

云管边端架构下虚拟电厂资源集群与协同调控研究 综述及展望

卫璇¹, 潘昭光², 王彬², 孙宏斌^{2*}, 郭庆来²

(1. 清华-伯克利深圳学院, 广东省 深圳市 518000;

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

Review on Virtual Power Plant Resource Aggregation and Collaborative Regulation Using Cloud-tube-edge-end Architecture

WEI Xuan¹, PAN Zhaoguang², WANG Bin², SUN Hongbin^{2*}, GUO Qinglai²

(1. Tsinghua-Berkeley Shenzhen Institute, Shenzhen 518000, Guangdong Province, China;

2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments

(Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

Abstract: The development of distributed energy, controllable load, and electric vehicles with high randomness and uncertainty poses significant challenges with regard to power-system flexibility. However, it also offers opportunities to the power grid as flexible resources (FRs). As the main form of FR aggregation, virtual power plants (VPPs) can facilitate the aggregation, storage, supply, and consumption of energy at the idle FR terminal. This study focuses on the internal resource management of VPPs. The technical challenges encountered during the implementation of resource aggregation and collaborative VPP regulation are first highlighted based on energy, space, and time considerations. Subsequently, the hierarchical structure and basic functions of VPP under the cloud-tube-side-end architecture are described. This is followed by summarizing the key technologies and relevant communication methods involved in resources modeling, aggregation, and collaborative regulation. Finally, the directions for future VPP-related research are identified.

Keywords: flexible resources; virtual power plant; cloud-tube-edge-end; resources aggregation; collaborative regulation

摘要: 具有极强随机性和不确定性的分布式能源、可控负荷、电动汽车等的发展, 既给电力系统的灵活性问题带来挑战, 又可以作为灵活性资源 (flexible resources, FRs) 给电网带来机遇。虚拟电厂 (virtual power plant, VPP) 作为FRs集成聚合的主要形式, 实现对海量灵活性分散资源终端的聚能、储能、供能与用能。该研究聚焦于VPP内部的资源管理, 首先从能量、空间、时间三个尺度指出VPP实施资源集群及协同调控过程中面临的技术挑战; 然后阐述云管边端架构下VPP的层级结构与基本功能, 并对资源建模、资源集群、协同调控涉及的关键技术及相关通信方法进行综述; 最后对未来VPP需要探索的研究方向进行了展望。

关键词: 灵活性资源; 虚拟电厂; 云管边端; 资源集群; 协同调控

0 引言

在清洁替代和电能替代 (“两个替代”) [1] 战略推动下, 风电、光伏等可再生能源大规模并网, 以及电动汽车、储能设备、可控负荷 [2] 的不断接入, 使电力系统呈现极高的复杂性和不确定性, 亟需灵活性资源 (flexible resources, FRs) 通过改变其能源生产和消耗行为来应对电网的灵活性需求。对电力系统而言, FRs指能够增加电网灵活性, 服务于电力系统动态供需平衡的资源, 对实现削峰填谷、促进间歇性能源消纳、提高能源效率、延缓能源基础设施的投资扩容具

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFE0200400); 国家自然科学基金项目 (51537006); 中国博士后基金 (2019M650675)。

National Key Research and Development Program of China (2020YFE0200400); National Natural Science Foundation of China (51537006); China Postdoctoral Science Foundation (2019M650675).

有重要意义。

近年来,很多国家都在探索互联网技术与可再生能源技术相结合的能源发展模式,以智能电网为资源配置中心,构建横向多源互补、纵向源网荷储协调的多能耦合系统,能源互联网^[3]应运而生。在能源互联网架构下,能源供需系统是“源-网-荷-储”综合体,电、热、冷、气等多种能源从需求侧到供给侧各环节相互耦合,互联互通。在此背景下,FRs不仅包括风、光、生物质等分布式发电资源(distributed generation, DG)和储能、电动汽车、可控负荷等配电侧、需求侧资源,还可容纳多种能源耦合设备,包括冷热电联产机组、燃气锅炉、燃气吸收式冷水机组、电锅炉和电冷水机组等^[4]。

虚拟电厂(virtual power plant, VPP)作为聚合FRs的有效手段,借助先进的通信、计量、控制等技术,无需改变FRs各自的并网方式和地理位置即可实现聚能、储能、供能与用能^[5],有效连接FRs与电力系统,实现资源整合与分配,逐渐作为聚合实体在电力批发市场参与分布式能源的运行,是智能电网在能源供需侧实现互动化、智能化的重要途径^[6]。相较于传统电厂横向上单一的能源构成,虚拟电厂纳入大量可再生能源、储能、可控负荷等分布式能源,从体制上打破垄断,构建横向多元互补和纵向源网荷储相结合的电厂架构。此外,可利用不同FR的各自优势为电网提供诸如能量平衡、无功/电压支持、旋转备用、频率调节和阻塞管理等多类服务,展现出一定的经济价值^[7]。

然而,FRs的运行特性为VPP的资源聚合集群与优化调度在能量尺度、空间尺度和时间尺度都带来了挑战。如何打破供电、热、冷、气等能源系统各自管理的局面,实现多能互补耦合,对VPP协调多能间调度与配合提出了更高的要求;FRs分散在各区域电力系统独立运行,加大了空间尺度的复杂性;不同种类FRs在调节速度、调节范围、调节持续时间等方面具有很大差异^[8],且为电网提供横跨多时间尺度的辅助服务^[9],增大了时间尺度的复杂性。

为应对上述挑战,具备更强融合互动性和分层可拓性的云管边端架构,成为VPP实现资源整合与分配的前瞻性体系结构。在该架构下,VPP运行结构由云端管控平台、网络管道系统、边端集群服务器和FRs 4层构成。为了实现FRs的高效有序并网和协调控制,减少其无序发展对电网带来的负面影响^[10],如配网阻塞^[11-12]、电压不稳定^[13]等,边缘集群服务器依照一定

标准(地域分布、聚类算法、网架结构等)聚合大量FRs,发挥规模效应,并将聚合模型通过考虑通信安全的网络管道传递给云端管控平台,从而将VPP等效为传统电厂为电网提供辅助服务,与电网运营商、电力交易平台等进行有效交互。VPP与电网交互的运行步骤包括:1) VPP控制中心将FRs聚合模型上传电力系统;2) 电网向VPP下发调度信号;3) VPP分解调度指令并下达给各FR。本文聚焦于VPP内部FRs的资源集群与协同优化,因此对运行步骤2)中电网侧的优化调度不进行探讨和分析。

本文从终端FRs的运行特性出发,指出VPP在对其资源集群及协同调控过程中面临的技术挑战;其次阐述云管边端架构下VPP的基本结构,从FRs种类、管控平台类别等方面归纳总结了目前世界上的VPP示范项目;然后分别对边缘服务器、云管控平台资源建模、聚合集群、调度策略等关键技术进行综述;最后展望了未来VPP需要探索的技术和发展趋势。

1 技术挑战

近年来,风电、光伏、潮汐、地热等波动性、不确定性较强的可再生能源不断接入电网,具有源荷双重性质的可控负荷比例不断上升,给电力系统的灵活性问题带来挑战,这些资源可以作为FRs给电网带来机遇。然而,FRs的发展呈现出小容量、规模庞大、地域分散、种类多样、运营主体多样^[14]、动态变化^[15]等特征,以下将分别从能量尺度、空间尺度、时间尺度来阐述FRs的运行特性给VPP管理带来的技术挑战。

1.1 能量尺度:多能耦合

为应对电网新能源的波动特性和峰谷参数带来的灵活性需求,电力系统、天然气系统和供热系统需相互协调,一方面平抑风电、光伏的随机性促进新能源消纳^[16],另一方面实现削峰填谷,提高电网的上、下调节能力^[17]。随着热电联产(combined heat and power, CHP)、冷热电三联供等技术的发展,电、热、冷、气多种能源相互耦合,VPP也成为集成电力、热能、天然气等多种能源的综合能源系统,涉及能源的转换、分配与有机协调。热电联产机组、微型燃气轮机以及电热冷气负荷等设备实现电、热、冷、气互补耦合,均可参与电网的灵活性调节,盘活更多的多能设备,可有效提高电力系统的灵活调节容量,降低电网的峰值负荷需求,降低系统旋转备用容量,提高电

网的灵活性,图1展示了能源网中电、热、冷、气之间的耦合关系图,电能作为连接各种能源的纽带,打破了不同能源形式之间的壁垒^[8],极大提高了能源的利用效率。

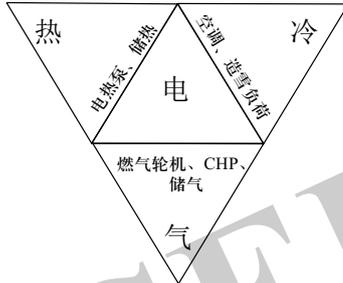


图1 多能耦合关系图

Fig. 1 Multi-energy coupling diagram

因此,VPP终端FRs模型的建立不再局限于电能资源特性的描述,还应考虑热、冷、气等能源资源和多能之间的耦合性,挖掘多能设备、负荷之间的互补及相互影响关系。

1.2 空间尺度:地域分散

FRs分散于能源网的各个角落,VPP实现面向千家万户闲散能源的高效利用。根据空间尺度大小,VPP的应用规模可划分为楼宇级、社区级、园区级、工厂级、学校级,甚至城市级等。例如,在社区层面,能源服务公司与社区内用户签订合同,控制其柔性负荷,挖掘多能社区级的电热储能设备以及终端负荷的灵活性^[18]。在园区层面,针对园区级别的需求侧灵活性资源,文献[19]从负荷削减、负载转移、能量转换和多建筑协调等方面分析了工业园区内需求侧资源的运行策略。在城市层面,文献[20]根据地理位置相近的发电单元和负荷种类,将爱尔兰Isfahan的城市电网划分为8个VPP,包括6个发电型VPP和两个工业负荷型VPP,实现系统在正常和故障情况下的跨VPP经济调度。图2为描述FRs空间分散分布特性的示意图。

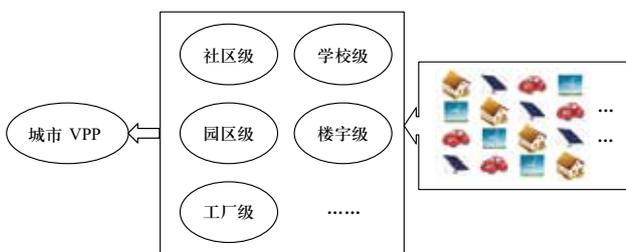


图2 FRs空间分布示意图

Fig. 2 Spatial distribution diagram of FRs

不可避免地,FRs的地域分散特性会导致区域间能源网也存在着能量传输的关系,需要满足能量传输的各种运行约束。如何对分散的FRs进行集群聚合,并考虑不同区域间的能流传输关系,是VPP进行资源集群所面临的挑战之一。

1.3 时间尺度:多动态速度

终端FRs时间尺度的复杂性体现在自身动态特性各异以及参与不同调控内容和电力市场的差异性。

一方面,单从电力系统角度,各类发电机组的调节速度存在差异,相比柴油机组,燃气轮机的启动速度快,调节幅度大,从综合能源系统角度,电、热、冷、气等多种能源的动态特性各不相同,电力系统惯性较小,调节快速,天然气系统次之,惯性较大,调节较慢,热网惯性最大,调节最慢^[8],因此不同种类FRs的调节速度、调节范围、调节可持续时间等具有很大差异和复杂的调节动态特性,并且有些FRs在功率和时间上具备连续可调能力,有些只能够离散调整。

另一方面,VPP不仅需参与中长期、日前、日内、实时等电能市场^[9],还为电网提供调频^[21]、调压^[22]、调峰、紧急控制等多类型多时间尺度的辅助服务,VPP需在不同时间尺度的市场下,对FRs进行有效调控。

图3从以上两个维度总结了资源集群与协同调控中涉及的多时间尺度复杂特性。VPP在中长期电能市场^[23]的交易品种包括双边协商交易、集中竞价交易、挂牌交易、基数合约交易等;在日前市场预测次日发电出力、负荷功率、日前清算价格,并估算上、下可调容量;在日内市场对各FRs进行协同调控,优化实时市场的调度结果;辅助服务市场跨越多时间尺度。与此同时,电、气、热等能源和发电机组的动态差异特性也不可忽略,为VPP实现动态聚合提供了参考。

通过多种能源和电网调控需求在时间上的互补和相互匹配,可以提高能源网供能可靠性与灵活性。因此,如何实现FRs的多时间尺度动态聚合和优化调度是VPP的另一挑战。

2 云管边端架构下VPP概述

2.1 VPP基本结构

VPP控制结构分为集中式、集中-分散式和完全分散式,其中集中式或集中-分散式结构采用中央控制中心,兼顾物理层面聚合以及信息层面传输两方面

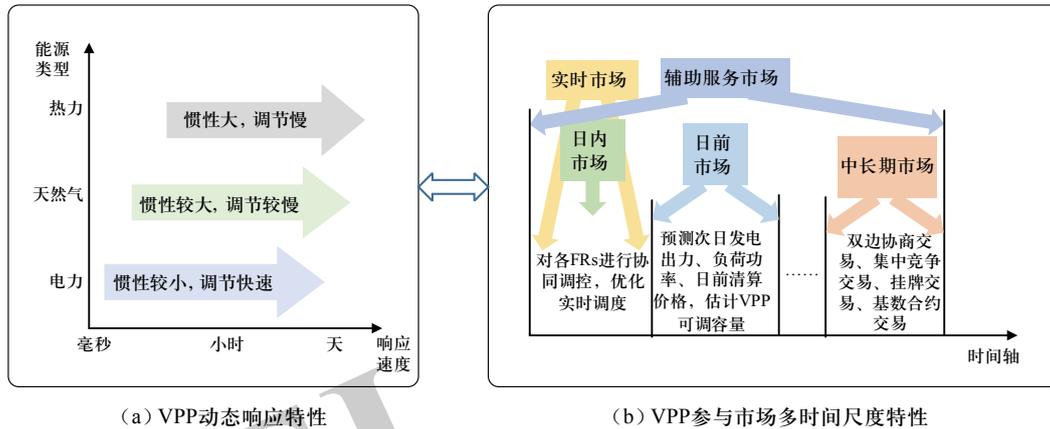


图3 多时间尺度特性关系图

Fig. 3 Multi-time scale characteristics of VPP

功能，直接对终端FRs进行调控，过程计算量巨大，终端隐私保护弱；而完全分散式结构借助智能代理获取其他FRs子系统数据信息，对各子系统的功能提出更高的要求。

为了减小对FRs的管控难度，提升调控模型的精确性和可行性，本文基于现有VPP框架的相关研究^[24]，将FRs的物理聚合、信息传输、资源调控分为3部分，得到云管边端架构下VPP的基本结构，如图4所示。

该架构下，VPP各层级的基本功能和信息交互如下。

1) 终端设备：智能电表、手机App等智能终端借助双向计量、抄表、异常监测、免接触交互等技术实现FRs运行特性参数、出力数据以及负荷需求等实时

信息的采集、感知与传输，构建各自的调控模型，同时执行边缘服务器下达的调度指令。

2) 边缘服务器：通过在云端和终端之间设置一层边缘节点，将海量信息分割为更小与更容易管理的单元分别处理，接受终端上传的数据并进行有效计算，得到反映聚合资源整体外特性的集群模型，上传给云管控平台，并优化分配到各集群的调度指令，实现单个集群内部的高效有序运行，为实现FRs与VPP之间的有效交互提供了接口。由于边缘节点更接近终端FRs设备，可加快信息处理与传输速度，一方面减少延迟，一方面降低带宽成本^[25]。目前，机器学习是处理大数据的有效方式。基于此，边缘智能技术^[26]将机器学习和边缘计算相结合，提高边缘计算效率。

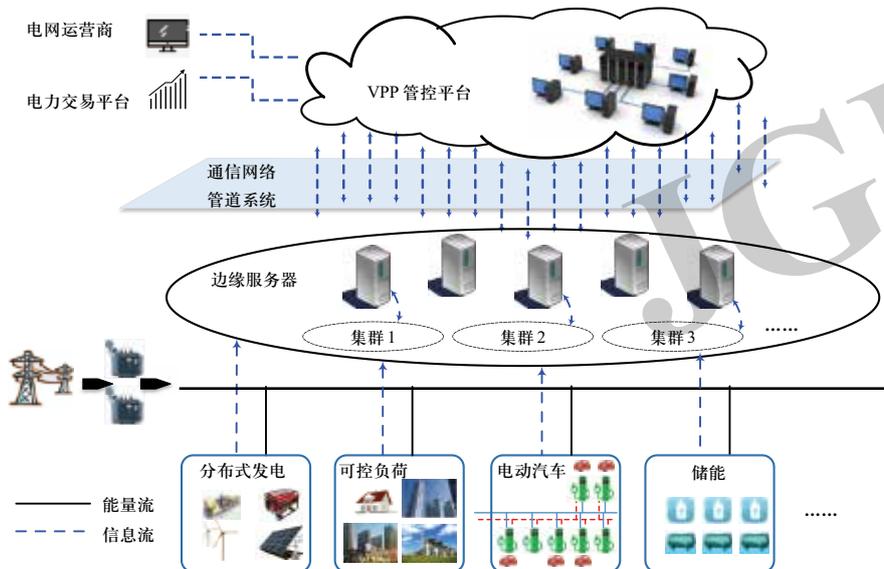


图4 虚拟电厂的云管边端架构

Fig. 4 Cloud-tube-edge-end architecture of VPP

3) 管道通信系统：点多、面广的FRs设备终端和用户终端上传的海量信息，其传输需要信息通信技术的支撑。随着泛在物联网概念的提出^[27]，电力系统各环节互联互通，本文将管道通信作为云管控平台和边缘服务器的泛在连接媒介，传输资源集群的关键数据和信息，如集群的可调节容量、爬坡速率、实时状态信息等。

4) 云管控平台：作为VPP的决策中心，收集各集

群模型，利用云计算、大数据、人工智能（artificial intelligence, AI）、区块链等技术执行数据清洗、分类、建模、存储等，生成云端动态聚合模型，抽取出VPP的可用容量、爬坡速率等外特性。将处理后的集群模型上传电力系统，并在收到调度指令后分解指令，进行优化决策，实现与电网运营商、电力交易平台等机构决策互动。图5对云管边端结构下VPP所采用的技术进行了归纳总结。

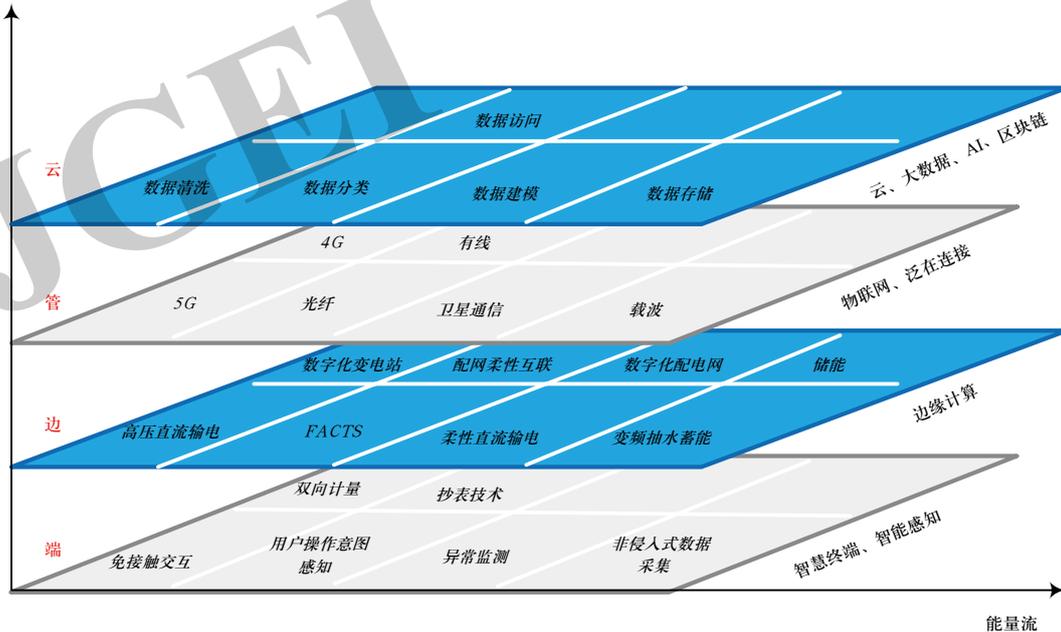


图5 技术总结图

Fig. 5 Summary of the technologies adopted

综上，云管边端架构下VPP利用边缘服务器在靠近FRs信息来源的网络边缘执行数据处理，聚合分散资源，再通过网络管道，发送给云管控平台，继而借助云计算对资源集群进行调度、与电网调度中心及交易中心进行交互，并将优化指令下达给边缘服务器。VPP为解决强不确定性和复杂能源耦合的区域能源系统内部资源协调问题提供了支持，为应对能源互联网高动态、高维度、多模式运行的灵活性提供了思路，为实现能源有效分配和用能疏导奠定了基础。

2.2 VPP示范项目

目前，全球已相继开展了一些VPP示范项目。欧洲和美国处在VPP建设的研究前沿，欧洲的VPP模式主要目标是实现分布式发电并网，分布式发电资源占FRs的主要部分；美国的VPP模式是基于需求侧响

应项目，可控负荷占FRs的主要部分。近年来，太阳能电池板和电池存储系统的价格大幅下降，美国的住宅太阳能容量超过600 MW^[28]，光储VPP成为美国VPP未来的发展趋势。中国VPP的建设当前主要以示范工程为主，还处在探索阶段，国家发改委和国家能源局于2017年制订了《能源生产和消费革命战略（2016—2030）》，明确绿色低碳能源是中国能源接下来十几年的发展方向，为虚拟电厂的发展应用创造了契机。表1列举了目前全球典型的VPP示范项目，其中国网冀北电力虚拟电厂示范工程基于物联网云平台的泛（FUN）电平台，实时接入与控制多种FRs，实现智能聚合、多能优化、泛在交易等，并于2019年10月在第83届国际电工委员会（IEC）大会上被写入IEC国际标准用例，云平台凭借其可扩展性、数据移动性、安全可靠、成本效益优势，成为未来VPP建设的发展趋势。

表1 全球VPP示范工程
Table 1 VPP demonstration projects

主要参与国家	项目名称	起止时间	应用场景	FRs种类	管控平台	
英国、西班牙、法国、罗马尼亚等	FENIX	2005—2009	区域级	光伏/风电/小水电/生物质能电站/燃料电池/CHP (电/热/气)	VPP代理商/聚合商	
德国、波兰等	Web2Energy	2010—2015	区域级	光伏/风电/水电/CHP/可控负荷/蓄电池 (电/热/冷/气)	VPP集中控制中心	
欧盟	TWENTIES	2012—2015	区域级	传统发电厂/风电 (电/气)	Power Hub	
德国	—	2014	800栋建筑楼宇, 120家工厂, 90家公司	燃气轮机/电锅炉 (电/气)	Infraserv Hochst	
美国	加州 AutoGrid	2020—	10 000多分布式光伏	光伏 (电)	Eneres	
	纽约 —	2016	300多户光伏、蓄电池	光伏/储能 (电)	Co Edison和特斯拉	
澳大利亚	南澳大利亚	光储VPP	2019	50 000栋房屋	光伏/储能 (电)	特斯拉
中国	上海	商业建筑“虚拟电厂”项目	2016—2018	区域级	可中断负荷 (电)	上海电力公司
	江苏	“居民虚拟电厂”项目	2017—2020	区域级	可中断负荷 (电)	江苏省电力公司
	安徽	“区域性高渗透率分布式发电集群灵活并网群控群调”项目	2017—2019	区域级	光伏/风电/储能 (电)	金寨电力公司
	冀北	“能源互联网环境下多主体多能虚拟电厂”项目	2019—	区域级	光伏/蓄热式电采暖/造雪负荷等 (电/热/冷)	物联网云平台

3 关键技术

单个FR建模需考虑各自行为特性, 具有很大不确定性, 而资源聚合一方面可刻画集群的整体可行域, 降低模型的各异性; 另一方面可构建聚合等值模型, 被电网直接调控, 实现资源的协同调控。为应对FRs的多能耦合、地域分散、时间动态特性等挑战, 以下分别从FRs的资源建模、资源集群和协同调控3方面, 结合现有研究, 对云管边缘架构下VPP实现相应功能涉及的关键技术和管道通信方法进行综述和探讨。

3.1 资源建模

VPP资源建模主要指在集群前终端设备对单个FRs的供能和用能行为的刻画。在对FRs运行特性建模过程中, 如何挖掘单个能源的可调特性、多能间的互补耦合特性来提高电网的灵活性是现有研究的热点。

在跨越多时间尺度的FRs自身动态特性建模方面, 一些学者对电-热-气综合能源系统运行中热能的热惯性和天然气的可压缩性进行了探索。对于电力系统, 在需求侧响应项目中, 一方面用户的响应量随电价变化, 另一方面可转移负荷在总能耗保持不变的情况下, 其功率消耗可灵活分配在多个时间点, 文献[29]考虑负荷弹回, 将需求响应项目中削减的电能以线性递减的方式分配在随后时间段内。对于热能系统, 文献[30-32]重点对热能传输延时以及楼宇蓄热特性进行刻画, 文献[33]采用一种改进的节点法描述热能运输的准动态过程。对于天然气系统, 由于天然气具有可压缩性, 其传输管道自身具有储气潜力, 稳态模型难以准确反映系统的真实运行状态, 天然气管道气压力动态事实上应由比电力系统常微分方程更为复杂的非线性偏微分方程描述^[34-35]。

在多能耦合设备的建模方面, 文献[36]建立了基

于Simulink包含发电机、涡轮机和吸收式制冷机3个关键部件的热电联产模型,在发电时回收余热为热负荷供电,提高了系统的整体用能效率。在大量的综合能源系统优化调度、机组组合研究中^[37-39],其对电热泵、CHP、燃气锅炉、电储能、热储能等各类设备元件特性单独进行建模,并列写能量平衡方程及转换约束。文献[40]不局限于传统的微分代数方程表征物理系统的准确建模与高效模拟,也包括了数据驱动的相关性模型,并借助数字孪生技术探讨了各组成部分的相互作用。

储能装置可与电、热、气设备配合,在负荷低谷时储能,负荷高峰时放能,且多能之间可以相互转换后储存起来,可有效提高VPP的灵活性。具体而言,对供热系统,由于热电联产存在“以热定电”,可联合电锅炉和蓄热罐提高热电联产机组的灵活性^[41],文献[17]验证了电热锅炉、CHP和储热装置可以极大提高电力系统在负荷峰值时的上调节能力,和负荷低谷时的下调节能力,并提出了负荷谷期向下灵活性最大化和负荷峰期向上灵活性最大化的调度模型,调配不同设备增强电网灵活性。对天然气系统,多余的电能可以转换成氢气或合成天然气,P2G和储气是天然气系统的主要灵活性来源^[39]。对综合能源系统,文献[42]考虑多种能量存储,建立电热氢多能储能系统,包含电储氢、电储热、电热储氢等多种运行模式,根据电网要求灵活改变,降低储能成本的同时,提高电网的灵活性。储能的加入为多能耦合挑战提供了解决思路。

综上,目前基于物理原理对于FRs的性能和数学模型刻画已经比较成熟。但类型多样的FRs的模型难以精确获得,其参数具有很大的分散性和不确定性,且其对VPP调控命令的响应行为也存在不确定性。在资源建模方面,未来VPP的发展方向为建立兼顾自身参数特性和响应不确定性的FRs模型。

3.2 资源集群

分布式电源、负荷、电动汽车等大量小容量FR难以直接参与电力市场的经济调控。原因有二:首先,其个体容量小,对电力系统的影响通常较低,行为模式的变化带来的效益较小,因此,单个FR参与电力市场调控的积极性低;其次,大量FRs直接参与系统调度时,系统运营商需求解复杂的高维优化模型,带来较大的计算负担,从而降低运行效率,无法保证电力系统的高效有序运行。因此,资源集群是实现灵活资

源与电网协调运行以及提高能源利用率的关键。云管边缘架构下资源集群主要有以下两种形态。

1) 具有边缘计算能力的边缘集群服务器考虑通信约束、可控能力、资源特性等特征后,对该服务器管理的资源进行聚合,在保证各FR运行约束满足的同时,充分挖掘集群规模灵活性。

2) 云管控平台结合电力市场的实时复杂多变性,以及网络拓扑、运行方式的变化,对各资源集群执行在线动态聚合,调整集群构成,形成云端资源集群,与电网进行交互。

FRs分布具有一定的地理特性,按照地理位置对其进行打包处理常作为资源集群的重要方式。楼宇、小区、学校、工厂、工业园区等的FRs可在本地形成自然物理集群,聚合成一个体量较大的个体,参加电网的调度运行和电力市场运营。文献[43]评估了VPP内基于地理决策的FRs分区方法,用多个区域的最大融合空间距离之和来衡量区域聚合程度,以实现区域内的分布式电源、储能、电动汽车、灵活负荷等资源的高效利用。在此基础上,边缘集群服务器首先根据负荷密度、用电水平、行政级别、经济水平和用户重要程度等对区域进行划分和统一管理,再采用边缘计算技术,实现终端FRs信息采集、处理一体化,并将聚合模型以及外部特性上送给云端管控平台。

基于地理特性集群无法准确刻画FRs的资源特性,资源聚合商作为终端FRs与上级电网的交互中介^[44],成为资源聚合的重要途径,常见的有负荷聚合商、综合能源服务商、电动汽车充电聚合商等。文献[45]中分布式资源向VPP出售电力,负荷聚合商以最小化购电成本和最大化消费者效益为目标对需求侧用户的日负荷进行聚合,作为从VPP购买的电量,一方面降低批发市场购电成本,一方面增加向批发市场出售多余发电的收入。文献[46]中VPP作为风、光、负荷等的能源服务商参与电力市场的电价竞标和电量竞标,确定VPP的交易电价、电量以及调度计划。文献[47]研究了风电商与电动汽车聚合商以合作模式组成的VPP参与电力市场投标竞争对市场均衡结果的影响,结果表明,不仅可有效减少投标偏差,还能增加风电商和电动汽车聚合商各自的利润。

考虑到分布式发电资源的随机性、负荷的多变性和电动汽车用户的行为差异性 etc 等不确定性,不确定性建模成为聚合的预处理步骤。处理不确定性最常见的方法为场景分析法,采用Wasserstein距离指标对风电、光伏发电出力的连续概率分布进行最优离

散化^[48]。由于大规模终端FRs提供的海量实时信息和隐私保护的需求,且基于商业代理聚合的方法面临着计算量大、维数高、聚合模型精度低等问题,因此,需要借助相关算法实现聚合。采用K-medoids^[49]、K-means^[50]、谱聚类^[51]等聚类算法对上述场景集进行场景削减和融合是很多文献采用的方法。

等值模型作为集群的外在表现形式,在保证终端用户隐私的同时,较好地刻画资源集群的整体调节能力和外特性。文献[52]将可调鲁棒优化应用于高载能负荷的聚合,等值模型为一个虚拟的发电机组模型,用功率的上下限约束和爬坡约束等参数来刻画聚合体的外特性,上传至调度中心使其直接调控。文献[53]针对风电和负荷的动态随机性,提出了一种基于数据驱动的VPP分布鲁棒优化模型,评估VPP的最大容量以及爬坡能力,基于鲁棒优化的聚合等值模型隐去了具体设备的有功调度模型和调度成本,因此等值模型相比精确模型会更加保守。文献[54]考虑建筑热惯性,用CHP的供应温度、发电功率取值的可行域表征系统的灵活性,从而将区域供热系统中的CHP机组、建筑物负荷聚合为可被电力系统直接调用的等效电厂可行域模型,解决了区域供系统和电力系统之间存在的信息隐私保护、通信传输、兼容性问题。文献[55]提出了多能VPP参与能量市场和旋转备用市场的可调鲁棒聚合模型,首次考虑机组快速启停能力提供的灵活性,该模型在运行成本最优的情况下保证了VPP能够执行所有可能的调度指令。可以看出,基于鲁棒优化的等值模型可以实现对大规模分布式资源的高效管理,降低能源管理复杂度,同时提高整体经济性和计算效率。

综上,资源集群可以将特性各异的小容量FRs的灵活性聚合形成对电网更友好可控的灵活性。现有研究多聚焦于边缘服务器的资源集群,多为静态聚合。动态聚合具有更大的适用场合,进一步利用不同资源的互补特性得到更多的灵活性。在资源聚合方面,未来VPP发展方向为聚合并等值连续、离散调节能力的混合FRs,并对等值模型的有效性和可信性进行评估。

3.3 协同调控

资源协同调控是电力系统安全可靠运行的基本保障。云管边缘架构下资源协同调控主要分为两方面。

1) 云管控平台响应电网调控指令,调控对象为集群。云平台采集边缘服务器聚合的FRs集群等值模型并与电网进行信息交互,电网审核并确认VPP出力

计划后下发调度指令,在接收到电网的调度指令后,云平台以收益最大化或运行过程最小化为目标,结合集群可调节能力和外特性,将指令分解给各集群,实现对各集群运行状态的综合优化。

2) 边缘服务器分解云平台下发的调控指令,调控对象为单个集群内的各FRs。边缘服务器结合各集群内分布式发电出力及负荷预测等信息,接收电力市场下发的电价,以最大化自身效益为目标调整投标竞价策略,并根据市场交易情况,调整各设备的实际出力,保证发用电实时平衡的同时,提供辅助服务,实现对电、热、冷、气分布式资源的集约利用。

虚拟电厂管辖的FRs主要从低压配电网接入电力系统^[7],参与的配电侧电力市场主要包括能量市场和辅助服务市场,如何实现多方共赢是VPP参与市场交易的原动力,其主要盈利途径包括:纳入风光等零或低边际成本的发电资源;根据市场电价波动调节分布式电源出力、需求响应,实现低谷用电、高峰售电;利用微燃机、生物质发电等启动速度快、出力灵活的特点,参与电网的辅助服务,获取收益等。

确定竞价策略是VPP参与市场交易的第一步。在现有的市场交易中,VPP常作为价格接受者,因此只需根据市场的出清价格优化其竞标电量。在日前能量市场交易关闭前,VPP预测自身出力并向调度中心提交第二天24小时的竞标信息,在日内市场购入或售出特定数量的电能,以平衡实际出力和竞标量间的偏差,接着辅助服务市场向市场运行机构提交备用容量的投标(上调备用、下调备用、旋转备用),最后在实时市场运行结束结算不平衡功率。中标后,由于FRs实际出力与预测出力存在偏差,因此竞标出力与实际最大出力不匹配,以VPP收益最大化为目标,文献[56]利用电动汽车电池的储能特性平抑风电机组出力波动,构建了VPP参与日前能量市场和辅助服务市场的联合竞价策略的鲁棒优化模型,文献[57]针对住宅屋顶光伏和电池储能系统聚合的VPP,提出了嵌入电池循环寿命模型的调频市场优化竞标策略和与风电合作的联合优化竞标策略。在此基础上,文献[58]将需求侧响应资源纳入VPP参与日前市场的最优竞价,建立了三阶段随机双层优化模型,其中双层模型由代表VPP利润最大化问题的上层和代表独立系统运营商日前市场清算问题的下层组成。文献[59]针对可再生能源发电量和非弹性需求量都无法准确预测和调度的问题,目标为日前和实时市场中VPP的成本最小化,建立了一个决策变量为可再生能源使用量和日前报价

的随机双层优化问题。文献[60]考虑了间歇性可再生能源、零售用户需求和电价等因素对系统不确定性的影响,通过购买需求响应服务,降低日报价与实时调度的偏差惩罚成本,构建三阶段随机优化模型,以期提高VPP的预期利润和可再生能源利用率。文献[61]在第一阶段确定日前市场的竞价策略,在第二阶段决定一天中每小时在实时市场上的竞价策略,其中风电生产和市场价格的不确定性用鲁棒优化处理。

在机组组合方面,文献[62]考虑了VPP自身的供需平衡约束和安全约束,提出了基于确定性电价的机组组合非均衡模型。文献[63]考虑燃料发电机组、电池储能与可中断负荷参与备用,基于成本效益分析建立发电容量与备用容量的协调优化模型,充分挖掘VPP内其他灵活性资源的调节能力,实现多种类备用容量的协调优化对于提升VPP接纳可再生能源发电的能力具有重要意义。文献[53]采用分布式鲁棒优化模型帮助VPP在可靠性机组投资组合运行中,优化其投标报价参数。

由于目前VPP的结构绝大多数为传统的集中式、分散式、集中-分散式,且VPP规模较小,集群也不多,甚至将VPP整体作为一个集群参与电网调控,VPP控制中心直接将电网的调度指令对各FRs执行调控。

在多时间尺度下VPP的优化调度方面,在日前阶段,文献[64]研究了基于电转气技术的电、热、气耦合系统的经济调度模型,实现了系统风能利用率的提高和购能成本的降低;在日内阶段,文献[65]采用能源集线器模型,在对系统详细建模的基础上,以日运行费用最小为目标实现电、热、冷能的优化调度运行;在实时阶段,文献[66]在分时电价机制下,以调度周期内收益最大为目标,协调电热泵、热电联产(combined heat and power, CHP)设备、辅助锅炉和蓄热、蓄电装置的运行,满足建筑系统冷、热、电需求,获得了较高供能效率;在考虑可再生能源以及负荷的不确定性后,文献[67]建立了包含滚动优化环节和动态调整环节的两阶段多时间尺度模型预测控制调度策略,通过多步滚动求解制定系统大时间尺度调度计划,并以此为基准,对设备的运行状态进行调整,应对小时间尺度的不确定性变化;文献[68]在借助场景削减方法处理不确定性基础上,利用储热罐和冰蓄冷机技术,为实现时间维度上的冷热电解耦提供了新的思路。

在求解方法方面,上述多数优化模型可转化为混合整数线性规划,如文献[69]将一个维数高、非线性、

多约束的混合整数优化问题通过引入中间变量将非线性约束转化为线性约束,继而采用割平面法和分支定界法求得解析解,或采用通用商业软件如MATLAB、LINGO、CPLEX^[59]等进行求解。

综上,针对多能尺度、多时间尺度和多空间尺度下VPP的资源调控、优化调度运行已成为研究热点。在协同调控方面,未来VPP的发展方向为在云管边缘架构下,凭借其大量数据和强大计算能力,采用人工智能、大数据等技术,加快求解速度,提高调度效率。

4 研究展望

4.1 能源网、信息网多网融合VPP研究

未来能源网、信息网将高度耦合,虚拟电厂中灵活性资源不仅局限于电、热、冷、气等能源系统中的分布式发电、储能、电动汽车、可控负荷、多能耦合设备等,也应考虑信息网中对应感知、传输、存储、计算功能的带宽、流量等资源。信息网的感传存算资源为能源网提供信息灵活性,保证能源网的安全可靠运行;能源网的源网荷储资源为信息网提供能源灵活性,保证信息网的高效可靠计算。为实现多网之间的融合互动,需构建多网交互的弹性资源池,进而从能源和信息层面扩展VPP的灵活性维度,先进的信息通信技术是实现能源网中信息资源灵活分配的基础,支撑能源网的安全稳定可靠运行。

FRs种类愈加广泛多样,对于边缘服务器的信息感知、采集、处理、计算的要求也愈高,资源分类、集群的规则和算法也不同。建立能源-信息资源池后,如何考虑能源网、信息网联合约束,以能源互联网在调峰、调频、调压、可再生能源消纳、线路阻塞控制等电网调度需求为目标,研究适用于多网融合的能源-信息资源集群聚合与解聚合方法,是构建未来多网融合VPP的研究内容之一。

4.2 多主体广泛协同参与VPP研究

VPP耦合多种能源,集成各类能量转换设备,将不同形式的能源转换为用户所需的电、热、冷等多种能源,为实现电能替代、多能互补提供了条件和机遇。目前VPP的参与者主要包括分布式发电、储能、电动汽车、可控负荷等主体,但并非所有用户都愿意参与VPP,从用户的角度,其只关注VPP给其带来的便利性及增值服务,因此,激活更多的参与者,将参与者及其资产进行创新集成,充分挖掘灵活性,是扩

大VPP建设规模的关键。

激活参与者首先需要制定能够适应电力市场发展以及反映分布式资源灵活性的建设标准,完善对于分布式能源、终端用户的补贴政策,可以根据参与容量级别制定补贴方案;其次,需要巩固终端智能设备、边缘服务器的建设,使其具备可延展性,对于一定范围内增加的设备和用户,能够满足响应的信息交流数和数据带宽传输,以免造成信息阻塞。

4.3 VPP可靠性评估研究

VPP作为灵活性资源集成聚合的主要形式,是实现向能源互联网转型的重要阶段,现有的研究以及工程示范表明VPP可以通过聚合大量FRs提供可调节容量和备用容量,参与辅助服务,有效提高能源网的灵活性、提高能源利用效率,并通过资源的优化调度降低用能成本。然而,鲜有学者对VPP的可靠性贡献进行研究,缺乏相应完善的可靠性评估体系,从而导致难以评估VPP整体的潜在价值。

如何量化VPP的可信虚拟容量,并且还能够兼顾对配电网的可靠性效益,对于研究分析VPP的潜在价值具有重要意义,为VPP运营商投资扩容决策提供信息支撑,也将为后续VPP的优化运行奠定研究基础。

4.4 VPP盈利模式研究

VPP借助通信、计量、控制等技术,实现对FRs的能量和信息管理,同时汇聚多个分布式发电类资源、储能类资源的虚拟发电能力,达到与传统电厂具有相同功能的目的,作为一个虚拟发电实体从电力市场中谋利。由于VPP内部的FRs种类丰富多样,出力特性也存在较大差异,可以为电网提供调频、调压、备用等多种类型的辅助服务,VPP运营商根据内部FRs的资源特征,结合出力曲线和负荷曲线,制定投标竞价方案,实现在辅助服务市场和能量市场等多个市场中获利。

然而,随着VPP内部参与主体日益增多,且各利益主体间通常为非合作的,存在竞争关系,如何计及VPP内部各类主体的利益诉求,协调各参与主体的利益分配,是未来VPP盈利模式要探究的重要方向。

5 结语

有效利用FRs提升电网的调节能力是解决电力系统灵活性需求的主要手段,其中VPP成为FRs应用的

重要技术。人工智能和云边协同技术为管理灵活性闲散资源终端的数据信息,实现信息传输与交互提供了有力的保障和支撑。

在能源互联网背景下,FRs的高效利用主要面临“多能耦合、地域分散、多动态速度”3方面挑战。VPP需要借助层次化的结构——云管边端架构,实现能源的高效调度和可拓展性。在资源建模方面,需要攻克的关键技术是建立兼顾参数特性和响应不确定性的FRs模型;在资源集群方面,需要攻克的关键技术为云端管控平台的在线动态聚合技术;在协同调控方面,需要攻克的关键技术为如何利用大数据、人工智能等技术提高调度效率。随着能源网、信息网持续交互融合,VPP参与主体逐渐多样化,VPP参与电网可靠运行要求不断提高,未来将从多网融合VPP、多主体参与VPP、VPP可靠性评估、VPP盈利模式4个角度切入VPP的研究。

参考文献

- [1] 国家能源局. 电力发展“十三五”规划(2016-2020年)[EB/OL]. (2016-12-26) [2020-08-03]. http://fjb.nea.gov.cn/news_view.aspx?id=27538.
- [2] 程瑜, 安甦. 主动负荷互动响应行为分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20): 63-70.
CHENG Yu, AN Su. Analysis of active load's interaction response behavior[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20): 63-70(in Chinese).
- [3] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 1-8.
SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang. Energy Internet: concept, architecture and frontier outlook[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8(in Chinese).
- [4] 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(in Chinese).
- [5] YAVUZ L, ÖNEN A, MUYEEN S M, et al. Transformation of microgrid to virtual power plant – a comprehensive review[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(11): 1994-2005.[LinkOut]
- [6] ZHANG G, JIANG C W, WANG X. Comprehensive review on structure and operation of virtual power plant in electrical system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(2): 145-156.
- [7] 仪忠凯, 许银亮, 吴文传. 考虑虚拟电厂多类电力产品的配电侧市场出清策略[J/OL]. 电力系统自动化. <https://kns.cnki.net>

- cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200624.1843.006.html
 YI Zhongkai, XU Yinliang, WU Wenchuan. Market clearing strategy for distribution system considering multiple power commodities offered by virtual power plant[J/OL]. Automation of Electric Power Systems, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20200624.1843.006.html>(in Chinese).
- [8] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-8.
 SUN Hongbin, PAN Zhaoguang, GUO Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8(in Chinese).
- [9] 乐健, 柳永妍, 叶曦, 等. 商业型虚拟发电厂调度优化策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 159-167.
 LE Jian, LIU Yongyan, YE Xi, et al. Review on dispatch optimization strategies of commercial virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 159-167(in Chinese).
- [10] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.
 KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11(in Chinese).
- [11] LIU W J, WU Q W, WEN F S, et al. Day-ahead congestion management in distribution systems through household demand response and distribution congestion prices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2739-2747.
- [12] 周宇, 马汝祥, 卫志农, 等. 基于技术型虚拟电厂的配电网阻塞管理[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 302-308.
 ZHOU Yu, MA Ruxiang, WEI Zhinong, et al. Research on congestion management of technological virtual power plant[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 302-308(in Chinese).
- [13] MAIRA R M, RODRIGUES Y R, ABDELAZIZ M, et al. New technique for area-based voltage stability support using flexible resources[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 186: 106384.
- [14] KORAKI D, STRUNZ K. Wind and solar power integration in electricity markets and distribution networks through service-centric virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 473-485.
- [15] QIN X, SUN H B, SHEN X W, et al. A generalized quasi-dynamic model for electric-heat coupling integrated energy system with distributed energy resources[J]. Applied Energy, 2019, 251: 113270.
- [16] 杨经纬, 张宁, 王毅, 等. 面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 11-24.
 YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 11-24(in Chinese).
- [17] WEI W, YAN X G, NI Y T, et al. Power system flexibility scheduling model for wind power integration considering heating system[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. July 16-20, 2017, Chicago, IL, USA. IEEE, 2017: 1-5.
- [18] GOOD N, MANCARELLA P. Flexibility in multi-energy communities with electrical and thermal storage: a stochastic, robust approach for multi-service demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 503-513.
- [19] CHEN Z Q, SUN Y Y, AI X, et al. Integrated demand response characteristics of industrial park: a review[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(1): 15-26.
- [20] HOOSHMAND R A, NOSRATABADI S M, GHOLIPOUR E. Event-based scheduling of industrial technical virtual power plant considering wind and market prices stochastic behaviors-A case study in Iran[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 1748-1764.
- [21] 袁桂丽, 苏伟芳. 计及电动汽车不确定性的虚拟电厂参与 AGC 调频服务研究[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2538-2548.
 YUAN Guili, SU Weifang. Virtual power plants providing AGC FM service considering uncertainty of electric vehicles. Power System Technology, 2020, 44(7): 2538-2548(in Chinese).
- [22] PARK S W, SON S Y. Interaction-based virtual power plant operation methodology for distribution system operator's voltage management[J]. Applied Energy, 2020, 271: 115222.
- [23] 国家发展和改革委员会. 电力中长期交易基本规则[R/OL]. (2020-07-01)[2020-8-3]. <https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/gxwj/202007/P020200701615033180814.pdf>.
- [24] 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).
- [25] SITTÓN-CANDANEDO I, ALONSO R S, CORCHADO J M, et al. A review of edge computing reference architectures and a new global edge proposal[J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 99: 278-294.
- [26] FANG D W, GUAN X, LIN L, et al. Edge intelligence based economic dispatch for virtual power plant in 5G Internet of energy[J]. Computer Communications, 2020, 151: 42-50.
- [27] XIN S J, GUO Q L, SUN H B, et al. Cyber-physical modeling and cyber-contingency assessment of hierarchical control systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2375-2385.
- [28] Solar Energy Institute of America (SEIA). Solar market insight report 2019 year in review [R]. 2019 [2020-8-3]. <https://www.seia.org/research-resources/solar-market-insight-report-2019-year-review>.
- [29] ZENG B, WEI X, SUN B, et al. Assessing capacity credit of demand response in smart distribution grids with behavior-driven modeling framework[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118: 105745.
- [30] 裴玮, 邓卫, 沈子奇, 等. 可再生能源与热电联供混合微网能量协调优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(16): 9-15.
 PEI Wei, DENG Wei, SHEN Ziqi, et al. Energy coordination and optimization of hybrid microgrid based on renewable energy and CHP supply[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(16): 9-15(in Chinese).
- [31] 靳小龙, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 融合需求侧虚拟储能系统的冷热电联供楼宇微网优化调度方法[J]. 中国电机工程学报

- 报, 2017, 37(2): 581-591.
- JIN Xiaolong, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal scheduling method for a combined cooling, heating and power building microgrid considering virtual storage system at demand side[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 581-591(in Chinese).
- [32] GU W, WANG J, LU S, et al. Optimal operation for integrated energy system considering thermal inertia of district heating network and buildings[J]. Applied Energy, 2017, 199: 234-246.
- [33] 王明军, 穆云飞, 孟宪君, 等. 考虑热能输运动态特性的电-热综合能源系统优化调度方法[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 132-142.
- WANG Mingjun, MU Yunfei, MENG Xianjun, et al. Optimal scheduling method for integrated electro-thermal energy system considering heat transmission dynamic characteristics[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 132-142(in Chinese).
- [34] 王志农, 梅建春, 孙国强, 等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 41-47.
- WEI Zhinong, MEI Jianchun, SUN Guoqiang, et al. Multi-period transient energy-flow simulation of integrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 41-47(in Chinese).
- [35] 乔铮, 郭庆来, 孙宏斌. 电力-天然气耦合系统建模与规划运行研究综述[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 14-26.
- QIAO Zheng, GUO Qinglai, SUN Hongbin. Research survey on the modeling, planning and operational analysis of electricity-natural gas coupling system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 14-26(in Chinese).
- [36] SUN T K, LU J, LI Z M, et al. Modeling combined heat and power systems for microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4172-4180.
- [37] MARTINEZ CESENA E A, MANCARELLA P. Energy systems integration in smart districts: robust optimisation of multi-energy flows in integrated electricity, heat and gas networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 1122-1131.[LinkOut]
- [38] DAI Y H, CHEN L, MIN Y, et al. A general model for thermal energy storage in combined heat and power dispatch considering heat transfer constraints[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1518-1528.
- [39] TURK A, WU Q W, ZHANG M L, et al. Day-ahead stochastic scheduling of integrated multi-energy system for flexibility synergy and uncertainty balancing[J]. Energy, 2020, 196: 117130.
- [40] 沈沉, 贾孟硕, 陈颖, 等. 能源互联网数字孪生及其应用[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 1-13.
- SHEN Chen, JIA Mengshuo, CHEN Ying, et al. Digital twin of the energy Internet and its application[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(1): 1-13(in Chinese).
- [41] CHEN X Y, KANG C Q, O'MALLEY M, et al. Increasing the flexibility of combined heat and power for wind power integration in China: modeling and implications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 1848-1857.
- [42] TENG Y, WANG Z D, LI Y, et al. Multi-energy storage system model based on electricity heat and hydrogen coordinated optimization for power grid flexibility[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2):266-274.
- [43] 杨文海. 城市电网需求侧能源资源动态聚合决策及信息系统研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2018.
- [44] 袁晓冬, 费骏韬, 胡波, 等. 资源聚合商模式下的分布式电源、储能与柔性负荷联合调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 17-26.
- YUAN Xiaodong, FEI Juntao, HU Bo, et al. Joint scheduling model of distributed generation, energy storage and flexible load under resource aggregator mode[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 17-26(in Chinese).
- [45] MNATSAKANYAN A, KENNEDY S W. A novel demand response model with an application for a virtual power plant[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 230-237.
- [46] 方燕琼, 甘霖, 艾芊, 等. 基于主从博弈的虚拟电厂双层竞标策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 61-69.
- FANG Yanqiong, GAN Lin, AI Qian, et al. Stackelberg game based Bi-level bidding strategy for virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 61-69(in Chinese).
- [47] 王晔, 张华君, 张少华. 风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 155-164.
- WANG Xian, ZHANG Huajun, ZHANG Shaohua. Game model of electricity market involving virtual power plant composed of wind power and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 155-164(in Chinese).
- [48] 邹云阳, 杨莉. 基于经典场景集的风光水虚拟电厂协同调度模型[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1855-1859.
- ZOU Yunyang, YANG Li. Synergetic dispatch models of a wind/PV/hydro virtual power plant based on representative scenario set[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1855-1859(in Chinese).
- [49] 王群, 董文略, 杨莉. 基于Wasserstein距离和改进K-medoids聚类的风电/光伏经典场景集生成算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2654-2661.
- WANG Qun, DONG Wenlue, YANG Li. A wind power/photovoltaic typical scenario set generation algorithm based on Wasserstein distance metric and revised K-medoids cluster[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(11): 2654-2661(in Chinese).
- [50] 朱誉, 仪忠凯, 陆秋瑜, 等. 基于典型场景集的虚拟电厂与配电网协同定价策略[J]. 电力建设, 2019, 40(6): 74-85.
- ZHU Yu, YI Zhongkai, LU Qiuyu, et al. Collaborative pricing strategy of virtual power plant and distribution network considering typical scenes[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(6): 74-85(in Chinese).
- [51] YI Z K, XU Y L, GU W, et al. A multi-time-scale economic scheduling strategy for virtual power plant based on deferrable loads aggregation and disaggregation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1332-1346.
- [52] JIN H Y, LI Z S, SUN H B, et al. A robust aggregate model and the two-stage solution method to incorporate energy intensive enterprises in power system unit commitment[J]. Applied Energy, 2017, 206: 1364-1378.
- [53] BABAEI S, ZHAO C Y, FAN L. A data-driven model of virtual power plants in day-ahead unit commitment[J]. IEEE

- Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5125-5135.
- [54] PAN Z G, GUO Q L, SUN H B. Feasible region method based integrated heat and electricity dispatch considering building thermal inertia[J]. Applied Energy, 2017, 192: 395-407.
- [55] ZHAO H T, WANG B, PAN Z G, et al. Aggregating additional flexibility from quick-start devices for multi-energy virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020: 1.
- [56] 杨甲甲, 赵俊华, 文福拴, 等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 92-102.
YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 92-102(in Chinese).
- [57] 陈雯, 孙荣峰, 邱靖, 等. 考虑电池寿命的虚拟电厂调频竞标模型及合作利润分配策略[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(4): 374-384.
CHEN Wen, SUN Rongfeng, QIU Jing, et al. Profit allocation and frequency regulation bidding strategy of virtual power plant considering battery cycle life[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(4): 374-384(in Chinese).
- [58] KARDAKOS E G, SIMOGLU C K, BAKIRTZIS A G. Optimal offering strategy of a virtual power plant: a stochastic Bi-level approach[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 794-806.
- [59] ZHAO Q C, SHEN Y, LI M Y. Control and bidding strategy for virtual power plants with renewable generation and inelastic demand in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 562-575.
- [60] NGUYEN H T, LE L B, WANG Z Y. A bidding strategy for virtual power plants with the intraday demand response exchange market using the stochastic programming[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3044-3055.
- [61] RAHIMIYAN M, BARINGO L. Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: a price-taker robust optimization approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2676-2687.
- [62] MASHHOUR E, MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets: part I: problem formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 949-956.
- [63] 吕梦璇, 娄素华, 刘建琴, 等. 含高比例风电的虚拟电厂多类型备用协调优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(10): 2874-2882.
LÜ Mengxuan, LOU Suhua, LIU Jianqin, et al. Coordinated optimization of multi-type reserve in virtual power plant accommodated high shares of wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(10): 2874-2882(in Chinese).
- [64] 陈沼宇, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑P2G多源储能型微网日前最优经济调度策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3067-3077.
CHEN Zhaoyu, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Research on optimal day-ahead economic dispatching strategy for microgrid considering P2G and multi-source energy storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3067-3077(in Chinese).
- [65] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 179-186.
MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Energy flow modeling and optimal operation analysis of micro energy grid based on energy hub[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 179-186(in Chinese).
- [66] MOGHADDAM I G, SANIEI M, MASHHOUR E. A comprehensive model for self-scheduling an energy hub to supply cooling, heating and electrical demands of a building[J]. Energy, 2016, 94: 157-170.
- [67] 王成山, 吕超贤, 李鹏, 等. 园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6791-6803.
WANG Chengshan, LÜ Chaoxian, LI Peng, et al. Multiple time-scale optimal scheduling of community integrated energy system based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6791-6803(in Chinese).
- [68] 张萌萌, 董军. 基于CVaR的灵活综合能源系统随机调度优化模型[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 301-309.
ZHANG Mengmeng, DONG Jun. Stochastic scheduling model for flexible integrated energy system based on CVaR[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(3): 301-309 (in Chinese).
- [69] 李旭东, 艾欣, 胡俊杰, 等. 计及碳交易机制的核-火-虚拟电厂三阶段联合调峰策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2460-2470.
LI Xudong, AI Xin, HU Junjie, et al. Three-stage combined peak regulation strategy for nuclear-thermal-virtual power plant considering carbon trading mechanism[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2460-2470(in Chinese).

收稿日期: 2020-08-15; 修回日期: 2020-10-14。



卫璇

作者简介:

卫璇(1995), 女, 博士研究生, 研究方向为云边协同虚拟电厂, E-mail: dear_xuaner@126.com。

潘昭光(1991), 男, 博士, 研究方向为多能流综合能量管理, E-mail: panzhaoguang@tsinghua.edu.cn。

王彬(1984), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为智能电网和能源互联网的能源管理与运行调控, E-mail: wb1984@tsinghua.edu.cn。

孙宏斌(1969), 男, 博士, 教授, 博士生导师, IEEE Fellow, 教育部长江学者, 研究方向为多能流系统的综合能量管理、电力系统信息论和无功电压优化控制。通信作者, E-mail: shb@tsinghua.edu.cn。

郭庆来(1979), 男, 博士, 副教授, 研究方向为多能流系统的综合能量管理、信息物理系统和无功电压优化控制, E-mail: guoqinglai@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)