

# 支撑虚拟电厂互动的信息通信关键技术研究展望

李彬<sup>1</sup>, 郝一浩<sup>1</sup>, 祁兵<sup>1</sup>, 孙毅<sup>1</sup>, 陈宋宋<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 电气与工程学院, 北京市 昌平区 102206; 2. 需求侧多能互补优化与供需互动技术北京市重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

## Key Information Communication Technologies Supporting Virtual Power Plant Interaction

LI Bin<sup>1</sup>, HAO Yihao<sup>1</sup>, QI Bing<sup>1</sup>, SUN Yi<sup>1</sup>, CHEN Songsong<sup>2</sup>

(1. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Changping District, Beijing 102206, China; 2. Beijing Key Laboratory of Demand Side Multi-energy Carriers Optimization and Interaction Technique (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** Demand side resources (DSR), including the distributed power generation, have gradually become an indispensable part of the power system. The virtual power plant (VPP) can effectively integrate all kinds of DSRs, and give full play to its great potential in the power auxiliary service. The efficient and reliable operation of the VPP and the internal flexible interaction between the different subjects rely on the advanced information and communication infrastructure. Starting from the basic concept and the characteristics of the VPP and the practical cases at home and abroad, the basic communication architecture and the performance requirements of the VPP are analyzed. Then, several key technologies of the information communication supporting the flexible interaction of the VPP are discussed. In addition, its applications in the future VPP are also considered, the purpose of which is to provide solutions for improving the flexible interaction level of the VPP and maximizing the advantages of the DSR resources.

**KEY WORDS:** virtual power plant; demand side resources; edge computing; D2D communication; delay control

**摘要:** 包括分布式电源在内的需求侧资源(demand side resource, DSR)逐渐成为电力系统中不可或缺的重要组成部分, 虚拟电厂(virtual power plant, VPP)可以有效整合各类DSRs, 并充分发挥其在电力辅助服务中的巨大潜力。VPP的高效可靠运行和内部各主体间的灵活互动依赖于先进的信息通信基础设施, 该文从VPP的基本概念、特性和国内外实践案例出发, 对VPP基本通信架构和通信性能需求进行了分析, 最后重点对支撑VPP灵活互动的几种信息通信关键技术进行探讨, 并针对其在未来VPP中的应用思路 and 理念做出了思考, 旨在为提升VPP灵活互动水平以最大限

度发挥DSR资源的优势提供解决方案。

**关键词:** 虚拟电厂; 需求侧资源; 边缘计算; D2D通信; 时延控制

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1073

## 0 引言

构建新型电力系统、提升需求响应(demand response, DR)<sup>[1-2]</sup>能力和能源转型升级是当今能源领域和电力系统发展的主题<sup>[3]</sup>。传统的电力系统以同步电源为主、电源少负荷多, 呈现“源随荷动”的整体特征, 新型电力系统实现电源结构从以同步电源为主向以新能源为主体的转变<sup>[4]</sup>。风力发电、光伏发电、生物质发电等可再生能源所具有的分散性、随机性、波动性、间接性等特征为能源结构的转型升级提出巨大挑战<sup>[5]</sup>。

近年来我国清洁能源发电量占比持续上升, 可再生资源的开发利用规模位居世界前列<sup>[6]</sup>。2020年我国风电和光伏发电总量达到7270亿kW·h, 较2019年分别增长15.1%和16.6%, 占总发电量比重达9.5%<sup>[7]</sup>。伴随着新能源发电规模不断扩大, 新能源消纳对电力系统提出了一系列要求与挑战, 要求电力系统需要具备更高的调峰调频能力以及对电源系统的灵活调控能力。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)是解决能源转型过程中实际问题的重要手段, 在提高能源可持续发展和保障电网安全稳定运行方面具有巨大潜力<sup>[8]</sup>。VPP融合大数据、云计算、区块链、人工智能、以及先进信息通信技术, 将分散的新能源发电设施、储能装置、可调负荷及DR设施进行聚合优化管控, 实现源网荷储一体化调节, 并参与电网调峰调频和电力市场交易, 实现发电侧与用电侧的双侧调节。在标准化方面,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目“可再生能源接入下的大规模负荷感知模型及调控策略研究”(51777068)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China “Research on Large-scale Load Perception Model and Regulation Strategy Under Renewable Energy Access” (51777068).

国际电工委员会 (international electrotechnical commission, IEC) 分布式电力能源系统分技术委员会 IEC SC8B 正在进行《Use cases》和《Architecture and Functional Requirements》两项虚拟电厂国际标准的制定工作<sup>[9]</sup>；中国智能量测产业技术创新战略联盟制定了能源控制器相关的一系列标准，包括 VPP 能源控制器的功能模组技术规范、软件及接口规范和功能模组检验技术规范，为未来 VPP 发展提供标准化支撑。

为保障和支持虚拟电厂的建设和发展，我国发布了一系列相关政策和措施。在国家能源局印发的《2021 年能源监管工作要点》(国能发监管〔2021〕2 号)中明确提出要积极推动 VPP、储能等新兴市场主体参与辅助服务市场。2021 年，国家发展改革委、国家能源局发布《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》，其中强调了要增强源网荷储各环节间的协调互动，依托先进的数字信息技术，并利用虚拟电厂的一体化管理模式和灵活调节能力，促进我国能源转型升级进程。国家电网公司积极响应国家相关政策，提出“碳达峰、碳中和”行动方案和实施路径<sup>[10]</sup>，大力支持和发展分布式电源和微电网，预计 2025 年分布式光伏装机容量达到 1.8 亿 kW。数字赋能的 VPP 将在提升系统协调能力、优化电网调度运行等方面发挥重大作用，为“碳达峰”赋能。本文基于目前的 VPP 发展和实践现状，分析了当前 VPP 通信系统架构和通信性能，提出和探讨了边缘计算与分布式云、D2D 通信、时延控制技术等信息通信技术在支撑 VPP 灵活互动中的应用与展望。

## 1 VPP 概述及实践

### 1.1 VPP 的概念及聚合特性

对于 VPP 的概念目前还没有官方统一的定义，文献[11]认为 VPP 是一个分布式能源聚合后的术语，目的是使分布式能源看作成一个较大的发电厂；在文献[12]中，VPP 被定义为分布式的发电机组和储能设施的集群，它们被聚合后可作为一个小型发电厂运行；文献[13]将 VPP 描述为分布式电源、储能、可控机组、负荷、电动汽车等分布式能源的聚合，其既作为电力系统中的一个可调度单元，也可作为电力市场中的可交易单元。本文认为，VPP 是以先进的信息通信技术为基础，实现各类型用户负荷、分布式光伏、分布式储能等需求侧资源 (demand side resource, DSR) 的高效互联互通，通过分布式与动态聚合的管理模式参与电网调控与电

力市场交易，最终实现资源的高效整合优化，是构建以新能源为主体的新型电力系统的重要实现路径。通常将 VPP 划分为商业型 VPP (commercial VPP, CVPP) 和技术型 VPP (technical VPP, TVPP) 两种类型<sup>[14]</sup>。CVPP 主要实现 DSR 的商业聚合，其职能是向能源市场投标和报价。TVPP 一般向配电系统运营商服务，对本地系统进行管理，TVPP 要求 DSR 的地理位置相对集中以便于提供对各类负荷的监测。

DSR 相比传统能源具有灵活、环保、靠近用户等优点，但其地理位置分散、具有较强的不确定性和异构性<sup>[15]</sup>。VPP 通过对 DSR 的协调控制管理<sup>[16]</sup>，可充分挖掘其在削峰调峰<sup>[17]</sup>、新能源消纳<sup>[18]</sup>等方面的潜力，为城市可持续性发展做出贡献。VPP 对 DSR 的聚合不是简单的所有 DSR 的集合，如图 1 所示，地理位置分散的 DSR 在种类、灵活性和参与的 VPP 业务都具有一定的差异。

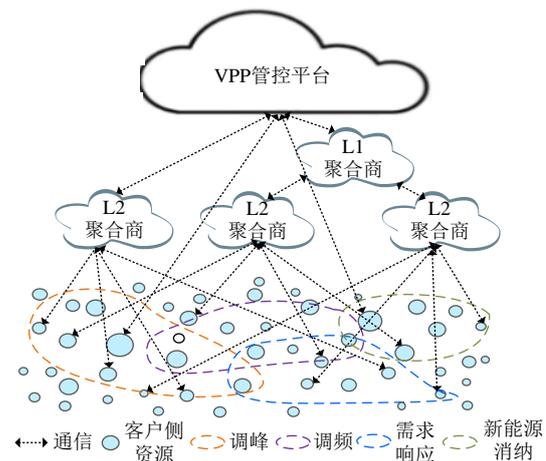


图 1 VPP 对 DSR 的聚合

Fig. 1 DSR aggregation in VPP

VPP 实现对 DSR 运行优化管理是基于对其聚类特性、灵活性特征等信息的掌握<sup>[19]</sup>，因此为便于实现对 DSR 的管控，VPP 需要对 DSR 进行聚类分析，将具有相似特征的 DSR 进行聚合和分类，通过分类聚合建模的方式引导和控制 DSR 参与各类服务。这种分类聚合方式不是一种固定的聚合模式，而是根据电网和 VPP 调度中心的实时需求而实施的一种动态聚合。区域内的 DSR 资源在某一时段并非同时参与聚合，而是根据 VPP 云平台实时计算出当前时段或业务所需参与调度的 DSRs 并建立通信连接。建立通信连接的方式主要有 2 种，一种是 VPP 平台直接与对应 DSR 建立通信连接，适用于大型工商业用户这类大用户；另一种是通过第三方云平台或聚合商间接建立通信连接，适用于分散的小型 DSRs。

## 1.2 VPP 实践项目与案例

近年来国内各地积极响应国家政策和电网公司的号召,相继发布适应本地现状的VPP相关政策<sup>[20-22]</sup>,并开展虚拟电厂实践示范,取得了一定的成效。江苏省构建大规模源-网-荷友好互动控制系统,并在2018年实现260万kW规模的全省覆盖<sup>[23]</sup>。该套系统通过对负荷的精准控制,可实现电力用户与电力系统的协同运作。2021年2月,江苏进一步开展可调负荷参与辅助服务市场试运行,引导具备条件的用户侧资源参与辅助服务市场交易,本次辅助服务市场试运行中,累计实现430万kW·h的新能源消纳量的提升,江苏已可实现虚拟电厂常态化参与电力辅助服务市场交易的新阶段。浙江成功打造国内单次响应中响应体量最大的需求响应平台,大力建设多元融合高弹性电网。2020年7月浙江汇集居民负荷、储能设施、商业楼宇等多种负荷类型实施需求响应,包括高压客户和部分低压客户共400万户参与响应<sup>[24]</sup>,缓解迎峰度夏期间用电紧张局势。上海黄浦区是具有超过200座大型商业建筑的中心城区,聚集了以空调为主的商业负荷使用电峰值达到约500MW,是该地区最大的、最具潜力的需求响应可调资源<sup>[25]</sup>。因此上海开发了以大型商业建筑为主要调控对象的VPP调度运营管理体系,整体的负荷调节能力能够达到约5万kW。2020年6月,上海成功实施了多类型主体参与(共2942家电力客户和7个负荷聚合商)的虚拟电厂广域综合响应,实现零散化可调资源的聚合及协调优化控制<sup>[26]</sup>。冀北地区打造涵盖多种工商业可调负荷和可中断负荷,促进新能源消纳和需求响应市场交易的智能VPP管控平台<sup>[27]</sup>。该平台支持工商业可调负荷、储能设施、电动汽车充电站、分布式光伏发电等资源的实时接入与控制。2021年3月,冀北调度所储备的可调节负荷资源参与华北调峰辅助服务市场,试运行时长达到168h,单日填谷负荷最高达4.2万kW,累计实现超过160万kW负荷量的实时调控<sup>[28]</sup>。除以上几种国内典型VPP实践外,国内其它地区如山西、广东等积极打造汇聚多种负荷类型的需求响应资源池,参与电力辅助服务市场交易,实现调峰调频及源网荷友好互动。

在国外,丹麦在Bornholm岛正在建设以沼气、生物质发电、风电为主的分布式资源参与的VPP系统<sup>[29]</sup>,VPP由中央控制室负责部分岛屿的配电网和供热设施,它采用分布式垂直拓扑控制结构并基于VPP组件收集的天气、电能质量要求、优化约束条件和目标等数据实现DSR的协调。瑞士ABB公

司致力于为客户提供VPP的控制与优化解决方案,其开发的Optimax平台<sup>[30]</sup>包括不可控负荷预测、新能源发电和市场交易3个模块,可有效对分布式发电的管理和调度进行优化控制。美国AutoGrid公司致力于发展储能系统的VPP平台,其在法国部署的AutoGrid Flex VPP平台具备灵活的管理系统<sup>[31]</sup>,实现法国最大储能项目Total SE的实时(<500ms)管控和频率调节,并可引导其参与欧洲电力辅助服务市场。德国虚拟电厂运营商Next Kraftwerke开发了一种产品名为NEMOCS的VPP解决方案<sup>[32]</sup>,该软件平台采用模块化设计,可提供电力业务优化、VPP构建、分布式资源的调度、需求响应的实施等功能。整理国内外VPP实践案例如表1所示。

表1 国内外VPP实践案例  
Table 1 VPP practice cases at China and abroad

| 地区/公司              | 主要应用场景             | 主要响应资源               | 特点                      |
|--------------------|--------------------|----------------------|-------------------------|
| 江苏                 | 需求响应、<br>新能源消纳等    | 可中断/可调节<br>负荷        | 源-网-荷控制系<br>统、国内规模最大    |
| 浙江                 | 需求响应、<br>削峰填谷等     | 储能设施、充电桩、<br>居民、楼宇等  | 国内单次响应<br>体量最大          |
| 上海                 | 商业楼宇能源管<br>理、削峰填谷等 | 工商业负荷/<br>储能等        | 以商业楼宇<br>为主的VPP体系       |
| 冀北                 | 新能源消纳、<br>广域需求响应等  | 光伏/电采暖等              | 多主体参与                   |
| 丹麦                 | 可再生能源<br>安全运营      | 沼气/风电/光伏<br>发电/电动汽车等 | 利用岛上生物质<br>发电潜力         |
| ABB                | 新能源发电与<br>并网       | 新能源/分布式<br>发电设施      | Optimax 平台              |
| AutoGrid           | 分布式储能管理<br>与参与市场   | 分布式光伏                | AutoGrid Flex VPP<br>平台 |
| Next<br>Kraftwerke | 各种VPP业务<br>和解决方案   | 分布式电源、<br>可调节负荷      | NEMOCS 平台               |

国外VPP互动大多依赖于公用通信网络,国内方面除运营商的4G/5G公网外,还拥有自己的电力光纤专网和电力无线专网,且VPP业务复杂、DSR种类丰富、能源结构复杂,部分业务对VPP互动过程的时延、可靠性等要求较高。

## 2 VPP 互动架构与性能分析

### 2.1 VPP 通信架构

通信系统是VPP的关键要素之一,先进和完善的的信息通信技术(information and communication technology, ICT)和标准化的协议为VPP实现对DSR的监控、数据的快速汇聚和传输、海量智能终端的互联和数据管理、提高VPP互动水平和数据交换提供技术支撑。如图2为VPP通信网络架构示意图,VPP内部的通信系统具有分层体系结构,即感知(终端)层、接入层、骨干层和平台层,并提供安全可靠通信协议。

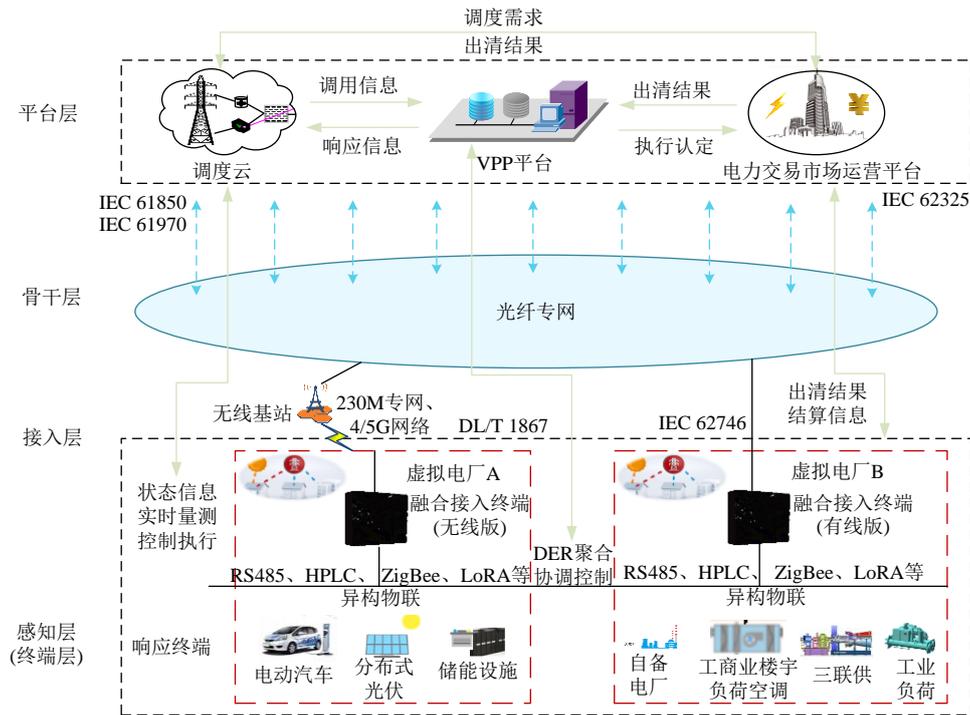


图 2 VPP 通信网络架构

Fig. 2 Communication network architecture of VPP

感知(终端)层主要由 VPP 数据采集终端和 DSR 控制终端等组成，包括电动汽车、分布式光伏、储能设施、楼宇负荷等 DSR。接入层的主要的通信设备包括接入终端、汇聚路由器、网关等，负责对管辖区域内 DSRs 的数据汇聚、清洗和上传，接入层向下采用多种通信规约与 DSR 建立通信连接并适配各类型的感知设备，向上则可采用多种通信方式包括光纤、230M 无线专网、4G 或 5G 等将业务数据信息上传和转发，因此需要在接入层完成对异构终端的统一接入。骨干层即 VPP 通信系统的通信骨干网络，主要采用光纤通信和以太网通信技术，承载多个平台和系统的互联互通，实现 DSR 资源的各种状态数据量和控制操作信息的实时交互。平台层基于人工智能、大数据等技术通过软件平台对分散的 DSR 进行负荷预测和动态聚合管理，利用云边协同实现资源的高效利用和多个 DSR 系统之间的协调调度，以及引导 DSR 参与电力市场报价和交易。VPP 通信系统协议可在现有的协议基础上进行扩展，DL/T 1867、OpenADR2.0、IEC 62325、IEC 61970 和 IEC 62746 等现有的高可靠性、可扩展性通信协议均适用于 VPP 通信系统。

### 2.2 VPP 通信系统性能与需求分析

可靠、安全的 VPP 互动和操作需要建立在能够提供足够的服务质量(quality of service, QoS)要求的通信系统之上，较低的通信性能可表现为 VPP 操作数据丢失或 DSR 的控制不可靠，阻碍 VPP 的运作。

文献[33]指出并分析了非理想通信情况下 VPP 通信网络的通信时延、信道噪声和时变拓扑对整个系统运行和经济效益的影响。VPP 通信系统中的 QoS 参数为通信性能评估提供必要的信息<sup>[34]</sup>，通过监控 VPP 运行期间的通信时延、丢包、带宽等指标来最小化通信故障的发生概率。不同的电力业务和应用对通信 QoS 的要求也不同，如表 2 所示，带宽和时延是保障 VPP 通信质量的关键参数，所需带宽与信息交互的数据量相关，表中数据为结合实际情况估算出的结果。

| 表 2 VPP 典型业务通信指标                                     |   |            |                              |
|--|---|------------|------------------------------|
| Table 2 Typical service communication metrics of VPP |   |            |                              |
| VPP 业务   | 带宽  | 时延         | 可靠性                          |
| 调频   | 按 100/km <sup>2</sup> 个终端<br>估算：4.8Mbps                 | <50ms      | 一次调频 99.999%；<br>二次调频 99.99% |
| 调峰   | 按 100/km <sup>2</sup> 个终端、<br>秒级上报、分钟级<br>控制估算：0.82Mbps | <6s        | 99.99%                       |
| 紧急需求<br>响应   | 按 100/km <sup>2</sup> 个终端<br>估算：16Mbps                  | <50ms      | 99.999%                      |
| 常态需求<br>响应   | 按 150/km <sup>2</sup> 个终端、<br>轮询机制、分钟级上<br>报估算：2.74Mbps | 500~1100ms | 99.999%                      |
| 清洁能源<br>消纳   | 按 150/km <sup>2</sup> 个终端<br>估算：2.74Mbps                | <3s        | 99.99%                       |
| 电力市场<br>交易   | 按交易成员 1000 个<br>估算：1.33Mbps                             | <10s       | 99.99%                       |

在通信网络中，大带宽并不能完全解决通信时延问题，网络堵塞、网络拓扑结构等问题都会导致时延的增加，较高的丢包率会引发数据重传机制，

也会进一步增加时延。VPP 内部的数据交换主要集中在发生在事件或业务的发起时段,通信时延除了上行和下行的通信链路外,还包括 VPP 业务层面的处理时延、远程终端单元的处理时延和 DSR 的激活时间。针对数量基数大、分布广的小型用户或终端,蜂窝无线通信是相对经济易行的接入手段,加上国内部分地区的无线专网<sup>[35]</sup>建设,无线和有线通信融合接入是当前终端侧通信网的现状。对 DSR 资源的监视和控制所产生的实时数据量很大,需要大量频谱资源,因此针对不同业务和场景对无线频谱进行合理分配<sup>[36]</sup>也是一种提高通信质量和降低时延的重要优化方式。文献<sup>[37]</sup>利用多用户多通道认知无线电的动态划分模型实现动态频谱分配,但该方法只适用于电动汽车的 V2G 通信调度,不具备通用性。此外,提高 VPP 的灵活性需要 VPP 系统具备较高的横向和纵向协调能力<sup>[38]</sup>,这同样要求系统各部件间拥有较高的通信和信息处理能力。

VPP 的运行控制结构主要可分为集中控制结构、集中—分散控制结构、完全分散控制结构<sup>[39]</sup>。其中,集中控制结构由 VPP 控制中心掌握所有 DSR 的信息,并统一由控制中心控制运行,这意味着将有巨大的通信流量汇聚,无法满足未来 DSR 快速增长的需求;集中—分散控制结构则是将 VPP 控制架构分为两个层级,可将 VPP 运行控制中心的一部分功能下沉到本地 VPP 控制中心,并有效缓解流量压力,但这种本地化控制方式的整体协调性依然较差;完全分散的控制结构将 VPP 划分为多个互相通信与协调调度的智能子系统,并且各个子系统间互相影响,通过先进的信息通信技术提升整体协调性后可做出最佳调度与控制决策,这也是未来的发展趋势。针对以上分析,本文将 VPP 在参与电网互动运行过程中的需求总结如下:

1) 是对分布式智能控制架构的需求,未来的发展要求既要完成 VPP 的分布式控制以缓解流量压力,也要在 VPP 子系统内实现智能化、自治化控制管理。

2) 是对分布式智能代理间的横向协调能力的需求。未来 VPP 除了要实现本地自治外,还应该具备区域规模化自治能力,这需要智能代理间的横向互动能力。

3) 是对端到端的时延控制的需求。未来新型电力系统下的 VPP 担负着电网稳定性和安全性的责任,需要实现 DSR 的精细化控制与各系统间的低时延通信。

因此,本文针对以上需求分别展开边缘计算、

D2D 通信、时延控制技术等在未来 VPP 中的应用研究,并对以上技术在未来 VPP 中的应用与发展趋势提出了一些观点和展望。

### 3 虚拟电厂信息通信关键技术

#### 3.1 边缘计算与分布式云

边缘计算<sup>[40]</sup>能够有效应对海量智能终端的接入与互联所带来的一系列网络带宽和延迟瓶颈问题,结合人工智能、大数据等先进技术手段可实现电力业务数据的本地化处理,已有学者提出了一些边缘计算在电力供需领域和需求响应部分场景中的应用构想<sup>[41-42]</sup>。在 VPP 中,边缘计算可看作靠近能源终端和数据源头的分布式智能代理<sup>[43]</sup>。如图 3 所示,云平台不需要直接掌握 DSR 的全部信息,将数据的处理和计算任务卸载到网络边缘侧的智能代理,智能代理通过监控系统、能量管理系统(energy management system, EMS)、能源控制器(energy control and monitoring terminal unit, ECU)等完成对 DSR 资源的状态监测、感知和采集任务,采集和感知的对象既包括 DSR 资源的电气、环境等一次参量采集,同时也包括需求侧可调节潜力、用户用电行为等二次参量的感知。

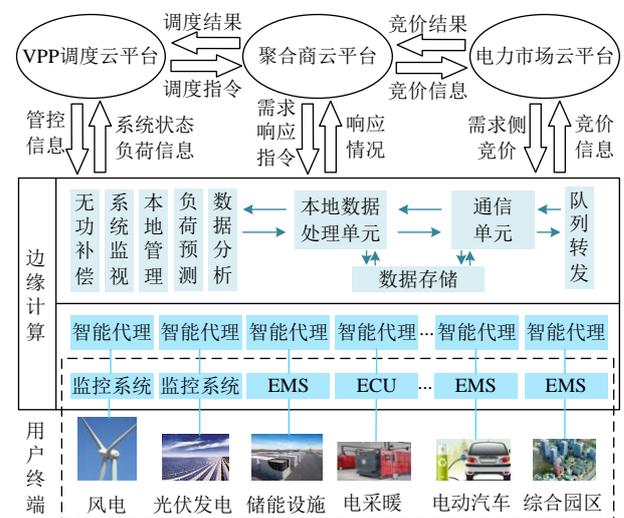


图 3 VPP 中的边缘计算架构和功能  
Fig. 3 Architecture and functionality of edge computing in VPP

面对海量的数据上传和计算任务,机器学习是一种有效处理方法,智能代理基于边缘智能(edge intelligence, EI)架构<sup>[44]</sup>提高边缘计算的算力,以解决能源互联网中 VPP 的经济和资源调度问题。各个代理具有一定程度的独立性和自治性,智能代理利用自身强大的计算能力可实现系统监视、本地管理、无功补偿计算、负荷预测、数据分析、数据清洗与转发等功能,配合云端完成需求响应任务并将

本地系统状态和负荷信息上传到云端，同时智能代理也可独立参与电力辅助服务市场竞价和交易。

技术的快速发展使客户侧设备的计算能力越来越强大，设备逐渐小型化且易部署，充分利用分布式设备的计算资源是未来云计算与边缘计算的发展趋势，当前边缘计算的应用形态并不是最终发展形态<sup>[45]</sup>。图 4 描绘了未来 VPP 中边缘计算和云计算的形态，整个分布式系统采用多级边缘计算的方式，逐级靠近客户侧和现场，可实现 VPP 全场景覆盖和业务数据的精细化上传处理，将云服务和设施延伸到业务需要的位置。智能边缘云(intelligent edge cloud, IEC)拥有云计算的部分或全部功能，一般部署在 DSR 资源密集分布地区的优质网络节点上，可支持大流量、低延迟的 VPP 业务。智能边缘子站(intelligent edge station, IES)可部署在单个 DSR 内的机房内以保证超低时延和数据规范化上传，如充电站、智慧园区，提供本地的一些数据实时本地化处理和数据分析。专属 Region 用来替代原有大客户的私有云，保障业务敏感类客户参与 VPP 调控过程的数据安全性和强合规性，可与 IES 形成组合边缘计算方案。智能边缘功能集(intelligent edge functions, IEF)作为软件解决方案可植入业务现场级智能用户设备上，其对设备的计算能力要求较低，可广泛应用于 VPP 感知和采集终端，在数据产生的源头进行数据处理和清洗。整个分布式云系统采用统一的系统架构和管理体系、一致的运行环境和运行逻辑，将分散的边缘计算设施整合为边缘分布式计算云(以下简称边缘云)。同时，边缘云具备更高的自治能力和协同性，可实现 DSR 资源的区域多级自主调控，主要体现在区域内自主实现电力供需互动平衡和多区域联合互动进行负荷调节，并可独立参与电力市场交易。

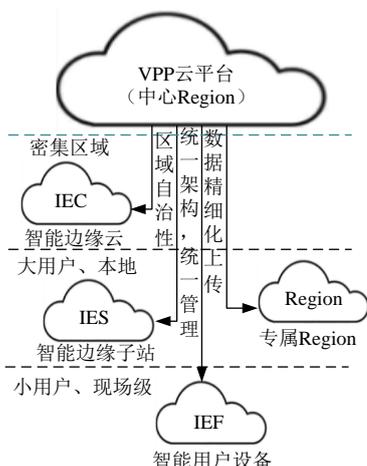


图 4 未来 VPP 中的边缘计算形态  
Fig. 4 Form of future edge computing in VPP

### 3.2 D2D 通信

基于多代理系统架构下的 VPP 协同互动能够提升资源利用效率和能量优化管理，这要求各个智能代理之间实现双向通信。VPP 中各个发电单元和用电负荷可通过智能代理直接或间接与 VPP 协同控制中心实现纵向通信。智能代理除接收 VPP 协同控制中心发送的控制信号外，还能与其它代理之间进行信息和指令的交互，从而实现多代理之间的横向协同互动运行控制。D2D(device-to-device)通信技术是实现智能代理之间的横向通信且无需占用过多公共通信资源的一种优势技术<sup>[46]</sup>。图 5 为基于 D2D 通信的 VPP 协同互动架构，智能代理之间和接入终端之间均能建立 D2D 连接，每个网络主体能够感知到其它网络主体的存在，形成虚拟的、自组织的、实现信息交互的网络群体。

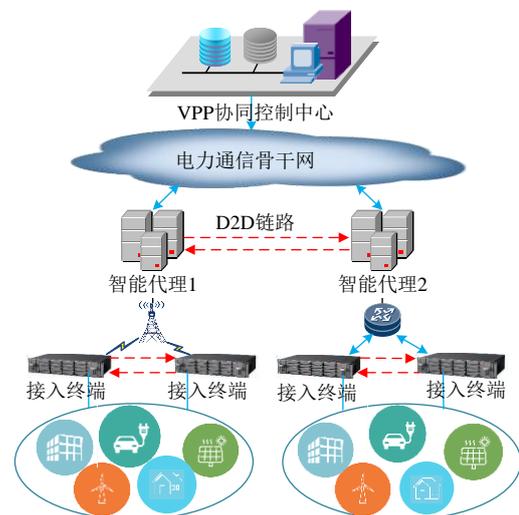


图 5 基于 D2D 通信的 VPP 协同互动架构  
Fig. 5 VPP collaborative interaction architecture based on Device-to-Device communication

D2D 通信的主要作用是实现对等节点之间的直接互联和提升智能代理之间的协同性，尤其在邻近地区完成 DSR 资源的自组织参与 VPP 业务场景下作用明显。在智能代理间没有横向通信的情况下，代理间的互联互通一般通过骨干网或直接上传到云端进行协同任务分配。利用 D2D 通信，2 个或多个代理之间通过单跳或多跳的 D2D 通信即可完成必要的交互和协作任务，减少对网络和云端资源的占用。融合接入终端之间的 D2D 链路除利用其数据直通特性实现终端之间的本地数据传输外，还可实现采集数据的汇聚压缩上传，以及智能代理对用户侧数据的就近获取和调用。D2D 通信还可作为备用应急通信链路<sup>[47]</sup>，当某个智能代理或终端与上层设备发生通信中断时，可通过 D2D 链路经过邻近对等设备作为通信中继点。

D2D 通信系统在实施过程中可能会遇到的一些问题，如无线专网中频谱资源的分配与利用问题，文献[48]提出针对不同服务和需求的频率重用策略，对网络设备的资源分配执行准入控制，以最小化所需的频率资源。文献[49]提出一种采用频谱聚类方法和非合作博弈理论的信道分配和资源优化方案，以最大化 D2D 通信设备的运行效率。文献[50]则是采用深度强化学习创建频谱分配方法，帮助 D2D 用户自主选择可用的信道和功率，可有效提高频谱利用效率。针对 VPP 中智能代理可能地理位置较远、D2D 通信距离过大造成通信质量下降问题，可通过引入中继节点来解决。文献[51]提出一种采用 Q-learning 算法的多中继选择策略，可有效降低通信传输延迟。文献[52]提出一种基于博弈论的中继节点选择方法，通过考虑距离、功率及节点转发能力筛选出最优中继节点。

### 3.3 时延控制技术

VPP 业务和数据具有较高的时间敏感性，精准的负荷控制要求时延达到毫秒级，且 DSR 分布广、差异化接入导致整个 VPP 网络时钟可信度较差，影响整个 VPP 系统的调控效率。时间敏感网络 (time-sensitive networks, TSN)<sup>[53]</sup>可提供网络的时钟同步、端到端的确定性时延、高效的数据传输调度和资源预留，实现周期性和非周期性数据在同一网络上传输，满足 VPP 控制系统对网络实时性和准确性传输的要求。TSN 在传统的以太网数据链路层标准上进行扩展，保证数据传输的低延迟、低抖动和低丢包率，适用于 VPP 等工业控制<sup>[54]</sup>。文献[55]全面研究了 TSN 如何在未来通信系统中的超高可靠性和超低时延业务应用中产生关键技术的作用。如图 6 以 DR 业务数据流为例描述了基于 TSN 的 VPP 互动架构。

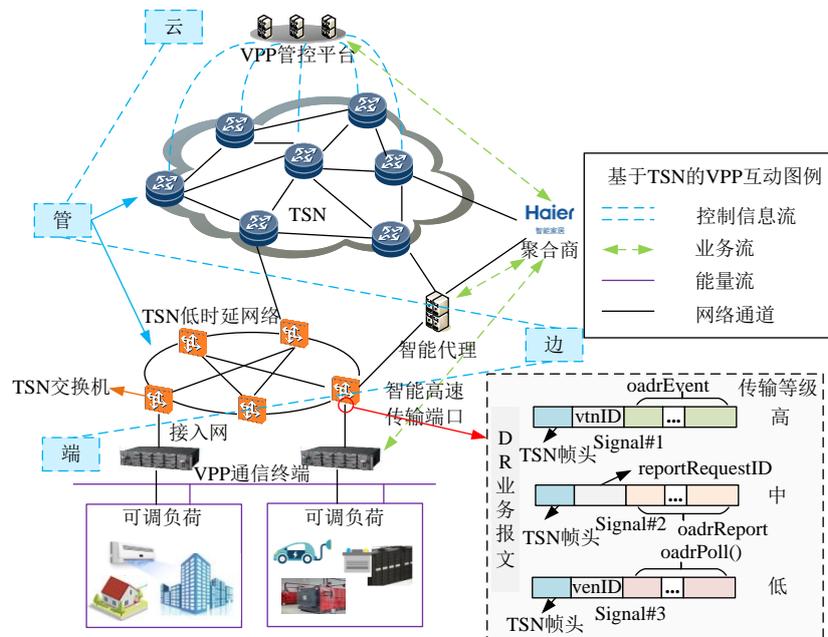


图 6 基于 TSN 的 VPP 互动架构

Fig. 6 VPP interaction architecture based on Time-Sensitive Networks

TSN 采用了 IEEE 802.1Q 标准<sup>[56]</sup>中的 QoS 机制，根据不同业务的服务要求为其数据传输分配合适的网络资源和传输优先级。具体的操作可以通过在业务报文中添加 TSN 帧头，包含该业务的发送时间戳和业务传输等级等信息。在 IEEE802.1Q—2018 修订版<sup>[57]</sup>中支持以数据帧发送的时间作为所传输业务的分类方式，并且加入了抢占机制，即允许发送时间优先级高的业务报文中断正在进行的低优先级业务报文的传输。因此，TSN 网络只需要对数据进行识别和分类，确定数据的传输优先级，再采取一系列的任务调度优化机制，即可实现针对 VPP 业务的确定性实时业务传输。国内开展了电力通信

网中 TSN 交换机的开发工作<sup>[58]</sup>，但是没有涉及对业务类别的识别，各类业务数据信息在通信终端处汇聚上传到 TSN 交换机接口，因此需要在接口处识别业务类型以确定传输优先级。文献[59]研究了 TSN 交换机队列管理调度，提出基于快速启发式算法实现有效的实时数据流队列调度方法。文献[60]提出一种基于实时路由调度器 (real-time routing scheduler, RTRS) 的路由算法，在考虑端到端的最大传输时延的基础上确保所有带有时间戳的数据流能够在规定时间内传输完毕。

未来可在 VPP 互动业务数据帧头同时加入基于通道的帧 ID、目的交换机和源交换机的帧 ID，

即将 VPP 数据传输的源、目的节点和路径全部进行标记, 实现网络的时间、设备的时间、数据的时间 3 个层次的明晰, 以保证业务更高标准的确定性与低时延传输。同时, 基于 VPP 业务数据流特征模型, 建立面向 VPP 业务差异化的数据队列调度机制, 全方位保障 VPP 互动数据的实时传输需求。

## 4 结语

作为实现“碳达峰”重要的赋能手段之一, VPP 的建设与发展步伐将继续加快, 对 VPP 灵活互动水平的要求将不断提高。本文基于对 VPP 概念、特性和实践的剖析, 重点对支撑 VPP 灵活互动发展的通信架构、通信系统性能和信息通信关键技术进行分析和介绍。另外还提出未来 VPP 中分布式边缘云和 D2D 技术的应用模式, 以及对 TSN 等时延控制技术的部分展望。未来 VPP 将具有更高的开放性和可扩展性, 以整合和控制各种分散的资源, 随着技术和标准的不断完善, 可继续挖掘新型信息通信技术在 VPP 中的推广和应用, 同时也要正视一系列信息化技术的应用所带来的安全性风险和挑战, 尤其是关键信息通信基础设施高技术水平的国产化和自主可控。

## 参考文献

- [1] 张晶, 孙万璐, 王婷. 自动需求响应系统的需求及架构研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4070-4076.  
ZHANG Jing, SUN Wanjun, WANG Ting. Studies on requirements and architecture for automated demand response system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4070-4076(in Chinese).
- [2] 高赐威, 梁甜甜, 李扬. 自动需求响应的理论与实践综述[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 352-359.  
GAO Ciwei, LIANG Tiantian, LI Yang. A survey on theory and practice of automated demand response[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 352-359(in Chinese).
- [3] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735-2744.  
BIE Chaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2744(in Chinese).
- [4] 习近平: 构建以新能源为主体的新型电力系统[EB/OL]. [2021-03-16]. <http://www.chinapower.com.cn/xw/zyxw/20210316/58493.html>.
- [5] LI Yan, CHI Yongning, WANG Xuefeng, et al. Practices and Challenge on Planning with Large-scale Renewable Energy Grid Integration[C]//Proceedings of 2019 IEEE 3rd Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Changsha, China: IEEE, 2019.
- [6] 我国可再生能源开发利用规模稳居世界第一[EB/OL]. [2021-02-02]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-294900>.
- [7] 赵紫原. 中电联报告: 2020 年全国并网风电、太阳能发电量快速增长[EB/OL]. [2021-02-02]. <https://news.bjx.com.cn/html/20210202/1134042.shtml>.
- [8] LIU Chengyang, YANG R J, YU Xinghuo, et al. Virtual power plants for a sustainable urban future[J]. Sustainable Cities and Society, 2021, 65: 102640.
- [9] 冀北电力交易中心向国际电工委员会(IEC)提交虚拟电厂《用例》国际标准委员会流转稿[EB/OL]. [2020-10-09]. <https://shoudian.bjx.com.cn/html/20201009/1108648.shtml>.
- [10] 国家电网. 国家电网公司发布“碳达峰、碳中和”行动方案[EB/OL]. [2021-03-01]. [http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc\\_main/col2017021449/2021-03/01/20210301152244682318653\\_1.shtml](http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_main/col2017021449/2021-03/01/20210301152244682318653_1.shtml).
- [11] ETHERDEN N, VYATKIN V, BOLLEN M H J. Virtual power plant for grid services using IEC 61850[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(1): 437-447.
- [12] LOMBARDI P, POWALKO M, RUDION K. Optimal operation of a virtual power plant[C]//Proceedings of 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary: IEEE, 2009.
- [13] 艾芊. 虚拟电厂: 能源互联网的终极组态[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [14] MAHMUD K, KHAN B, RAVISHANKAR J, et al. An internet of energy framework with distributed energy resources, prosumers and small-scale virtual power plants: an overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 127: 109840.
- [15] ADU-KANKAM K O, CAMARINHA-MATOS L M. Towards collaborative virtual power plants: trends and convergence[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2018, 16: 217-230.
- [16] 田立亭, 程林, 郭剑波, 等. 虚拟电厂对分布式能源的管理和互动机制研究综述[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 12.  
TIAN Liting, CHENG Lin, GUO Jianbo, et al. A review on the study of management and interaction mechanism for distributed energy in virtual power plants[J]. Power Grid Technology, 2020, 44(6): 12(in Chinese).
- [17] XU Helin, CHENG Lin, QI Ning, et al. Peak shaving potential analysis of distributed load virtual power plants[J]. Energy Reports, 2020, 6 Suppl 9: 515-525.
- [18] 刘吉臻, 王玮, 胡阳, 等. 新能源电力系统控制与优化[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(12): 1555-1561.  
LIU Jizhen, WANG Wei, HU Yang, et al. Control and optimization of alternate electrical power system with renewable energy sources[J]. Control Theory & Application, 2016, 33(12): 1555-1561(in Chinese).
- [19] TIAN Liting, CHENG Lin, WAN Yuxiang, et al. From distributed energy resources to virtual power plants: a cyber-physical system solution for integrating demand-side in smart grid[C]//Proceedings of the 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Wuhan, China: IEEE, 2020.
- [20] 国家能源局江苏监管办公室. 关于印发《江苏电力市场用户可调节负荷参与辅助服务市场交易规则(试行)》的通知[EB/OL]. [2020-11-10]. <http://jsb.nea.gov.cn/news/2020-11/20201110100742.htm>.
- [21] 上海市经济和信息化委员会. 上海市经济信息化委关于同意进一步开展上海市电力需求响应和虚拟电厂工作的批复[EB/OL]. [2020-09-17]. <http://www.sheitc.sh.gov.cn/jjyx/20200917/cc284508319e4d3cbd50b4bb2003905a.html>.
- [22] 国家能源局华北监管局. 华北能监局印发《第三方独立主体参与华北电力调峰辅助服务市场规则(试行 2020 版)》[EB/OL]. [2020-12-11]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1685765519877171961&wfr=spider&for=pc>.
- [23] 今年江苏“虚拟电厂”规模将达 260 万 kW 实现全省覆盖[J]. 能源研究与利用, 2018(2): 13.  
This year, Jiangsu "virtual power plant" scale will reach 2.6 million kW to achieve the whole province's coverage[J]. Energy Research &

- Utilization, 2018(2): 13(in Chinese).
- [24] 陈丽莎, 求力, 马丹婷. 国网浙江省电力开展电力需求侧响应, 充分唤醒可调节负荷资源[EB/OL]. [2020-08-20]. <http://www.escn.com.cn/news/show-1087031.html>.
- [25] 屠盛春, 刘晓春, 张皓. 上海市黄浦区商业建筑虚拟电厂典型应用[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(1): 52-57.  
TU Shengchun, LIU Xiaochun, ZHANG Hao. Typical implementation of commercial building virtual power plant in Huangpu district of Shanghai[J]. Power demand side Management, 2020, 22(1): 52-57(in Chinese).
- [26] 中国储能网新闻中心. 上海电网实施今年首次需求响应[EB/OL]. [2020-07-02]. <http://www.escn.com.cn/news/show-1063864.html>.
- [27] LIU Ya, ZHANG Deliang, WANG Xuanyuan. A peak regulation ancillary service optimal dispatch method of virtual power plant based on reinforcement learning[C]//Proceedings of 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia). Chengdu, China: IEEE, 2019.
- [28] 薛一鸣, 石佳. 国网冀北电力试点开展工业企业负荷需求响应[EB/OL]. [2021-03-24]. <http://www.chinapower.com.cn/dww/zhxw/20210324/60408.html>.
- [29] GABDERAKHMANOVA T, ENGELHARDT J, ZEPTER J M, et al. Demonstrations of DC microgrid and virtual power plant technologies on the Danish island of Bornholm[C]//Proceedings of the 55th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). Turin, Italy: IEEE, 2020.
- [30] ABB ability for Virtual Power Plants (VPP)[EB/OL]. [2019-06-23]. <https://new.abb.com/abb-ability/utilities/virtual-power-plants>.
- [31] AutoGrid 为法国道达尔最大的基于电池的储能项目部署 AutoGrid Flex[EB/OL]. [2021-02-25]. <https://0xzx.com/2021022511261210568.html>.
- [32] VPP solution NEMOCS is our platform for your Virtual Power Plant[EB/OL]. [2019-06-23]. <https://www.next-kraftwerke.com/products/vpp-solution>.
- [33] CAO Chi, XIE Jun, YUE Dong, et al. Distributed economic dispatch of virtual power plant under a non-ideal communication network[J]. Energies, 2017, 10(2): 235.
- [34] KOLENC M, SULJANOVIĆ N, NEMČEK P, et al. Monitoring communication QoS parameters of distributed energy resources[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON). Leuven: IEEE, 2016.
- [35] 王哲, 赵宏大, 朱铭霞, 等. 电力无线专网在泛在电力物联网中的应用[J]. 中国电力, 2019, 52(12): 27-38.  
WANG Zhe, ZHAO Hongda, ZHU Mingxia, et al. Application of power wireless private network in ubiquitous power internet of things[J]. Electric Power, 2019, 52(12): 27-38(in Chinese).
- [36] 姚继明, 卜宪德, 张浩, 等. 一种适应电力业务的无线专网频谱分配优化方法及装置: CN110493873A[P]. 2019-11-22.
- [37] ZHOU Bin, ZHANG Kuan, CHAN K W, et al. Optimal coordination of electric vehicles for virtual power plants with dynamic communication spectrum allocation[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(1): 450-462.
- [38] NAUGHTON J, WANG Han, CANTONI M, et al. Co-optimizing virtual power plant services under uncertainty: a robust scheduling and receding horizon dispatch approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 3960-3972.
- [39] 刘吉臻, 李明扬, 房方, 等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103-5111.  
LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5103-5111(in Chinese).
- [40] 赵梓铭, 刘芳, 蔡志平, 等. 边缘计算: 平台、应用与挑战[J]. 计算机研究与发展, 2018, 55(2): 327-337.  
ZHAO Ziming, LIU Fang, CAI Zhiping, et al. Edge computing: platforms, applications and challenges [J]. Journal of Computer Research and Development, 2018, 55(2): 327-337(in Chinese).
- [41] 李彬, 贾滨诚, 曹望璋, 等. 边缘计算在电力需求响应业务中的应用展望[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 79-87.  
LI Bin, JIA Bincheng, CAO Wangzhang, et al. Application prospect of edge computing in power demand response business[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 79-87(in Chinese).
- [42] 李彬, 贾滨诚, 陈宋宋, 等. 边缘计算在电力供需领域的应用展望[J]. 中国电力, 2018, 51(11): 154-162.  
LI Bin, JIA Bincheng, CHEN Songsong, et al. Prospect of application of edge computing in the field of supply and demand[J]. Electric Power, 2018, 51(11): 154-162(in Chinese).
- [43] 吕军, 栾文鹏, 刘日亮, 等. 基于全面感知和软件定义的配电物联网体系架构[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3108-3115.  
Lǚ Jun, LUAN Wenpeng, LIU Riliang, et al. Architecture of distribution internet of things based on widespread sensing & software defined technology[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3108-3115(in Chinese).
- [44] FANG Dawei, GUAN Xin, LIN Lin, et al. Edge intelligence based economic dispatch for virtual power plant in 5G internet of energy[J]. Computer Communications, 2020, 151: 42-50.
- [45] 雷锋网. 华为云重磅发布分布式云, 描绘未来云计算新形态[EB/OL]. [2021-04-13]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1696897517009045293&wfr=spider&for=pc>.
- [46] NAUMAN A, JAMSHED M A, AHMAD Y, et al. An intelligent deterministic D2D communication in narrow-band internet of things[C]//Proceedings of the 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). Tangier, Morocco: IEEE, 2019.
- [47] 黄浦, 李宏军, 刘重阳, 等. 融合小波的 D2D 技术在电力应急通信中的应用[J]. 信息技术, 2019, 43(5): 71-75.  
HUANG Pu, LI Hongjun, LIU Chongyang, et al. Application of D2D technology of fusion wavelet in power emergency communication[J]. Information Technology, 2019, 43(5): 71-75(in Chinese).
- [48] ZEB J, HASSAN A, NISAR M D. Joint power and spectrum allocation for D2D communication overlaying cellular networks[J]. Computer Networks, 2021, 184: 107683.
- [49] ZHAO Shasha, FENG Yingying, YU Gan. D2D communication channel allocation and resource optimization in 5G network based on game theory[J]. Computer Communications, 2021, 169: 26-32.
- [50] WANG Dan, QIN Hao, SONG Bin, et al. Joint resource allocation and power control for D2D communication with deep reinforcement learning in MCC[J]. Physical Communication, 2021, 45: 101262.
- [51] 彭艺, 张申, 朱豪, 等. 联合机器学习的 D2D 通信多中继选择机制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 149-154.  
PENG Yi, ZHANG Shen, ZHU Hao, et al. D2D communication multiple relay selection mechanism for joint machine learning[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 149-154(in Chinese).
- [52] ZHANG Shen, PENG Yi. D2D communication relay selection algorithm based on game theory[J]. Procedia Computer Science, 2020, 166: 563-569.
- [53] VLK M, HANZÁLEK Z, TANG Siyu. Constraint programming approaches to joint routing and scheduling in time-sensitive networks[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 157: 107317.
- [54] GAVRILUȚ V, POP P. Scheduling in time sensitive networks (TSN)

for mixed-criticality industrial applications[C]//Proceedings of the 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS). Imperia: IEEE, 2018: 1-4.

- [55] NASRALLAH A, THYAGATURU A S, ALHARBI Z, et al. Ultra-low latency (ULL) networks: the IEEE TSN and IETF DetNet standards and related 5G ULL research[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1): 88-145.
- [56] ASHJAEI M, SJÖDIN M, MUBEEN S. A novel frame preemption model in TSN networks[J]. Journal of Systems Architecture, 2021, 116: 102037.
- [57] IEEE Standards Association. IEEE standard for local and metropolitan area network--bridges and bridged networks: 802.1Q—2018[S]. New York: IEEE, 2018.
- [58] 李琦, 完颜绍澎, 顾舒娴, 等. 时间敏感技术在电力通信网中的研究[J]. 山东电力技术, 2019, 46(12): 37-41.  
LI Qi, WANYAN Shaopeng, GU Shuxian, et al. Research on time-sensitive technology in electric power communication network[J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(12): 37-41(in Chinese).
- [59] LIN Yuhan, JIN Xi, ZHANG Tianyu, et al. Queue assignment for fixed-priority real-time flows in time-sensitive networks: hardness and algorithm[J]. Journal of Systems Architecture, 2021, 116: 102141.
- [60] CHANG S H, CHEN Huan, CHENG Bochao. Time-predictable

routing algorithm for Time-Sensitive Networking: schedulable guarantee of Time-Triggered streams[J]. Computer Communications, 2021, 172: 183-195.



李彬

在线出版日期: 2021-10-26。

收稿日期: 2021-06-07。

作者简介:

李彬(1983), 男, 副教授, 主要从事电气信息技术及电力系统通信研究, E-mail: direfish@163.com;

郝一浩(1997), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要从事能源互联网信息通信技术研究, E-mail:mfyihao@163.com;

祁兵(1965), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力节能、自动需求响应;

孙毅(1972), 男, 教授, 主要从事电力大数据与电网能效节能相关技术研究;

陈宋宋(1987), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为能效与智能用电技术。

(实习编辑 李健一)