

# 5G 通信与泛在电力物联网的融合： 应用分析与研究展望

王毅<sup>1</sup>, 陈启鑫<sup>1</sup>, 张宁<sup>1</sup>, 冯成<sup>1</sup>, 滕飞<sup>2</sup>, 孙铭阳<sup>2</sup>, 康重庆<sup>1</sup>

(1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学), 北京市 海淀区 100084;

2. 帝国理工学院 电力与电子工程系, 伦敦 南肯辛顿 SW7 2AZ)

## Fusion of the 5G Communication and the Ubiquitous Electric Internet of Things: Application Analysis and Research Prospects

WANG Yi<sup>1</sup>, CHEN Qixin<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>1</sup>, FENG Cheng<sup>1</sup>, TENG Fei<sup>2</sup>, SUN Mingyang<sup>2</sup>, KANG Chongqing<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments

(Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China;

2. Department of Electrical and Electronic Engineering, Imperial College London, South Kensington, London SW7 2AZ, UK)

**ABSTRACT:** The ubiquitous electric Internet of Things (IoT) is a concrete manifestation of the IoT in the power industry. It is a deep integration of interconnected power network and communication network, and an important measure to implement the Energy Internet. The fifth generation mobile communication (5G communication) is favored by all walks of life because of its advantages of high bandwidth, low delay and low power consumption. It will also play an important role in the ubiquitous electric IoT. This paper discusses the deep fusion of the 5G communication technology and the ubiquitous electric IoT. Specifically, the potential application scenarios of 5G communication in ubiquitous electric IoT are analyzed. In addition, the key technologies of the 5G communication that support ubiquitous electric IoT are also summarized. Since the base stations of 5G communication network are dense and the energy consumption is large in the future, how ubiquitous electric IoT supports 5G communication network and the coordinated interaction between the two networks are also studied. Finally, future research on the fusion of the 5G communication technology and the ubiquitous electric IoT are prospected.

**KEY WORDS:** Energy Internet; ubiquitous electric Internet of Things; 5G communication; big data; Internet of Things; cyber-physical system

**摘要:** 泛在电力物联网是物联网在电力行业的一种具体表现形式, 是互联互通的电力网与通信网深度融合的产物, 是实

现能源互联网的重要举措。第五代移动通信(5G 通信)因具有高带宽、低时延、低功耗等优势, 受到各行各业青睐, 也将于泛在电力物联网深度融合。基于此, 探讨了5G通信技术与泛在电力物联网的深度融合, 深入分析了5G通信在泛在电力物联网中的应用场景, 总结了5G通信支撑泛在电力物联网关键技术; 鉴于未来5G通信网基站密集, 能耗可观, 进一步还研究了泛在电力物联网下5G通信网的能量管理机制, 以及两者产能用能的协调互动; 最后, 对未来5G通信与泛在电力物联网的融合研究进行了展望。

**关键词:** 能源互联网; 泛在电力物联网; 5G通信; 大数据; 物联网; 信息物理系统

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2019.0635

## 0 引言

2016年初, 国家发改委、能源局和工信部联合发布了《关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见》, 正式掀起了我国能源互联网建设的大幕。能源互联网的内涵在于通过冷-热-电-气等多种形式能源系统的深度耦合、信息与物理系统的深度融合、以及创新的商业模式与市场机制等手段, 提升整体能源利用效率、促进高比例可再生能源消纳<sup>[1]</sup>。随后, 能源互联网示范项目建设在全国各地也正如如火如荼开展。在通往能源互联网的道路上, 2019年国家电网有限公司“两会”提出了加快建设“泛在电力物联网”的目标, 并将泛在电力物联网定位为能源互联网的重要组成部分。

泛在电力物联网本质上是一种物联网, 是泛在物联在电力行业的一种具体表现形式和应用落地<sup>[2]</sup>。传统互联网利用先进的通信手段将计算机连

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(71961137004)。

International (Regional) Joint Research Project of National Natural Science Foundation of China (No. 71961137004).

接起来, 而物联网则是将所有能行使独立功能的普通实物连接起来。对于电力系统而言, 将所有和电相关的实物或设备进行互联互通, 在某种程度上来说就是泛在电力物联网的重要实现。传统物联网主要强调信息的互联互通, 而泛在电力物联网既有电力的互联互通, 又有信息的互联互通。

在整个电力系统中, 为了保证系统的安全稳定, 在高压输电线路等设备上已经安装了包括数据采集和监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)、同步相量测量装置(phasor measurement unit, PMU)等在内的各种系统与设备运行状态量测系统, 并配有光纤通信, 实现了可靠的电力互联互通和信息互联互通。但对于电压等级较低的配电网, 考虑到成本等因素, 并没有同步实现光纤覆盖。此外, 较输电网络而言, 配电网连接的设备更多, 深入到每一个用户、甚至到每个家庭的每一个用电设备, 海量设备仅通过不同电压等级的电力线路连接。然而目前配用电侧海量设备还没有完全实现信息的互联互通, 电力系统的“最后一公里”挑战仍然存在, 并且亟待解决。创造全新的商业模式、实现广泛的用户互动、充分挖掘用户灵活性是能源互联网发展的重要方向, 而信息互联互通是基础<sup>[3]</sup>。所以未来泛在电力物联网的重点将集中在配用电侧, 这也是本文论述的重点。

与此同时, 在电力之外的通信领域, 第五代移动通信(5G 通信)技术快速发展, 包括标准制定、基站建设等在内的各项技术与建设得到了长足的发展, 我国预计在 2020 年将实现规模商用<sup>[4]</sup>。5G 通信与 4G/3G/2G 通信相比, 在带宽、时延等各方面都有较大的飞跃<sup>[5]</sup>。5G 通信尝试利用通信网络实现万物互联, 有望成为实现和构建物联网核心技术<sup>[6]</sup>。从万物互联的角度来看, 电力网和 5G 通信网有其共通之处, 前者提供电力供应, 后者满足通信需求。于是便产生了一系列直观的问题: 5G 网络和电力网络的深度融合会产生什么样的应用, 孕育出什么样的商业模式, 创造什么规模的价值?

通过有线网络连接万物, 对于物联网而言成本较高、适用性较差, 所以物联网一般都是通过无线网络进行连接, 例如 4G 移动网络、无线热点网络(Wi-Fi)、紫蜂无线网络(Zigbee)等<sup>[7]</sup>。而 5G 通信的成熟必将使其在未来泛在电力物联网中占有重要席位。本文将重点分析 5G 通信时代下泛在电力物联网的研究框架。具体而言, 将深入分析泛在电力物联网的内涵, 介绍 5G 通信的发展与特点; 在此基础上剖析 5G 通信与泛在电力物联网之间的关

系, 探讨 5G 通信在泛在电力物联网中的潜在应用, 分析 5G 通信的若干关键技术, 这些关键技术将在电力服务中扮演重要角色; 此外还研究了泛在电力物联网中的 5G 通信能效管理问题; 最后, 对 5G 通信时代的泛在电力物联网的关键研究进行了展望。

## 1 泛在电力物联网的概念与特征

本节将首先介绍物联网的基本概念, 然后延伸到泛在电力物联网, 最后分析泛在电力物联网的基本特征。

### 1.1 物联网

国际标准化组织/国际电工委员会(ISO/IEC)将物联网的定义为“一种物、人、系统和信息资源互联的基础设施, 结合智能服务, 使其能够处理物理和虚拟世界的信息并做出响应<sup>[8]</sup>”。最初期的物联网就是为需要连接的实物安装传感装置, 实现数据采集, 然后将这些数据通过通信网络传送到某一数据采集中心(例如数据管理分析平台), 实现对该实物的监测和分析, 最终辅助做出理性决策。这种传统的物联网信息流动往往是单向的, 即从被连接的实物到数据采集中心。近年来, 物联网的概念在不同行业得到广泛普及和应用, 培育了多样化的物联网。智能家居就是一种最为常见的物联网, 与初期信息单向流动的物联网不同, 智能家居既采集用电设备运行状态数据, 又能够给相应的设备下达操作指令, 实现电器设备的实时控制。这种以智能家居为代表的物联网实现了信息的双向流动, 融合了人或者人工智能的分析与控制, 提升了连接实物的监测和管理水平<sup>[9]</sup>。

一般来说, 物联网主要包括感知层、接入层、网络层、管理层和应用层等不同的层级<sup>[10]</sup>, 如图 1 所示。感知层是利用传感器元件或装置对被连接实物的位置、运行状态等信息; 接入层将传感器与互

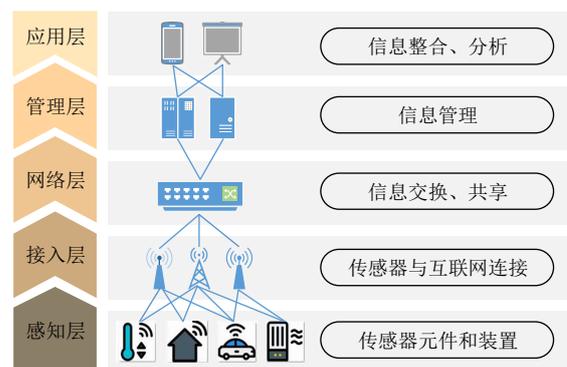


图 1 物联网的层次结构

Fig. 1 Hierarchy of Internet of Things (IoT)

联网连接,通常通过无线射频识别(radio frequency identification, RFID)通信、蓝牙、Zigbee、WiFi等方式实现;网络层则是实现广泛信息整合、交换与共享互联网平台,有时接入层和网络层可以进行合并;管理层实现对互联网中信息的管理,例如数据的存储、加密等;应用层则是通过对信息的整合、分析,最终提供相应的服务、做出相应的决策。仍然以智能家居为例,智能开关、智能传感等装置为感知层,房屋中的WiFi则为接入层面,有线/无线互联网对应网络层,智能家居对应的手机应用程序(application, APP)可能存储各电器设备的用电数据,对应管理层;手机APP通过分析或者人通过APP控制电器设备的开停,这一部分则为应用层。

## 1.2 泛在电力物联网的概念

推进泛在电力物联网建设是由国家电网有限公司在2019年“两会”上正式提出,建设泛在电力物联网是实现能源互联网的重要举措。“泛在电力物联网”包含泛在、电力、物联网3个关键词,于是可以从“泛在网”、“电力网”和“物联网”3个方面对泛在电力物联网进行解读。其中,物联网是泛在电力物联网的具体表现形式,即泛在电力物联网是一种特殊的物联网;电力网是物联网技术具体的应用对象,包括的电力乃至能源网络的发输配变用各个环节,被连接实体大到电力装备、小至家用电器;泛在就是无处不在的意思,从某种程度上来说,泛在网与物联网的概念相近、甚至更广,泛在一词描述了未来电力物联网的基本特征,即无时不在、无处不在,能够实现在任何时间、任何地点、任何人、任何物的顺畅通信。

传统的物联网所连接的实物除了信息连接之外往往没有其他的连接关系,例如交通物联网中的车辆仅通过传感器和通信网络连接,除此之外没有其他的连接方式。但泛在电力物联网不同,其所连接的实物往往是电力设备、家用电器等,这些实物本身就通过不同电压等级的电力网络实现了互联互通,所以泛在电力物联网同时包含了互联互通的电力网和通信网。此外,由于电力网络覆盖了海量用户,为了满足电力系统中不同参与主体的需求,泛在电力物联网应该还可能衍生出社会网、业务网、交易网、资金网等其他关联网络。

与物联网相同,泛在电力物联网也包括感知层、网络层、平台层(管理层)和应用层。感知层利用各式各样的传感器实现对与电力甚至其他能源相关的实物的状态进行采集。在配用电系统中,智能电

表就是最为典型的传感器,能够实时感知用户的基本用电情况,一般情况下,每个家庭配备一台智能电表,有条件情况下还可以设置多个子智能电表用于监测特定的用电设备;除智能电表外,还有系统运行状态(如电压、功率等)传感单元,电力设备(如变压器等)传感单元,随时采集特定区域环境信息(如温度、湿度等)传感单元等。网络层为了满足不同类型传感器的接入,可能包括移动通信、有线互联网、局域网等不同类型的网络构成,他们有特定的通信协议与规范,具有较强的可延拓性。平台层则将网络层传输的数据通过统一的数据中心进行存储和管理,对于部分数据也可以实现跨部门、跨主体甚至跨行业共享。应用层是泛在电力物联网的核心目标,通过电力与信息互联互通,为用户、售电商、电网操作员等提供控制与决策支持,孕育全新的商业模式和新兴业务,致力于营造新的业态。

## 1.3 泛在电力物联网的特征

“泛在”是泛在电力物联网的基本特征,泛在所体现的无时不在与无处不在,以及任何人与任何物的“万物互联”。泛在电力物联网具有复杂性、包容性、开放性和创新性。

具体地,复杂性是指泛在电力物联网连接海量电力相关实体,电力网、通信网、业务网、资金网等深度融合,采集数据海量,需要先进的通信、人工智能、大数据等技术作为支撑,泛在电力物联网的分析与运营涉及到多个维度的分析。

包容性是指泛在电力物联网连接万物,它不仅包含了与电力系统直接相关的实物,如变压器、配电线路等,它还可以一直延伸到每个家庭中的电器设备,甚至用户的穿戴设备;乃至拓展到环境气象数据的采集等,实现多环节的数据共享。

开放性是指泛在电力物联网更多的是扮演一个开放平台的角色,服务的对象不仅仅只有电网运营者本身,包括电力用户在内的各种参与主体都可以主动融入泛在电力物联网,为自身创造价值,甚至其他行业的企业可以参与进来创造新的业态。

创新性是指泛在电力物联网实现了数据采集、及时通信与控制等多方面的功能,基于这样一个平台,可以激发参与者创造全新的商业模式,打造全新的生态化运营系统。

综上所述,泛在电力物联网的复杂性、包容性、开放性和创新性,与建设全息感知、泛在连接、开放共享、业务创新的泛在电力物联网目标也是一致的<sup>[2]</sup>。

## 2 支撑泛在电力物联网的 5G 通信

通信技术是泛在电力物联网的核心技术之一,是实现万物互联的基本组成部分。泛在电力物联网可以通过不同类型的通信网络进行互联,而最新发展的 5G 通信又具有独特的优势。本节将介绍移动通信的发展历程,剖析 5G 通信的基本工作原理,分析 5G 通信的基本特征以及与泛在电力物联网的契合点。

### 2.1 移动通信技术发展历程

移动通信技术在近几十年来得到了长足发展,也发生了革命性的变化。第一代(1G)通信技术主要使用 FM 调频技术,传输模拟信号,开始应用于实现远程无限通话;随着集成电路等的发展,第二代(2G)通信技术应运而生,该技术不再传输模拟信号,而是数字信号,提升了通信的抗干扰性能,各种信息服务开始出现,这是通信技术一次质的变化。第三代(3G)通信技术和第四代(4G)通信技术在 2G 通信基础上进一步提升了网络传输速度:3G 通信从真正意义上带来了整个移动互联网;而目前使用的 4G 通信,网络速度得到极大提升,进一步推动移动互联网发展,手机不再局限于通话短信,数据传输显得更为重要,为物联网的发展创造了想象空间。移动通信技术的每一代革新都在移动通信性能、通信速度等较大的提升,都会给这个社会带来全新的变化和机遇。5G 通信时代已经到来,2016 年已经开始了 5G 通信标准的制定工作,并于 2018 年结束,2019 年被成为 5G 通信的元年,我国预计在 2020 年将实现 5G 通信的规模商用。

### 2.2 5G 通信基本原理

从 2G 通信开始,移动通信技术都是以数字信号作为基础,5G 通信也不例外。移动通信就是利用电磁波在空气中自由传播进行通信,一般包括信号发生器和信号接收器,包括了调制、解调等基本步骤。与有线通信不同,无限通信的电磁波信号在空中传播过程中存在反射、衍射、散射等各种情况,通过多个路径抵达目的地<sup>[11]</sup>。

通信领域著名的香农公式给出了单条通信链路下信号传输最大速率与频谱宽度/信号功率和噪声功率之间的关联关系<sup>[12]</sup>,即

$$C = B \ln \left( 1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

式中:  $C$  为信号最大传输速率;  $B$  为频谱宽度;  $S$  为信号功率;  $N$  为噪声功率;  $S/N$  即信噪比。需要指出的是,虽然由式(1)说明了速率受到频谱宽度的限制,但可以在不同的相隔较远的地区反复使用同

一频谱资源,形成一个个小区,利用这种频率的不断复用实现在有限的资源下提供尽可能多的服务,这即是现代移动蜂窝通信技术的基础。

IMT-2020(5G 通信的法定名称)推进组从峰值速率、边缘速率、能效、可靠性、通信时延等各个方面给出了未来 5G 通信的技术指标<sup>[3]</sup>。例如 5G 通信峰值速率至少 20Gbps,较 4G 通信而言是一个较大的飞跃。为了实现如此高速率的信号传输,可以开展 3 方面的工作:1) 拓展资源。基于香农定理,选择更宽的频谱,每一次通信技术换代都伴随着电磁波信号频率的增加,未来 5G 通信对应的频段达到 30GHz 到 300GHz(对应波长 10mm 到 1mm)即毫米波频段。2) 延拓定理。延拓香农定理的适用范围到多条并行通信链路中,提升频率的利用效率,此基础上还可以开展大规模多天线(Massive MIMO)技术。3) 开发技术。进一步减少每个小区的面积,布置更加密集的微型基站,使得频率资源可以被更多次复用,和其他无线技术一起形成更高密度的异质网络连接。

### 2.3 5G 通信基本特征

根据 IMT-2020 推进组对 5G 通信的基本要求,未来 5G 通信应该至少包含以下 5 个方面的基本特征,即高速率、高容量、高可靠性、低时延与低能耗,可简单概括为“三高两低”。

1) 高速率。5G 通信速率包含峰值速率、区域速率和边缘速率三方面指标,峰值速率是指最好条件下的最大速率,要求不低于 20Gbps;区域速率是指通信系统同时支持的总速率,一般用单位面积速率描述,较 4G 通信将提升 1000 倍以上;边缘速率(5%速率)是指最差的 5%分位数用户获取的通信速率,一般要求在 100Mbps 和 1Gbps 之间。电力服务面广,需要采集包括系统实时量测数据、视频监控数据等在内的海量数据,高速率为海量数据传输提供强有力支撑。

2) 高容量。传统 4G 通信所连的终端数量有限,一般以手机为主,而 5G 通信能够连接海量设备,每平方公里可以支撑 100 万个移动终端,包括家用电器、各种穿戴设备等,为真正实现电力系统中的万物信息互联提供了巨大的想象空间。

3) 高可靠性。5G 发送一个 32 字节的第 2 层协议数据单元的成功概率需要高达 99.999%,电力通信可靠性也将有效提升电力系统本身可靠性。

4) 低时延。通信时延是指信息从一端传输到另一端需要的时间,传统 4G 通信的时延在 50ms 左右,对于人与人之间的通话影响不大,而对于某

些工业应用场景并不适用。电力系统存在许多协同控制的场景，电力以光速传播，5G 通信空口时延达到 1ms，端到端时延小于 10ms，为电力系统及时灵活响应各种变化提供支撑。

5) 低能耗。如果传感器与通信设备需要经常更换电池或者充电，则会给万物互联的物联网带来极大阻碍。5G 通信通过优化通信硬件协议等而具备的低能耗特点将有效解决该问题。

5G 通信“三高两低”的特点与电力系统基本需求也是对应的，如表 1 所示。

5G 通信特点	电力系统需求
高速率	海量数据传输
大容量	万物信息互联
高可靠性	电力系统可靠性
低时延	灵活响应与协同控制
低能耗	电池寿命保障

### 3 5G 通信使能泛在电力物联网

5G 通信的“三高两低”特点与优势与电力系统的特点与需求具有较大的互补性。一般 5G 通信的应用场景主要包括增强移动宽带(enhanced mobile broadband, eMBB), 低时延高可靠通信(ultra reliable low latency communications, URLLC), 低功耗大连接(massive machine type communications, mMTC)3 个方面。特别地，对于泛在电力物联网，5G 通信将在万物互联、精准控制、海量量测、宽带通信、高效计算等 5 个方面将具有广泛的应用，如图 2 所示。



图 2 泛在电力物联网中 5G 通信应用场景

Fig. 2 Application scenarios of 5G communication in the ubiquitous electric Internet of Things

#### 3.1 万物互联

我国几乎实现了电力网络的全覆盖，电力网络末端连接成千上万个用电设备，让所有或者绝大多数电力相关实物实现信息互联将给电力系统带来无限想象空间。

将所有的家用电器互联，不仅能否实现每个家庭的智能家居，还能够协调不同的家庭，实现楼宇、小区甚至某个区域的集群智能用电；所有的电动汽车互联能够随时不仅为未来的充电桩的运营提供支撑，还能够打造智慧城市和智能交通；所有配变电装置互联能够实时监测、评估甚至预测电力系统未来的运行健康状态，保障整个配电系统的安全可靠运行。

需要指出的是，输电网层面主要由输变电设备构成，并且已经通过同步光纤实现了信息互联；但是配电网层面，在没有 5G 通信的时代，这最后一公里的信息互联互通走得尤其艰难，目前仅仅是电气物理连接，没有信息互联远远不够，而 5G 通信能够真正经济而高效地使能配电网，实现万物互联。

#### 3.2 精准控制

5G 通信在未来一个重要的应用领域就是无人汽车：一方面通信速率高，为智能车载系统提供稳定可靠的数据支撑；另一方面通信时延低，对于高速行驶的汽车，做出及时的刹车、转弯等决策关乎人身安全。与高速行驶的无人汽车相比，电力系统中的电力以光速传播，需要及时响应电力系统中的各种变化，实现精准控制。

在需求响应方面，传统需求响应主要是为了减小需求侧峰谷差，但随着高比例可再生能源并网，面向调频等更短时间尺度的动态需求响应显得尤为重要。海量用电设备之间的协调控制对通信低时延提出了要求，而 10ms 的通信时延能够很好满足秒级的调频需求。

在储能控制方面，不管在网端还是用户侧的储能安装量不断增加，储能等并网需要考虑不同储能系统之间的协调控制。此外，在像“云储能”“共享储能”这样全新的商业模式下<sup>[13]</sup>，储能的运营还需要考虑海量用户的差异化需求与互动，海量的控制信号交换需要在较短时间内完成。

在配电自动化方面，配电网可能会出现短路、断路等各种故障，这种情况下需要实现快速故障切除；此外，继电保护装置需要对信号进行综合分析，判断故障类型以做出正确动作。以差动保护为例，需要实时计算比较线路两端保护装置的量测值，如果两端量测存在较大时差，就有可能“差之毫厘谬以千里”。

在电力电子设备控制方面，未来配电网将接入越来越多的电力电子装置，以实现可再生能源接入、储能接入、无功补偿、电能质量改善等。电力

电子装置对控制精度要求较高, 特别是有时候需要 2 个甚至多个电力电子装置的分布式协调控制。

### 3.3 海量量测

在大数据时代, 采集海量多元化数据是开展大数据分析的基础。传统电力系统中, 虽然已经安装大量的传感器, 但限于通信压力, 很多数据只能舍弃仅保留最基本的信息, 细粒度信息的缺失极大制约了大数据分析在电力系统中的实际应用。此外, 5G 通信使得万物互联, 可以促进电力系统安装更多传感器, 实现更多元化的数据采集。

在海量用电数据采集方面, 我国虽然具有较高的智能电表普及率, 但很多智能电表并不上传半小时的用电数据, 仅保留每天的用电量, 为用户用电行为分析带来了挑战。5G 通信速率高, 能够实现海量用电数据的及时采集, 甚至包括某些更细粒度的家庭设备用电数据。非侵入式辨识技术在 20 世纪七十年代就开始研究, 但至今没有大范围的实用, 重要原因之一就是非侵入式辨识需要至少秒级的用电功率数据, 对于传统载波通信而言难以实施; 而 5G 通信时代使秒级甚至更细粒度的数据采集成为可能, 也为用电大数据分析、构建电力用户行为模型、促进广泛的用户互动提供了坚实的数据基础。

在电网运行状态监测方面, 目前对电网运行状态的监控主要是输电网络, 例如 PMU、SCADA 系统的安装, 但是对于配电网的监测较少。5G 通信较光纤通信成本较低, 也能保证通信的可靠性和实时性, 可以在配电网不同节点安装传感单元, 实时感知配电网的运行状态(电压幅值相角、注入有功无功等), 为配网拓扑辨识、潮流分析、参数估计等提供支撑。目前已有相关实践, 在配电网某些关键区域安装微型同步相角量测单元(micro-PMU), 为配电系统中的各种故障监测提供支撑, 这种情况下, 海量的 PMU 数据传输也需要 5G 通信的支撑。此外, 低时延的 5G 通信数据传输也为微型 PMU 的同步对时提供了新的机遇。

在电力设备状态监测方面, 变压器、配电线路等电气设备的健康运行是整个配电系统运行的重要保障。传统电力系统主要对高压设备运行状态进行检测, 而 5G 通信时代的泛在电力物联网中, 配电网中海量电力设备也将实现信息互联互通, 实时监测电力设备各项参数, 也感知外界环境(如温度等)的变化, 能够帮助调度决策者进行综合分析, 评估电力设备运行状态, 为电力设备检修安排等提供参考。

在电动汽车管理方面, 随着电动汽车普及率不断提高, 交通网和电力网的耦合程度不断提升, 如果海量电动汽车的出行规律、电池使用状态以及充电桩充放电等数据能够实时获取并交换, 对于车主和配电网运营商的最优决策也能提供帮助。

### 3.4 宽带通信

海量量测数据采集主要面向结构化的电气量等数据, 而在泛在电力物联网中, 还需要采集语音、视频等海量的非结构化数据, 以实现全方位的配电网感知和更优质的个性化服务。

在视频远程监控方面, 无人机巡检是一种高效的电力网络监测方式, 通过无人机拍摄电力线路或者设备的视频, 工作人员以此判断线路或者设备的健康状态。5G 通信能够高速率传输相应的视频通信, 优化决策者体验。除传统变压器、线路等需要巡视机器人或者无人机之外, 分布式光伏板、储能等装置的有时也需要进行视频监测, 获取对光伏板沾灰量、储能外部装置安全程度等信息, 便于开展清洗、加固等工作。5G 通信在未来物联网中一个典型应用就是远程医疗, 通过对病人身体指标各方面的量测以及视频监测, 医生能够开展远程诊断, 极大方便患者就医治疗。配电系统也是如此, 需要通过各方面海量量测以及视频监测, 配电网运营商等实现配电系统的“健康诊断和治疗”。

在电力虚拟现实方面, 一般来说, 虚拟现实就是通过视觉、通信、仿真等技术, 给使用者提供全新的视觉体验, 模拟真实环境, 实现更好的服务。虚拟现实对网络环境要求较高, 应为需要实时更新高清画质。而在 5G 通信时代, 泛在电力物联网也可以打造电力虚拟现实。例如为配电网运营商打造虚拟现实, 对量测到的海量数据以及视频进行处理, 展现配电网全景图, 还能够根据运营商选择不同区域了解其细节, 助力打造透明配电网。又如通过虚拟现实, 设计不同的仿真培训系统, 有针对性地对员工进行巡检、管理等进行各方面的培训, 减少实地考察环节, 节约成本。

### 3.5 高效计算

为了保证系统的安全可靠运行, 系统需要进行大量运算, 例如最优潮流计算、最优控制计算、稳定性计算等; 除此之外, 还有随着海量数据采集带来的大数据计算, 例如海量曲线聚类分析等。这些计算可能存在较高的时空复杂度, 需要高效的计算方法, 泛在电力物联网时代, 云计算和边缘计算将有广泛的“用武之地”。

在云计算方面，小型售电商或者用户不拥有大量的计算资源，此时可以通过云计算开展运营决策、智能家庭能源管理等，把计算任务搬到云端，通过 5G 通信保障计算便捷条件与计算结果的高效传递，从而实现各种控制。不同配电网参与主体还能够对自己的数据进行云存储，打造相应的数据云平台。

在边缘计算方面，由于数据本身就分布在不同节点，此时将所有数据集成到一个云端一方面必要性不大，另一方面也存在信息安全隐患。分布式的数据在边缘侧直接进行计算，通过不同边缘计算的协调获取全局结果。例如在多主体配电网中开展最优潮流分析或者电压控制时，可以设计相应的分布式优化算法，开展边缘计算，既提升效率，又保护隐私；又如海量用电数据存储在不同的数据中心，可以设计分布式聚类算法，通过边缘之间的通信迭代，获取全局聚类结果，实现海量用户用电模式的提取。

#### 4 支撑泛在电力物联网的 5G 通信关键技术

5G 通信技术促进了泛在电力物联网的纵深发展，如图 3 所示。面向电网业务需求，5G 的性能增强技术使得泛在电力物联网的万物互联蓝图成为现实；面向电网管理，5G 的软化开放技术是协助管理泛在电力物联网最得力的助手，电网由被动变主动，自由“掌控”通信；面向电网用户服务，5G 的自治优化技术给泛在电力物联网装上智能大脑，实现以用户为中心的新业态。本节将就 5G 通信时代泛在电力物联网关键的性能增强技术、软化开放技术、自治优化技术分别进行探讨。

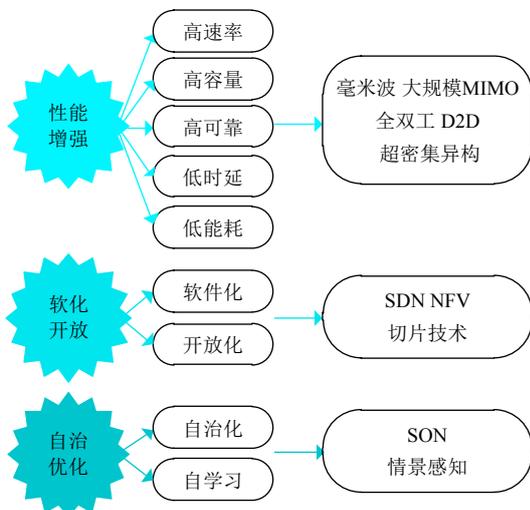


图 3 支撑泛在电力物联网的 5G 通信关键技术  
Fig. 3 Key technologies of 5G communication that support the ubiquitous electric Internet of Things

#### 4.1 性能增强技术

5G 通信助力泛在电力物联网的首要任务是达成其他无线通信方式所不能达到的高性能指标，使 5G 通信“三高两低”的特点成为现实并为泛在电力物联网所用。提升“三高两低”相关性能的无线通信技术和无线网络技术被统称为性能增强技术。

在性能增强技术中，某些技术有的被广泛研究讨论并且已经比较成熟，成为了 5G 必备的标准技术，可以被称为 5G 的原理性技术，如 2.1 节提到的毫米波通信技术、大规模 MIMO 技术和超密集异构网络技术；有的有着十分广阔的前景但还有技术瓶颈尚未有统一定论，例如全双工技术中有消除自干扰的问题、D2D(device to device)通信如何降低信号干扰的问题等。

性能增强技术的范围非常广泛，其原理也非常多样化。对泛在电力物联网来说，这些技术是网络通信层面的相对底层的技术，电网运营商仅仅是这些技术的使用者而很少参与细节的设计，并且电网运营商更希望的是成为通信网络的掌控者，对如何实现 5G 特点的技术关注较少。故不在此对这些技术进行赘述，具体技术细节可以参考 5G 技术的相关文献，例如文献[3,4,14]。

#### 4.2 软化开放技术

软化开放技术是指实现 5G 通信网络软件化并向网络用户开放接口的相关技术。泛在电力物联网并不是通信网络和电力网络的简单叠加，而是两者的有机融合，对两网能进行同时、方便、快捷地管理调度对于泛在电力物联网来说至关重要。传统的电力通信网控制复杂，需要具备专业人员操作运行，电网必须依托电信运营商，是网络功能的被动使用者，被封闭在通信网络之外。电网各项服务需要什么网络功能，网络随时间与空间有什么变化，都必须向通信运营商反映申请，这与泛在电力物联网的包容性相悖甚远。

无线通信网和计算机一样是一个拥有多层级的物理系统，较理想的情况是能像计算机那样拥有一个操作系统，不用考虑底层实现就能够达成控制的目的。参考计算机操作系统的原理，抽象出一个“网络操作系统”，这个抽象的操作系统抽象了底层网络设备的具体细节，还为上层应用提供了统一的管理视图和编程接口，使得用户可以定义逻辑上的通信网络拓扑而无需关心底层网络的物理拓扑结构。实现这些想法的技术被称为软件定义网络 (software-defined networking, SDN)<sup>[15]</sup>。在这基础上更进一步，利用通用的信息设备替代网络中的交换

机、路由器等网元,使得这些设备也可以随部署改变的技术叫做网络功能虚拟化(network function virtualization, NFV)<sup>[16]</sup>。泛在电力物联网利用 SDN 和 NFV,完成了从面对通信网络“晶体管”(网元等硬件设备)和“01 代码”(复杂的控制逻辑)到只面对通信操作系统的跨越。

给泛在电力物联网配上网络操作系统后,还需要提供相应的“应用程序”。电网的各种任务对性能有着差异化的需求,例如用电信息采集对连接数要求更高,配电保护对通信时延要求更高,5G 之前的通信为每一种不同业务使用相同的资源,这使得其很难满足一些比较严苛的需求(例如时延要求在 1ms 之内),然而为每一种差异需求都提供独立的资源成本巨大且操作复杂,那么使用同样的资源提供不同差异需求的服务变成了首选。切片技术使得这一想法成为现实,正如它的名字一样,其在相同通信物理设备和频谱资源下这块“蛋糕”上,通过虚拟化技术建立起完全切割的不同专有网络来形成切片<sup>[17-18]</sup>。有了切片,电网运营商可以在不同时间,不同空间面对不同的多样化业务使用不同的切割方法,实现按需定制、动态编排;电网在切片“应用程序”开放的管理操作功能上能进行交互管理界面的操作,可以实现真正的自助服务。

### 4.3 自治优化技术

实现以用户为中心的广泛互动,深入每一个用户是能源互联的目标。在拥有了软化开放技术后,虽然泛在电力物联网可以实现对通信网及电力网的系统控制,但对于用户来说通信网仍然是透明的、无感知的——网络资源的调度分配均依据电网核心网侧的业务需求。面对庞大的电网用户群,靠电网运营商来对每一个用户实时获取他们多样化的需求并对通信网作出调整的模式工作量太过巨大,但如果能够直接在通信网络 and 用户之间搭起一座桥梁,使得通信网络能够根据用户和业务自动调整而不再通过电网运营商这个中间摆渡人,问题就可以得到解决。

实现这个愿景的第一步是完成通信网络的自治。让我们构想这样一幅图景:智能家居或者其他新终端进入网络时,可以即插即用,所有的网络配置都能够自动安装到新接入设备上,实现“自配置”;当通信网络负载发生变化,根据已测无线电条件参数,通信网自动调整,实现“自优化”;当通信网络出现故障,它可以自己识别、消除,实现“自愈合”。将自配置、自优化、自愈合付诸现实的技术被称为自组织网络技术(self-organizing

network, SON)<sup>[19]</sup>。SON 技术早在 3G 时代就已经被提出,然而至今仍存在许多技术挑战,例如 SON 各个功能之间比较独立,可能会产生冲突,降低了 SON 的整体效果收益;此外,现有的 SON 是被动的“问题出现-问题发现-问题解决”的运作模式,等待问题并发现的时间增加了网络的固有延迟,无法满足 5G 的低延迟感知要求。5G 时代的 SON 将更会强调自治功能的协调性以及主动性,协调各个功能间的冲突,使得网络能够主动预测而不是被动等待。

在自治的基础上,5G 网络还可以实现对用户个性化的智能感知和适配。网络可以“自学习”,根据用户终端使用的历史数据(如使用状态、功耗、CPU 负载、业务类型、所处的位置),充分分析发掘用户的需求、习惯甚至心理状态,例如用户习惯在什么时间使用什么样的设备会产生怎样的数据流量等,再来根据学习到的知识对网络参数配置等进行优化。这项技术被称为情景感知技术<sup>[20-21]</sup>。

## 5 泛在电力物联网下 5G 通信的能效管理

5G 通信需要电网供能,由此泛在电力物联网也可以为 5G 通信提供能效管理的支持。本节先介绍 5G 通信能耗及能效管理的基本情况,然后在讨论 5G 通信网络与主动配电网的供需互动。

### 5.1 5G 通信能耗及其能效管理

无线通信系统耗电设备包括通信终端、通信基站以及核心网侧设备(例如数据中心、交换设备等)。一般来说,5G 的低功耗特性主要面对通信终端而言,通过降低发送和接收数据的频率、使用高效率电池等方式提高终端电池的待机能力,来达到延长电池寿命及降低更换频率的目的。

但实现终端设备的低功耗是远远不够的。随着 5G 时代超密集网络的部署,网络功能的“扁平化”和“下沉”是大势所趋。“扁平化”是减少网络的层级结构,合并一些网络元件为一个元件来简化信息传输的复杂度;“下沉”是指无线核心网侧的控制功能分发到各个边缘基站以期实现低时延。“扁平化”要求合并设备,而“下沉”要求功能分布化,那么 5G 时代核心网的功能势必大量分散到了基站,基站承担了较大部分的网络任务。实际上,据统计,现有通信系统中耗电量最大的就是通信基站,大约占整个网络耗电量的 70%~80%<sup>[22]</sup>。在 2012 年,世界上的无线通信网络拥有 110 万个基站,年消耗电量 140 亿 kW·h<sup>[23]</sup>。而在 5G 时代,预计基站部署密度将到现有部署密度的十倍以

上,在2025年达到1310万个基站,移动基站的能耗将达到2000亿kW·h<sup>[24]</sup>可以想象如果不提升基站通信的能效,泛在电力物联网运用5G时必须给基站供给较多的电力,使得电力网络的效率也会降低,故提升5G能效对于提升整个泛在电力物联网的效率来说非常重要。

5G通信网络基站能耗管理如图4所示。

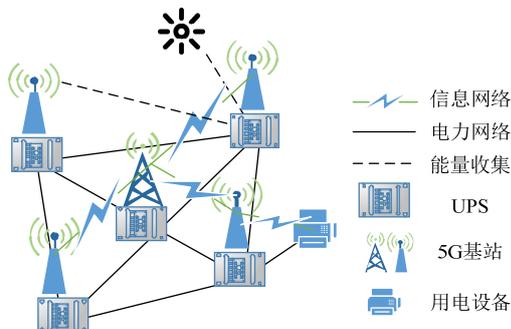


图4 5G通信网络基站能耗管理

Fig. 4 Energy management of the base stations in 5G communication network

通信能效在一般被定义为消耗每一焦耳能量可以可靠传输的比特数<sup>[25]</sup>。5G通信为了在与现有网络相同甚至比现有网络更低功耗的情况下实现1000倍的容量增长,那么基站能效也需要提高1000倍<sup>[26]</sup>,这么高倍数的能效提高要求促使了一系列的革新。

从5G基站硬件设备入手,直接让泛在电力物联网的硬件设备能耗得到优化是实现高能效的一大思路,由此,新的功率放大器、发射机-接收机模型、波束结构被相继提出<sup>[27-29]</sup>。

从5G基站功率分配入手,将泛在电力物联网中的5G基站的资源功率分配变为以能效最大化为。在满足不同的性能约束条件如数据吞吐量,系统容量,时延等,调整最优设置,以期达到网络效率的最优<sup>[30-32]</sup>。

从5G基站能量来源入手,使得泛在电力物联网中的5G基站设备能够直接从环境中获取能源或者重复利用多余的能源,避免从电力网获取大量能源对其功率传输造成影响。对应以上的两种思路,一是收集设备周围环境中的可再生能源,如风能和太阳能;二是收集设备周围的干扰无线电信号的能量。在能够有效收集能源的基础上,结合无线充电技术,有计划地定向地使得能量可以在各个通信基站之间重新分配,能够极大地提升能源分配的灵活性<sup>[33-36]</sup>。

## 5.2 5G通信网络与主动配电网供需互动

泛在电力物联网的通信网络与电力配电网存

在着能量与信息耦合:配电网为通信网络提供能源支撑,而通信网为配电网提供信息支撑,通信网络与主动配电网可以进行供需互动。

基站是通信网络与配电网互动的主要中介——对于通信网来说,它是无线信号发送和接收空中接口的主要设备,是无线信息传输的重要中转点;对于电力网来说,它是通信设备中消耗电力的绝对主力,且为了保证通信的实时性和可靠性配有不间断电源(uninterruptible power supply, UPS)并由此具有蓄电池,成为了用电设备和储能设备的双重集群。此外为了提高可靠性,基站密度和基站UPS使用冗余配置方法,基站个数和基站UPS电池的个数可能多于通信一般需求的个数。

在此种情况下,电网运营商可以和通信运营商进行一定程度的供需互动。例如,在夜晚时段,如果此时通信负载较少,有许多可以减小功率运行甚至可以关闭的基站,这时在保证整个系统可靠性和运行要求的前提下,充分利用众多这些基站的储能装置和冗余配置的储能装置,电网运营商给予电信运营商较低电价,而电信运营商响应低电价调整UPS电池的充放电负荷;在日间,保证可靠性的前提下,在电网电价较高的时段,电信运行商可以选择消耗掉冗余配置的电力。当然,由于通信对实时性、可靠性等有更高的要求,对5G通信的需求互动以及不间断电源的调度需要充分考虑5G通信的基本要求。

## 6 研究展望

泛在电力物联网的建设刚拉开序幕,5G通信时代也即将到来,5G通信时代下的泛在电力物联网将焕发更多生机,更好地促进电力和信息的互联互通。本节旨在给出给出几点未来可行的研究方向。

### 6.1 “5G通信网-电力网”联合仿真

电力仿真是电力系统分析的重要手段,能够帮助判断未来电力系统运行状态,判断提出的方案是否存在不安全、不可靠等潜在的风险。目前针对电力系统仿真,国内外厂家面向不同应用开发了多元化的电力系统仿真软件,例如PSCAD等;在通信领域,为了保证通信系统的安全可靠运行,在系统规划或运行之前可需要进行仿真分析,例如OPNET等。未来的泛在电力物联网是电力网络与通信网络进一步深度耦合的系统,对整个泛在电力物联网的分析需要开展5G通信网与电力网的联合仿真,需要研究新的联合仿真方法与软件系统,或者打通不

同仿真软件接口, 深入分析 5G 通信网与电力网之间的相互影响, 分析某一个网络扰动对自身网络以及另一网络的影响与互动机理。

## 6.2 “5G 通信网-电力网”联合优化

5G 通信系统虽然单位功耗低, 但是由于未来通信量急剧增加, 所以 5G 通信系统功耗可观。泛在电力物联网需要为分散的不同型号的 5G 通信基站提供可靠的电力保障, 也意味着通信网络与电力网络能够开展能量上的交换, 实现供需互动, 存在 5G 通信网与电力网的联合电力流优化控制与规划的可能性。此外, 5G 通信虽然能实现万物互联, 但是电力系统可能存在薄弱的部分, 或者对通信需求较大较高的地方, 此处的通信系统可能需要进一步加强, 所以也需要结合实际开展 5G 通信网与电力网的联合信息流优化控制与规划的研究。

## 6.3 “5G 通信网-电力网”安全与隐私

5G 通信虽然具有“三高两低”的优势与特点, 但万物互联也给通信安全与隐私带来了挑战。5G 通信的建设与实施也将充分考虑未来信息安全挑战。而对于泛在电力物联网而言, 信息安全与隐私显得尤为重要。例如电力系统中有些数据关乎电网安全稳定, 具有较高的安全级别, 需要设置较高的保密级别; 又如用户用电数据关乎用户隐私, 在数据传输和交换过程中, 需要对不同的对象设置不同的数据获取权限, 在保护不同参与主体隐私的情况下实现数据共享。总之, 未来泛在电力物联网将采集传输海量数据, 需要界定好数据密级, 明确好数据归属, 赋予好数据权限, 实现 5G 通信网与电力网的安全与隐私。

## 6.4 复杂多级多对象控制与优化

泛在电力物联网的万物互联不是为了简单地将电力相关实物通过电力网和通信网将连接起来, 而是在此基础上采集海量数据、分析设备运行状态, 进而优化控制海量对象。未来泛在电力物联网所连万物是复杂多级多对象, 传统的小规模控制与优化算法不能够实现如此广域控制, 需要研究先进的分层、分布式等优化算法, 实现海量对象的即时最优控制, 使所连万物相互协调。

## 6.5 透明配电网与态势感知

安装海量传感器并通过 5G 通信网络连接万物就是为了对泛在电力物联网的运行状态进行实时感知, 特别是目前对配电网监测不足, 使得其可观性不强。例如分布式光伏出力不能直接量测得到, 只能获取智能电表的“净负荷”数据; 又如配电网闭环设计开环运行, 存在拓扑变化的情况以适应不

同的配电网运行状态, 由于某些管理原因, 配电网运营者不能够实时获取其拓扑信息。5G 通信时代下的泛在电力物联网有望基于海量数据的采集, 进行大数据分析和可视化, 实现配电网的透明化与实时态势感知。

## 6.6 多元化的商业模式

5G 通信新技术的助力, 将在泛在电力物联网中孕育出全新的商业模式, 也让之前难以落地的商业模式成为可能。例如可交易能源(transactive energy)环境下实现个人对个人(peer to peer, P2P)交易, 5G 通信的端对端通信技术就能使 P2P 交易成为可能, 交易通信成本极大降低; 又如虚拟电厂技术, 5G 通信助力海量对象的协调, 保障虚拟电厂的可行性。

## 7 结论

2019 年是泛在电力物联网的元年, 为未来能源互联网建设提出了更加明确的目标; 2019 年也是 5G 通信规模化商用揭开序幕的一年, 5G 通信将重塑未来生活方式, 也将重塑“物理-信息-社会”深度耦合的电力与能源系统。本文在深入分析泛在电力物联网内涵与 5G 通信特点基础上, 对 5G 通信时代的泛在电力物联网关键技术进行了分析, 总结了 5G 使能泛在电力物联网的典型场景, 探讨了泛在电力物联网如何支撑 5G 通信系统, 展望了未来 5G 通信普及的泛在电力物联网可能的研究方向。希望本文能够为泛在电力物联网研究者对 5G 通信技术及其应用的研究提供参考。

## 参考文献

- [1] 关于推进“互联网+”智慧能源发展的指导意见[EB/OL]. (2016-02-29). [http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c\\_135141026.htm](http://www.nea.gov.cn/2016-02/29/c_135141026.htm).
- [2] 国家电网《泛在电力物联网建设大纲》正式发布[EB/OL]. (2019-03-11). <http://www.chinasmartgrid.com.cn/news/20190311/632172.shtml>.
- [3] Stojkoska B L R, Trivodaliev K V. A review of Internet of Things for smart home: challenges and solutions[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017(140): 1454-1464.
- [4] 2020 年 5G 通信有望正式商用[EB/OL]. (2018-07-01). [http://www.xinhuanet.com/fortune/2018-07/01/c\\_1123060983.htm](http://www.xinhuanet.com/fortune/2018-07/01/c_1123060983.htm).
- [5] 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.
- [6] Andrews J G, Buzzi S, Choi W, et al. What will 5G be?[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2014, 32(6): 1065-1082.
- [7] Tayeb S, Latifi S, Kim Y. A survey on IoT communication and computation frameworks: an industrial perspective[C]//2017 IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and

- Conference(CCWC). Las Vegas, NV, USA: IEEE, 2017: 1-6.
- [8] ISO/IEC JTC 1, Internet of Things(IoT)[R]. Switzerland: International Organization for Standardization, 2014.
- [9] White paper IoT 2020: smart and secure IoT platform[EB/OL]. (2016-10-01). <https://www.iec.ch/whitepaper/iotplatform/>.
- [10] ITU-T Study Group 13, next generation networks-frameworks and functional models: overview of the internet of things[R]. Switzerland: International Telecommunication Union, 2012.
- [11] 田园, 司伟生, 韩瑜. 计算机网络基础: 因特网协议原理与实现[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [12] Hartley R V L. Transmission of information[J]. Bell System Technical Journal, 1928, 7(3): 535-563.
- [13] 康重庆, 刘静琨, 张宁. 未来电力系统储能的新形态: 云储能[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 2-8, 16.  
Kang Chongqing, Liu Jingkun, Zhang Ning. A new form of energy storage in future power system: cloud energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 2-8, 16(in Chinese).
- [14] Yifei Y, Longming Z. Application scenarios and enabling technologies of 5G[J]. China Communications, 2014, 11(11): 69-79.
- [15] Nunes B A A, Mendonca M, Nguyen X N, et al. A survey of software-defined networking: past, present, and future of programmable networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(3): 1617-1634.
- [16] Matias J, Garay J, Toledo N, et al. Toward an SDN-enabled NFV architecture[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(4): 187-193.
- [17] Zhang H, Liu N, Chu X, et al. Network slicing based 5G and future mobile networks: mobility, resource management, and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(8): 138-145.
- [18] Foukas X, Patounas G, Elmokashfi A, et al. Network slicing in 5G: survey and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(5): 94-100.
- [19] Ramiro J, Hamied K. Self-organizing networks: self-planning, self-optimization and self-healing for GSM, UMTS and LTE[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2011.
- [20] Imran A, Zoha A, Abu-Dayya A. Challenges in 5G: how to empower son with big data for enabling 5G[J]. IEEE Network, 2014, 28(6): 27-33.
- [21] Chen M, Zhang Y, Li Y, et al. EMC: emotion-aware mobile cloud computing in 5G[J]. IEEE Network, 2015, 29(2): 32-38.
- [22] Ghazzai H, Yaacoub E, Alouini M S, et al. Optimized smart grid energy procurement for LTE networks using evolutionary algorithms[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(9): 4508-4519.
- [23] Chih-Lin, Rowell C, Han S, et al. Toward green and soft: a 5G perspective[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(2): 66-73.
- [24] Johnson D. The 5G dilemma: more base stations, more antennas—less energy? [EB/OL]. (2018-08-03). <https://spectrum.ieee.org/energywise/telecom/wireless/will-increased-energy-consumption-be-the-achilles-heel-of-5g-networks>.
- [25] Saraydar C U, Mandayam N B, Goodman D J. Pricing and power control in a multicell wireless data network[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2001, 19(10): 1883-1892.
- [26] Buzzi S, Chih-Lin I, Klein T E, et al. A survey of energy-efficient techniques for 5G networks and challenges ahead[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2016, 34(4): 697 - 709.
- [27] Joung J, Ho C K, Adachi K, et al. A survey on power-amplifier-centric techniques for spectrum- and energy-efficient wireless communications[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(1): 315-333.
- [28] Dai L, Gao X, Wang Z. Energy-efficient hybrid precoding based on successive interference cancelation for millimeter-wave massive MIMO systems[C]// 2015 IEEE Radio and Antenna Days of the Indian Ocean(RADIO). Mauritius: IEEE, 2015: 1-2.
- [29] Han S, Chih-Lin I, Xu Z, et al. Large-scale antenna systems with hybrid analog and digital beamforming for millimeter wave 5G[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(1): 186-194.
- [30] Hossain E, Bhargava V K, Fettweis G P. Green radio communication networks[M]. Cambridge: Cambridge University Press.
- [31] Auer, Giannini, Desset, et al. How much energy is needed to run a wireless network?[J]. IEEE Wireless Communications, 2012, 18(5): 40-49.
- [32] Bacci G, Luise M, Poor H V, et al. Energy efficient power control in impulse radio UWB wireless networks[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(3): 508-520.
- [33] Energy harvesting wireless communications: a review of recent advances[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(3): 360-381.
- [34] Lu X, Wang P, Niyato D, et al. Wireless networks with RF energy harvesting: a contemporary survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2015, 17(2): 757-789.
- [35] Huang K, Larsson E. Simultaneous information and power transfer for broadband wireless systems[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(23): 5972-5986.
- [36] Krikidis I, Timotheou S, Nikolaou S, et al. Simultaneous wireless information and power transfer in modern communication systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2014, 52(11): 104-110.



王毅

收稿日期: 2019-04-09。

作者简介:

王毅(1992), 男, 博士后, 通信作者, 主要从事电力大数据、综合能源系统、5G 通信的研究工作, E-mail: yiwang@eeh.ee.ethz.ch;

陈启鑫(1982), 男, 副教授, 研究方向为低碳电力技术、电力大数据、能源互联网、电力市场、环境调度等, E-mail: qxchen@tsinghua.edu.cn;

张宁(1985), 男, 副教授, 研究方向为可再生能源并网、多能源系统、光热发电等, E-mail: ningzhang@tsinghua.edu.cn;

康重庆(1969), 男, 教授, 研究方向为电力规划与运行、可再生能源、负荷预测、低碳电力技术等, E-mail: cqkang@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 徐梅)