了显著的提高, 是电力行业中多种业务泛在连接的重要选项。电力网和 5G 技术相结合, 对建设泛在电力物联网有着极大的帮助。

2.2 5G 关键技术

5G 通信技术的关键技术主要体现在无线技术和网络技术两个方面。

大规模多天线技术是一种多入多出(Multiple-Input Multiple-output, MIMO)的通信技术, 在无线技术领域有着重要地位^[23]。由通信理论可知, 在传输过程中增加越多的天线, 会极大地增强频谱效率和可靠性。但由于多天线所需的空域大、实现技术复杂等原因, MIMO 系统的最佳天线位置, 也需要研究人员去探寻^[24]。在 5G 系统里, 有着多种无线接入技术, 如 5G, 4G, LTE 等, 一个超密集组网通过增加基站密度可极大提升频率复用的效率。在无线通信中, 减少通信小区半径, 可提高频谱资源的空间利用率, 从而提高频谱效率, 因此, 在一个小区内设置多个通信节点, 形成超密集组网, 将是 5G 未来的发展方向之一。在多场景多业务模式下, 发送信号时将信号在空/时/频/码域进行叠加, 可提高系统频谱效率和接入能力, 称之为多址接入技术, 是现在移动通信系统的关键特征之一^[25]。除了传统的 OFDMA 技术, 5G 还将支持 SCMA 技术、MUSA 技术, PDMA 技术^[26]以及 NOMA 技术等多种新型多址技术。全双工技术, 是在同时双向通信的技术, 在无线网络中, 由于收发天线距离较近且功率差异大, 因此不管是网络侧还是终端, 在发射信号时, 都会对接收的信号产生自干扰, 因此不能实现同时同频地传输信号, 不仅在时间上, 还是在频率上, 都浪费了很多的无线资源。理论上, 全双工技术可以直接提高一倍的频谱利用率, 因此也是 5G 的一个重要发展方向。除此之外, 信道建模与编码、滤波器组多载波、自组织组网技术、内容分发网络技术、新型多址和全频谱接入技术也是 5G 无线技术中很重要的一部分^[27]。

如图 4 所示，5G 网络架构可分为三个部分，分别为接入云、转发云和控制云。接入云适应各种无线链路接入，可实现高效的数据感知，网络拓扑丰富，有着集中式接入和分布式接入两种接入架构。

转发云在控制云的控制下，实现数据的低时延高效传输。控制云控制全局的信息管理并保证 5G 通信服务质量，根据业务不同提供不同的差异化服务，保证每个业务对象的需求。

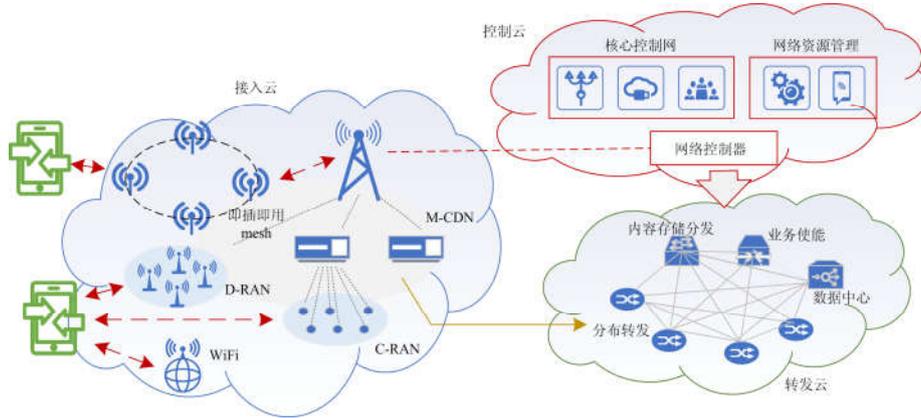


图 4 5G 网络架构

Fig. 4 Network architecture of 5G

2.3 5G 技术特点

相比同类型的无线网络 4G 技术，如表 1 所示，5G 技术 KPI 全方位超越 4G 技术。

表 1 5G 与 4G 指标对比

Table 1 Comparison of 5G and 4G indicators

指标名称	5G 取值	4G 参考值
流量密度	10 Tbps/km ²	0.1 Mbps/m ²
连接数密度	100 万/km ²	10 万/km ²
时延	空口 1 ms	空口 10 ms
移动性	500 km/h	350 km/h
能效	100 倍提升	1 倍
用户体验速率	0.1~1 Gbps	10 Mbps
频谱效率	3 倍提升	1 倍
峰值速率	20 Gbps	1 Gbps

由表可见，5G 网络技术的优势主要在于，包括峰值速率、区域速率、边缘速率，都比 4G 有了极大提高，峰值速率最高可达 20 Gbps，满足高清视频、虚拟现实等数据的大量传输。通信时延指信息从一端传送到另一端的时间，5G 时延比传统的 4G 整整少了一个数量级，5G 的空中接口的时延在 1 ms 左右，在自动驾驶和远程医疗等实时应用创造了条件。传统的 4G 网络连接的终端有限，多为用户的手机，而 5G 网络需有着超大的网络容量，每平方公里能够连接 100 万个终端，包括智能家电和各种智能终端，能够满足泛在电力物联网的海量智能终端的接入需求。5G 技术通过通信原理的优化，会降低传感器或节点的能耗^[28]，不需要对通信设备进行更换电池或者充电，给万物互联提供了很好的技术

条件。除此之外，在频谱效率、流量密度、连接密度等方面都大幅度提高，满足了用户的需求，使用户的体验更上一层楼。

因此可以总结，5G 技术需具有三大应用场景特征，分别是大带宽高速率(eMBB)、海量连接(mMTC)、低时延高可靠性(uRLLC)。

为了实现三大场景业务，在 5G 通信网络中，波束赋形由 2D 升级为 3D，频谱效率提升了 6 到 8 倍，改善了边缘覆盖的性能，因此具有超高的接入速率，吞吐量大于 19G，接近了 5G 技术的理论极限。在接入方式方面，5G 通信网络采用新型多址接入(MUSA)，MUSA 技术是属于 NOMA 技术的一种，通过 SIC 算法，能够同时实现高过载和免调度，接入终端的数量可提升 3 到 6 倍，连接数量远超标准要求，最高可达 9 300 万。再者，为了得到极低的传输时延，5G 采用了新型的帧结构技术，通过基于统一空口架构的设计，可以适应不同场景的时延与带宽需求，可灵活分配无线资源，时延可达 0.416 ms，远超 5G 标准的 1 ms。

在上述的新空口技术上，5G 网络还采用了全新的网络架构。利用海量的大数据进行，通过自动化运维系统，设计、分析、管理、编排、控制，在云平台上部署全局，重新切分无线网络，实现 CU/DU 分离，在核心网上实现 2/3/4/5G/FIX 重新融合，并实现 DC 间的低时延直接连接，可以实现 DC 的灵活调度。

除此之外，5G 还带来了其独有的网络切片能力和新运营模式^[29-31]。5G 网络切片如图 5 所示，将一

个物理的 5G 网络按照不同的场景需求切割成数个虚拟的端到端的逻辑网络, 不同的网络切片支持不同的场景、业务需求。切片之间, 相互不影响, 相互绝缘, 当某一张切片产生问题时, 并不会影响其他切片的正常工作。

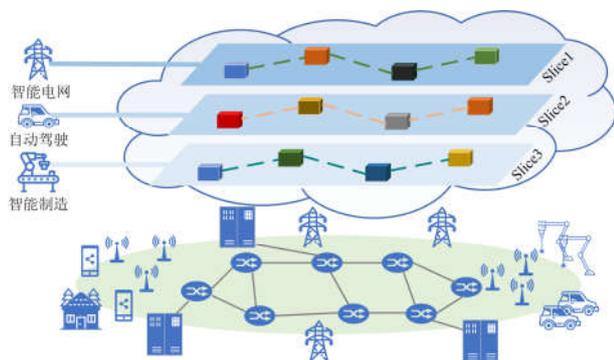


图 5 5G 网络切片

Fig. 5 Network slicing of 5G

基于一张 5G 基础网络, 划分不同特性的切片子网络, 即可独享网络资源, 提供定制化的准专网服务, 也可根据实际需求, 部分或全部共享切片网络。切片为不同应用场景提供服务等级协议(SLA)保障的连接服务, 满足多样化的场景需求。由于基础设施是统一的, 并没有额外建设通信网络, 实现了资源共享, 因此 5G 切片网络降低了整体的建设运营成本。5G 的切片网络中, 设置了多级隔离, 安全性高, 独享部分的网络资源的准专网实施强隔离, 每一块切片网络都有独立的生命周期管理, 因此安全性、独立性极高。每一块切片网络都是面向服务、按需定制的, 实施实时监控, 动态调度, SLA 得到了保障。

3 基于 5G 的泛在电力物联网

5G 通信的特点与优势和电力系统的特点十分互补, 对于不同的用户类型, 都有着不同的服务方式。对于电力运营来说, 如智能电表的高计量, 配电自动化, 配电智能运检等, 需要基于权益法则的 5G 差异化通信连接服务。对于需要智能家居的用电管理和用户系统的监控维保服务的消费类电力用户来说, 可通过联合电力公司共同服务电力用户。而对于需要新能源监控、充电桩监控、综合能源服务等企业类电力用户来说, 可通过 MEC 等为企业类用户提供差异化通信服务, 比如虚拟专网、专业子网和 IoT 云平台增值服务等。

3.1 5G 应用场景

在泛在电力物联网中, 5G 技术广泛地应用在各

个方面。

1) 5G+配电网差动保护(分布式自动化)。当前配电网保护多采用简单地过流、过压逻辑^[32], 不依赖通信, 但是不能实现分段隔离, 停电影响范围会扩大, 故障后供电恢复时间长(几天或小时级别)。而且, 配电网终端通信点多面广, 且布局分散, 光纤铺设难度大, 成本高。未来 5G 无线通信具有快速部署、成本低、易升级和扩容等特点, 基于高精度时钟同步, 5G 通信技术为终端提供一种更优的解决方案, 其理论上可以满足配电网的差动保护需求。其差动保护时延可小于 12 ms, 可完全隔离电网 I 区。

2) 5G+配网 PMU。PMU 测量点多, 通信频次高, 而且通信要求实时控制^[33], 到达毫秒等级, 而且报文有大有小、实时性有高有低。5G 通信技术由于其大带宽、实时性可靠性高, 可在配电网大范围部署, 感知配电网状态, 多方协同通信, 可作为判断配电网故障的新手段。

3) 5G+精准控制系统。将终端用户接入层由原来的全光纤方案, 用 5G 专网代替, 可控资源大幅增加, 利用 5G 连接相关可中断负荷、调控分布式能源。

4) 5G+虚拟电厂。由于大量的分布式电源、可控负荷、储能设备和电动汽车相连接, 系统所要求的控制实时性和调控响应都要达到毫秒级, 然而光纤通信连接点数量少成本高, 而其他无线通信方式时延高, 5G 通信技术由于其低时延、高可靠性的优点, 成为毫秒级实时响应与调控、调频调压的新手段。

5) 5G+智能巡检。在电力系统的巡检业务中, 经常使用网联机器人巡检^[34], 需要做到实时数据实时分析, 高清视频监控, 智能在线分析识别。当前基于短距离无线、WIFI 或有限的智能巡检设备受到很多局限, 如移动或飞行距离短, 可靠性低, 需要有人近距离操控、数据不能实时处理。利用基于 5G 的网联无人机和机器人巡检, 带宽更大, 单位时间内可传输的视频和图像更多, 更高效, 实现数据实时回传、直播互动、远程作业、远程 VR/AR 专家指导。

6) 5G+网络精确授时。5G 基站时钟精度高于 100 ns, 24 小时漂移小于 1.5 μ s, 可以作为授时时钟源。基站发出统一授时的物理信号到 5G UE(CPE), CPE 对授时信号经过处理, 输出到 IRIG-B, 电力终端通过 IRIG-B 码接口实现对时同步, 时延小于 10 ms。

7) 5G+数据增值服务。电力系统用户侧数据涉及全社会各行各业, 包含大量社会经济信息, 从数据科学的角度, 其价值远比电网内部数据的价值要

高。当下的电力系统数据大多把着眼点放在电力系统本身，仍缺乏对用户侧数据的充分关注。但是，由于用户侧数据杂乱无章，缺乏科学的处理方法，目前的数据处理时间尚不能满足时延要求，原来的网络承载能力也有限，所以目前用户侧数据的隐藏价值并没有被发掘出来。5G 技术的出现，其低时延大带宽的优势，给电力系统数据增值带来新的契机。通过 5G 边缘计算，在采集到用户侧数据时，实时进行用电行为分析、定制个性化用电方案等，把数据增值计算下沉至数据源头，将使整体网络服务响应更快、效率更高。

5G 可为电力物联网提供更有价值的泛在接入方案，如：为业务无线接入提供更优的解决方案，为电力不同业务提供差异化的网络服务能力，为电网不同分区业务提供可靠的安全隔离能力，为海量的接入终端提供高效灵活的运营管理能力。5G 网络通信技术，是泛在电力物联网业务创新的重要机遇^[35]。

3.2 5G 泛在电力物联网面临的挑战

首先，电力通信安全是 5G 在泛在电力物联网应用的关键挑战。如图 6 所示，电网安全分区原则制定于 20 年前，2014 年修订，适用于主网。由于主网容量大，事故的破坏影响大，后果严重，严格要求无可厚非，而且非常必要。当时，配网末端、电力用户的通信连接需求极少，未充分考虑末端及用户的连接需求。由于泛在电力物联网使用的是 5G 公网，如何进行物理隔离，是一个始终绕不过去的问题。现在大量的智能终端接入配电网末端，是否应该重新考虑，在配用领域，采用分层、分区、分类设置安全方案的新原则，适度放开对 5G 公网的使用，达到效率、利益与安全的平衡。

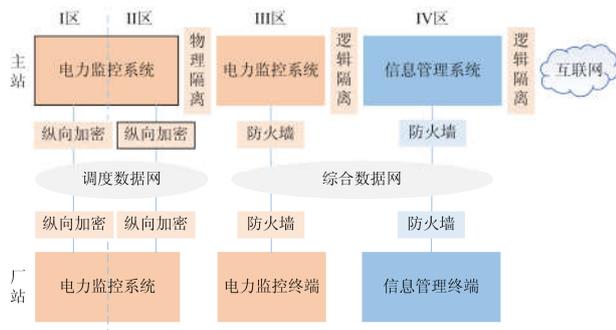


图 6 电网信息安全分区

Fig. 6 Security division of power grid information systems

再者，现在 5G 技术仍然在发展当中，在 5G 的发展初期，即 2020 年以前，业务场景大多集中在 5G 大视频类，重点在于满足 eMBB 大带宽需求，提升用户体验，提升大视频类业务如监控、VR、

AR 的体验。2020 年后，增加 uRLLC, mMTC 切片需求，在 2020 到 2025 年之间，5G 业务可逐步拓展至垂直行业，5G 结合车联网、能源、工业等试点，帮助客户通过 5G 推进数字化转型，保证业务隔离和差异化体验。至于到了 2025 年之后，5G 业务可大规模推广至各个垂直行业，基于 5G 端到端的切片服务，把目标客户群体聚焦在企业客户。

4 结论

泛在电力物联网的建设正在如火如荼地进行中，5G 作为新兴通信技术，是建设网络层的关键通信技术之一。5G 技术有着高速率、大容量、高可靠性、低时延、低能耗特点，因此十分适合进行泛在电力物联网的建设。本文详细阐述了 5G 技术的关键和特点，并给出了 5G 在泛在电力物联网中的应用场景，为以后的研究奠定基础 and 提供方向。

参考文献

[1] 李刚, 刘继春, 魏震波, 等. 含分布式电源接入的市场多主体博弈分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 1-9.
LI Gang, LIU Jichun, WEI Zhenbo, et al. Analysis of game among multi-agents in electrical power market with integration of distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 1-9.

[2] 梁子鹏, 陈皓勇, 雷佳, 等. 考虑风电不确定度的风-火-水-气-核-抽水蓄能多源协同旋转备用优化[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2111-2119.
LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, LEI Jia, et al. A multi-source coordinated spinning reserve model considering wind power uncertainty[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2111-2119.

[3] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.

[4] 谈竹奎, 程乐峰, 史守圆, 等. 能源互联网接入设备关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(14): 140-152.
TAN Zhukui, CHENG Lefeng, SHI Shouyuan, et al. Discussion on key technologies of energy internet access equipment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(14): 140-152.

[5] 滕贤亮, 高宗和, 朱斌, 等. 智能电网调度控制系统

- AGC 需求分析及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 81-87.
- TENG Xianliang, GAO Zonghe, ZHU Bin, et al. For smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 81-87.
- [6] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3306.
- WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated energy system under the background of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3306.
- [7] 张沛, 吴潇雨, 和敬涵. 大数据技术在主动配电网中的应用综述[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 52-59.
- ZHANG Pei, WU Xiaoyu, HE Jinghan. Review on big data technology applied in active distribution network[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 52-59.
- [8] ZHOU Ming, ZHAI Junyi, LI Gengyin, et al. Distributed dispatch approach for bulk AC/DC hybrid systems with high wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3325-3336.
- [9] OJAROUDIPARCHIN N, SHEN Ming, ZHANG Shuai, et al. A switchable 3D-coverage phased array antenna package for 5G mobile terminals[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2016, 15: 1747-1750.
- [10] ZENG Jingtao, LUK K M. Single-layered broadband magneto-electric dipole antenna for new 5G application[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18: 911-915.
- [11] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, et al. 5G: a tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment and practice[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(6): 1201-1221.
- [12] JABER M, IMRAN I MA, TAFAZOLLI R, et al. 5G backhaul challenges and emerging research-a survey[J]. IEEE Access, 2016, 4: 1-23.
- [13] GE Chang, WANG Ning, SELINIS I, et al. QoE-assured live streaming via satellite backhaul in 5G networks[J]. IEEE Transactions on Broadcasting, 2019, 65(2): 381-391.
- [14] 王坤. 5G 时代物联网技术在电力系统中的应用[J]. 通信电源技术, 2018, 35(5): 187-188.
- WANG Kun. The application of the internet of things in the 5G era in the power system[J]. Telecom Power Technology, 2018, 35(5): 187-188.
- [15] 陈天超. 物联网技术基本架构综述[J]. 林区教学, 2013(3): 64-65.
- CHEN Tianchao. Overview of basic architecture of Internet of things technology[J]. Teaching of Forestry Region, 2013(3): 64-65.
- [16] 张平, 李世林, 胡铮. 增强性移动泛在智慧环境——物联网的高级态势[J]. 物联网学报, 2018, 2(1): 17-23.
- ZHANG Ping, LI Shilin, HU Zheng. Enhanced-mobile ubiquitous smart environment — the super state of Internet of things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(1): 17-23.
- [17] 陈皓勇, 陈永波, 王晓娟, 等. 基于 LPWAN 的泛在电力物联网[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 7-14.
- CHEN Haoyong, CHEN Yongbo, WANG Xiaojuan, et al. Ubiquitous power internet of things based on LPWAN[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 7-14.
- [18] 邹维福, 陈景晖, 翁晓锋, 等. 电力物联网的风险分析及安全措施研究[J]. 电力信息与通信技术, 2014, 12(8): 121-125.
- ZOU Weifu, CHEN Jinghui, WENG Xiaofeng, et al. The Security analysis and countermeasure of power internet of things[J]. Electric Power ICT, 2014, 12(8): 121-125.
- [19] 李勋, 龚庆武, 乔卉, 等. 物联网在电力系统的应用展望[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 232-236.
- LI Xun, GONG Qingwu, QIAO Hui, et al. The application of IOT in power systems[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 232-236.
- [20] 宋建立, 谭阳红, 张海霞, 等. 基于 QPSO 算法的电力载波通信自适应阻抗匹配[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(1): 228-233.
- SONG Jianli, TAN Yanghong, ZHANG Haixia, et al. Adaptive impedance matching for power line communication based on quantum particle swarm optimization[J]. Computer Engineering and Applications, 2015, 51(1): 228-233.
- [21] 郭昊坤. 电力系统通信技术发展现状综述与展望[J]. 电子元器件与信息技术, 2017, 1(6): 5-10.
- GUO Haokun. Review and prospect on the development of power system communication technology[J]. Electronic Components and Information Technology, 2017, 1(6): 5-10.
- [22] GUO Haokun, WU Junji, YING Zhanfeng. Modeling research of background noise in low-voltage power line communication channel[J]. Advanced Materials Research, 2012, 516-517: 1386-1390.
- [23] 王东明, 张余, 魏浩, 等. 面向 5G 的大规模天线无线传输理论与技术[J]. 中国科学: 信息科学, 2016, 46(1): 3-21.
- WANG Dongming, ZHANG Yu, WEI Hao, et al. An overview of transmission theory and techniques of large-scale antenna systems for 5G wireless communications[J]. Scientia Sinica Informationis, 2016,

- 46(1): 3-21.
- [24] NGO H Q, LARSSON E G, MARZETTA T L. Energy and spectral efficiency of very large multiuser MIMO systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(4): 1436-1449.
- [25] 毕奇, 梁林, 杨姗, 等. 面向 5G 的非正交多址接入技术[J]. 电信科学, 2015, 31(5): 20-27.
BI Qi, LIANG Lin, YANG Shan, et al. Non-orthogonal multiple access technology for 5G systems[J]. Telecom Science, 2015, 31(5): 20-27.
- [26] 康绍莉, 戴晓明, 任斌. 面向 5G 的 PDMA 图样分割多址接入技术[J]. 电信网技术, 2015(5): 43-47.
KANG Shaoli, DAI Xiaoming, REN Bin. Pattern division multiple access for 5G systems[J]. Telecommunication Network Technology, 2015(5): 43-47.
- [27] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15-29.
ZHANG Ping, TAO Yunzheng, ZHANG Zhi. Survey of several key technologies for 5G[J]. Journal on Communications, 2016, 37(7): 15-29.
- [28] WONG E, GRIGOREVA E, WOSINSKA L, et al. Enhancing the survivability and power savings of 5G transport networks based on DWDM rings[J]. IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 2017, 9(9): 74-85.
- [29] 夏旭, 朱雪田, 邢燕霞, 等. 网络切片让 5G 多场景应用成为可能[J]. 通信世界, 2017(27): 48-49.
XIA Xu, ZHU Xuétian, XING Yanxia, et al. Network slicing makes 5G multi-scene application possible[J]. Communication World, 2017(27): 48-49.
- [30] 项弘禹, 肖扬文, 张贤, 等. 5G 边缘计算和网络切片技术[J]. 电信科学, 2017, 33(6): 54-63.
XIANG Hongyu, XIAO Yangwen, ZHANG Xian, et al. Edge computing and network slicing technology in 5G[J]. Telecom Science, 2017, 33(6): 54-63.
- [31] PETROV V, LEMA M A, GAPEYENKO M, et al. Achieving end-to-end reliability of mission-critical traffic in softwarized 5G networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(3): 485-501.
- [32] 黄纯, 刘鹏辉, 江亚群, 等. 基于动态时间弯曲距离的主动配电网馈线差动保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 240-247.
HUANG Chun, LIU Penghui, JIANG Yaqun, et al. Feeder differential protection based on dynamic time warping distance in active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 240-247.
- [33] 万蓉, 薛蕙. 考虑 PMU 的配电网潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 33-37, 44.
WAN Rong, XUE Hui. Power-flow calculation for distribution network with PMU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(3): 33-37, 44.
- [34] 王万国, 田兵, 刘越, 等. 基于 RCNN 的无人机巡检图像电力小部件识别研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(2): 256-263.
WANG Wanguo, TIAN Bing, LIU Yue, et al. Study on the electrical devices detection in UAV images based on region based convolutional neural networks[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(2): 256-263.
- [35] 王毅, 陈启鑫, 张宁, 等. 5G 通信与泛在电力物联网的融合:应用分析与研究展望[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1575-1585.
WANG Yi, CHEN Qixin, ZHANG Ning, et al. Fusion of the 5G communication and the ubiquitous electric internet of things: application analysis and research prospects[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1575-1585.

收稿日期: 2019-11-26

作者简介:

陈皓勇(1975—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划、运行与控制, 新能源并网与智能电网技术, 电力经济与电力市场, 综合能源系统等; E-mail: eehychen@scut.edu.cn

李志豪(1997—), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为电力系统分析运行与控制;

陈永波(1978—), 男, 高级工程师, 目前研究方向为电力物联网的 5G 应用需求及解决方案。

(编辑 葛艳娜)