

面向新型电力系统的虚拟电厂商业模式与关键技术

葛鑫鑫¹, 付志扬², 徐 飞³, 王 飞^{1, 4, 5}, 王俊龙⁶, 王 涛²

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北省保定市 071003;

2. 华北电力大学数理系, 河北省保定市 071003;

3. 电力系统及大型发电设备安全控制和仿真国家重点实验室(清华大学), 北京市 100084;

4. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 102206;

5. 河北省分布式储能与微网重点实验室(华北电力大学), 河北省保定市 071003;

6. 国网河北省电力有限公司, 河北省石家庄市 050022)

摘要:以新能源为主体的新型电力系统的电源侧结构与负荷侧形态均发生深刻变化,导致其电力电量平衡困难日益凸显,对用户侧灵活性可调节资源的需求更为迫切。虚拟电厂通过需求响应和协调控制聚合海量、分散、多元的柔性负荷与分布式资源,形成大容量的统一灵活调节能力,对保障新型电力系统安全稳定运行至关重要。文中从虚拟电厂的基本概念、商业模式和关键技术三方面进行综述。首先,介绍了虚拟电厂的概念、特点和功能,对比分析了国内外具有借鉴意义的虚拟电厂示范工程;其次,从价值主张、资源组成、经营模式和成本收益等多方面阐述了虚拟电厂的商业模式;再次,从状态感知与灵活聚合、信息预测与容量估计、市场交易与优化决策、补偿结算与效益评估等方面综述了虚拟电厂关键技术,剖析了现有技术、模型和方法的重点与难点;最后,展望了面向新型电力系统的虚拟电厂未来发展方向。

关键词:虚拟电厂;需求响应;新型电力系统;分布式资源;商业模式;系统灵活性

0 引言

大力发展以风电、光伏发电为代表的新能源,加快构建新型电力系统^[1-4],是推动中国能源绿色低碳转型、实现“碳达峰·碳中和”的必由之路^[5-6]。预计到2030年,中国风光总装机容量将超过1 200 GW,成为装机主体;到2060年风光发电量占比将超50%,成为电量主体^[7]。风光装机容量和电量占比快速上升显著增加了系统源侧的不确定性^[8],加大了电力电量平衡难度,传统“源随荷动”的平衡模式难以为继,严重影响新型电力系统的安全稳定运行^[9]。

维持电力系统功率平衡需要系统具备充足的灵活性,即安全高效、快速爬坡的功率调节能力^[10]。灵活调节电源占比提高的方式主要包括建设抽水蓄能电站、新型储能电站和煤电灵活性改造等,然而,其建设和运维成本、机组改造和启停成本均较高。国家发展改革委、国家能源局印发的《“十四五”现代

能源体系规划》^[2]明确提出:到2025年,灵活调节电源占比达到24%左右,电力需求侧响应能力达到最大用电负荷的3%~5%^[5]。相较于源侧提升系统灵活性的方式,需求响应通过聚合分布式资源(DER)挖掘荷侧各类柔性负荷的主动响应潜力,是边际成本较低的灵活性资源供给方式^[11],能够提升系统灵活性,促进“源荷互动”,是构建新型电力系统的关键支撑技术^[12-14]。然而,如何高效聚合、协同调度荷侧海量、分散、多元的DER,依托何种第三方主体开展大规模的需求响应现实应用,为系统提供可用的灵活性,是当前研究的热点。

作为实现需求响应项目落地应用的主体之一,虚拟电厂(VPP)基于先进的量测、通信和控制技术,能实现荷侧DER的可观、可测、可控,可有效提升系统灵活性水平和输电系统运营商(TSO)、配电网系统运营商(DSO)对DER的管理水平^[15]。VPP通过聚合海量DER形成了较大规模的响应容量,可参与电力市场交易,促进荷侧灵活资源不同时空环境下的优化配置。在建设全国统一大市场和深化电力市场化改革的背景下,对VPP开展相关研究具有较高的现实价值和广泛的应用前景^[16]。

目前,国内外已有较多专家学者和科研院所对

收稿日期:2022-04-30;修回日期:2022-08-07。

上网日期:2022-08-25。

国家重点研发计划资助项目(2018YFE0122200);国家电网公司科技项目(SGHEYX00SCJS2000037)。

VPP相关问题开展了大量研究^[6,17-34]。本文通过对国内外VPP的相关研究进行归纳总结后发现,现有研究主要涉及两方面:1)VPP的商业模式,包括VPP的运营架构模式、聚合资源组成和成本收益分析等;2)VPP的关键技术,包括智能计量、信息通信、资源聚合、状态感知、竞价调度和利益分配等。

新型电力系统正经历“源侧出力随机化、荷侧用电复杂化”等深刻变革,本文旨在上述研究基础上全面梳理VPP相关研究现状,分析归纳VPP的关键技术、模型方法和商业模式,深入探讨VPP的未来结构形态,为提升VPP在新型电力系统建设过程中的作用提供支撑。需要注意的是,虽然智能计量和信息通信技术是VPP关键技术的重要组成部分,但其更多偏向于硬件测量、通信架构和协议,与VPP的商业模式并无直接联系。本文所指VPP关键技术,仅针对VPP优化运营的资源聚合、状态感知、竞价调度和利益分配技术,以支撑VPP优化运营与现有业务能力提升。本文介绍了VPP的概念、特点和功能,阐述了VPP的商业模式。从状态感知与灵活聚合、信息预测与容量估计、市场交易与优化决策、补偿结算与效益评估等方面梳理了VPP的关键技术,剖析了现有技术模型方法的重点与难点。最后探讨了新型电力系统下VPP的发展方向。

1 虚拟电厂概述

1.1 虚拟电厂概念

结合现有研究以及示范工程实践,VPP是利用先进的通信、量测、控制技术和软件系统构成的虚拟联合体,实现对分布式电源、储能、可控负荷、电动汽车等DER的集群聚合与优化控制,并作为整体参与电网调度运行与电力市场交易。其内部资源在空间上分散分布而非一个集中的物理实体,故称之为“虚拟”;在整体上协同一致实现与电厂相同的功能,故称之为“电厂”。VPP控制结构分为集中和分散控制。集中控制结构见图1。分散控制结构见图2,该结构下VPP被划分成彼此相互通信、自治和智能的子系统,通过协同合作完成调控任务。

1.2 VPP基本功能

依据VPP所实现的功能,通常可将其分为商业型VPP以及技术型VPP^[35]。其中,前者侧重于VPP在能量、辅助服务等电力市场中的交易功能;后者则侧重于VPP依据系统调度指令直接参与配电网运行与管理。本文从综合型VPP的角度出发,将上述两种类型视为综合型VPP的两大功能模块,同时兼顾市场交易与系统调度运行两部分功能,且两者相互配合、优势互补。

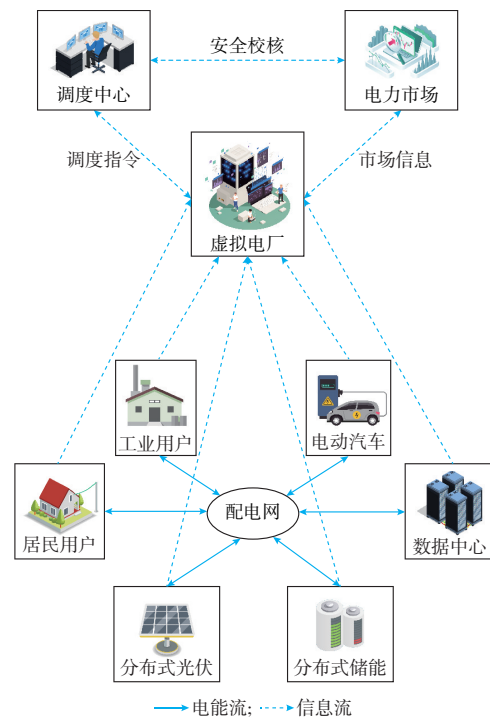


图1 VPP的集中控制结构

Fig. 1 Centralized control structure of VPP

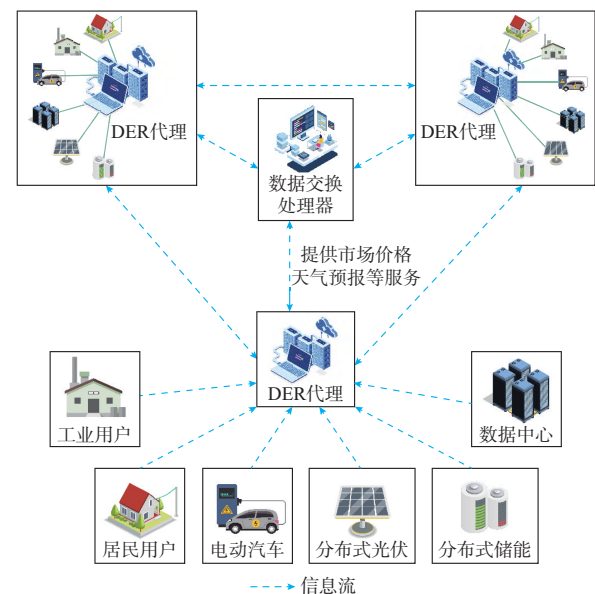


图2 VPP的分散控制结构

Fig. 2 Decentralized control structure of VPP

在参与系统调度运行层面,VPP主要依据DSO的调控指令,通过对需求侧的DER进行主动管理,缓解配电网阻塞和台区电压抬升^[36]等问题,在满足配电网安全稳定运行需求的同时,提升区域自治水平、促进分布式能源的就地消纳与高效利用。如文献^[37]中,VPP通过在调度周期内灵活转移负荷,以实现削峰填谷,有效促进风电的消纳;文献^[38]中

VPP则依据系统安全运行约束构建配电网阻塞模型管理模型,有效消除配电网线路过载问题。

在市场交易层面,多元化的DER为VPP提供了差异化的聚合外特性^[39],使VPP能够参与包括能

量市场,调峰、调频、备用辅助服务市场^[40]等不同的市场交易,不同的市场有不同的要求^[41]。

1.3 VPP典型示范工程

国内外典型VPP示范工程概览如表1所示。

表1 国内外典型VPP示范工程概览
Table 1 Overview of typical VPP demonstration projects at home and abroad

地点	工程	聚合资源	实现效果	创新形式
欧盟	FENIX ^[42] (2005—2009)	光伏、风电、小水电、生物质能电站、燃料电池、热电联产(CHP)	每年系统耗气量减少1%~3%,电力行业单位千瓦负荷年均二氧化碳排放量减少了7.5 kg	通过FENIX box与本地系统接口,允许远程访问以进行监视和控制
欧盟	Next-Kraftwerke ^[43] (2009—)	分布式光伏、风电、水电、生物质能、储能等	截至2022年4月,联网发电能力超10 GW,其中超过60%来自太阳能发电,占据了德国二次调频市场10%的份额	通过智能控制平台NEMOCS对13 000多个工厂进行联网和控制,在不同电力交易中心(欧洲电力交易所和欧洲能源交易所)中进行24 h/7 d交易
欧盟	WEB2ENERGY ^[44] (2010—2012)	CHP电厂、储能电池、光伏电站、风电场、小型水电站、大型可控负荷	在试点项目的第1个月,已引入了3%的负荷进行转移。在极端情况下100%被移到绿灯阶段,平均削减约8%的峰值功率	2种VPP控制策略:一是依据当前市场要求与资源状态自动调控;二是通过日前规划,生成电能消费参考曲线和虚拟交通灯时段
澳大利亚	AGL能源公司VPP ^[45] (2016—)	主要为用户侧储能,未来将包括屋顶光伏、电动汽车、工商业负荷等	涉及在南澳大利亚州的家庭和企业中安装的1 000个电池,提供5 MW的峰值容量;截至第1阶段结束,该项目拥有超过300 kW的储能能力	引入澳大利亚国家电力市场(NEM)的5 min结算交易间隔内进行虚拟充电或放电
美国	Autogrid ^[46] (2011—)	储能系统、CHP、分布式光伏、电动汽车等	2021年夏季,Autogrid VPP被调用了1 800次,当电网运行压力较大时能提供超过5 000 MW的容量和37 GW·h的电能	通过Autogrid Flex平台,实现对数百万分布式能源资产的预测、优化和实时控制
中国江苏	大规模源网荷友好互动系统 ^[47] (2016—)	大用户、燃煤电厂可中断辅机、大型储能电站、智慧照明、分散式空调等	毫秒级控制总容量达到2.6 GW,控制对象共计2 078户;相当于4台百万千瓦火电机组,节省投资126.4亿元	利用“互联网+智能电网技术”,对分散的海量可中断用电负荷进行精准实时控制
中国上海	上海黄浦VPP ^[48] (2015—)	商业写字楼、储能电站、电动汽车等	2021年5月5日至6日,调节电网负荷共562 MW,消纳清洁能源1 236 MW·h,减少碳排放约336 t;目前已初步建成了约1 GW的灵活调节能力	创新应用信息物理系统(CPS),进行实时监控、自动执行指令、自动优化升级策略
中国河北	国网冀北电力泛在电力物联网VPP示范工程 ^[49] (2019—)	工商业可调节负荷、智慧楼宇、数字中心、电动汽车、电蓄热锅炉等11类灵活性资源	实时接入约160 MW灵活性资源,涵盖张家口、秦皇岛和廊坊3个地市	通过智能运营管控平台,实现了“秒级感传算用”“亿级用户能力”和“多级共享生态”三级跨越

欧洲是目前世界上VPP最集中的地区,许多示范工程已较为成熟,构建起了完备的商业模式与市场生态链。据Guidehouse Insights预测,2028年欧洲VPP的市场年收入将超过30亿美元。由于欧洲各国分布式电源的渗透率较高,故而其VPP项目所关注的重点为分布式电源的可靠并网,以及VPP通过分布式能源在电力市场中的盈利模式。相较而言,美国的电力负荷用电需求较高,在VPP的试点过程中主要侧重于用户侧柔性负荷的主动响应。亚太地区发展较为成熟的VPP试点为澳大利亚的VPP示范工程,主要资源为用户侧储能。

不同国家、不同地区的VPP试点项目各具特色,是针对不同地区资源禀赋与电网实际需求所开展的有益探索。其中,欧美地区VPP试点在商业模

式、市场生态链和DER智能管控平台建设方面,具有突出优势,对中国VPP的发展具有广泛而深远的借鉴意义。相较之下,中国VPP试点大多直接参与电网调度运行,通过运营管控平台实时控制DER响应电网调度指令,虽然响应速率快、调控效果好,但仍然面临商业模式相对单一、市场参与率低、用户主动响应意愿不高等主要问题,其运营关键技术如状态感知与灵活聚合、信息预测与容量估计、市场交易与优化决策、补偿结算与效益评估等方面,尚存技术瓶颈。然而,在良好的需求侧柔性资源基础、国家政策的大力支持、国外成熟的试点建设经验以及技术研究水平提升等多方有利条件的共同催化下,未来中国VPP在商业模式和技术应用层面将得到更进一步的发展。

中国在电力系统供需平衡形式日益严峻的背景下也广泛开展了VPP的试点应用,如江苏、冀北、上海、浙江、天津等地。江苏作为典型的受端电网,其VPP试点构建了DER的互动控制架构,在电网突发紧急事故的情况下提供快速可中断的负荷控制服务,保证网内功率平衡与频率稳定。同样作为东部负荷中心的上海,随着产业结构的调整,全市电力负荷峰谷差不断增长。上海大型商业建筑最为密集的黄浦区,其商业楼宇能耗占全区总能耗的65%。结合上述特点,上海开展了商业建筑VPP示范项目,服务于电网削峰填谷;近期,上海同样也在拓展工业以及居民领域的柔性资源。地处中部的冀北则具有更为丰富的“煤改电”资源,设立了张家口作为蓄热式电锅炉专项试点。此外,冀北VPP搭建了“云-管-边-端”技术架构以及VPP与电力市场交易系统的自适应标准化接口,为中国VPP参与市场提供调峰辅助服务奠定了坚实的基础。

2 虚拟电厂商业模式

商业模式的概念是在1957年由美国学者Bellman首次提出。随着时代的进步和科技的发展,商业模式在不同时期被赋予了不同的内涵。2016年,德国学者Wirtz经过调研总结,给出了商业模式的普适定义,即企业各项经营活动的一种聚合表现形式,主要应包括企业运营的价值主张、资源组成、经营模式和成本收益这4个部分^[50]。其中,价值主张是指企业的价值点,需要在满足客户根本诉求的同时创造企业独特的价值,是商业模式的核心。价值主张与企业提供某类业务或者具备某项功能的区别在于,前者是后者的内在价值体现,后者是前者的外在表现形式;资源组成是指企业拥有或代理的有形、无形资产或资源;经营模式是指企业通过提供不同业务,创造营收的方式;成本收益是指企业经营过程中产生的支出与收入。VPP商业模式中各组成部分间的逻辑关系如图3所示。

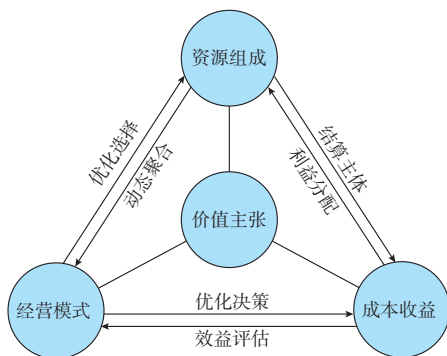


图3 VPP商业模式

Fig. 3 Business model of VPP

VPP的价值主张包含两点:1)为系统运营商提供高效安全、快速爬坡的灵活性;2)为海量、分散、多元、异构的DER创造参与系统调节或市场交易的机会,使其获得一定收益。VPP的价值主张与其资源组成、经营模式和成本收益密切相关,是VPP优化运营的核心。VPP的资源组成是其本身定义的一部分,包括各种类型的DER。不同的DER投资组合方式,经动态聚合后可以形成不同的联盟^[51],决定了VPP的经营模式,是其参与不同类型电力市场交易和为系统运营商提供不同种类服务的基础,同时也是其成本收益的结算主体。VPP的经营模式包括参与不同类型市场交易或者为系统运营商提供各类服务,经营模式不仅决定了VPP的成本收益,同样也会反作用于DER的优化选择,如新增或淘汰DER联盟成员,使联盟成员更好地服务于VPP当前的经营模式^[52]。VPP的成本收益经效益评估后将通过资金链的传导反作用于VPP的经营模式,并影响DER联盟的利益分配。

本章将着重讨论不同DER投资组合下VPP的经营模式以及不同经营模式下VPP的成本收益,并对其进行梳理,结果如图4所示。

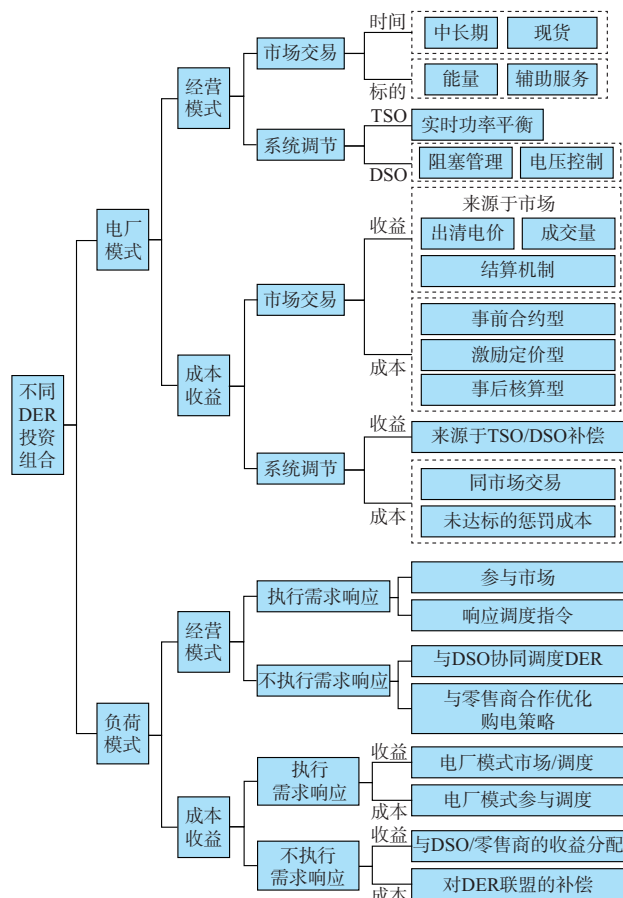


图4 VPP经营模式与成本收益

Fig. 4 Business model and cost benefit of VPP

2.1 经营模式

不同DER投资组合方式在时间的作用下使得VPP对外呈现的整体特性不同,决定了VPP可以通过参与市场交易或者系统调节,提供不同的业务以创造营收。换言之,这也意味着VPP具有不同的经营模式。若DER联盟中,分布式电源和可控负荷占比较高,VPP内部电源出力大于其负荷需求,VPP整体将对外呈现“电厂”特性,具有传统电厂的功能,是系统电力电量的供应商。从市场交易角度,VPP可以参与不同时间尺度,如中长期或现货下的能量或者辅助服务市场交易^[53-54]。VPP通过获取DER联盟的成本特性,向市场上报竞标价格与出力范围,参与市场集中竞价,一旦中标,市场管理者将按照出清电价对VPP成交量进行出清;从系统调节角度,VPP也可以充当第三方功率平衡主体,通过响应系统的调度指令,为TSO提供实时功率平衡服务,或为DSO提供阻塞管理或电压控制等服务^[51,55]。若DER联盟中,分布式电源、可控负荷和储能占比低,传统负荷占比相对较高(一般出现在VPP建立初期),VPP内部负荷需求大于其电源出力,VPP整体对外则呈现“负荷”特性。此时,如果VPP执行需求响应,则其可以参与辅助服务市场交易或响应系统调度指令;如果不执行需求响应,则VPP可与DSO合作协同调度DER,减少分布式电源不确定性对配电网的影响^[56],或者与其他零售商协同合作,优化零售商参与中长期或现货能量市场的购电策略,目标是使售电公司购电成本最小^[57]。

2.2 成本收益

不同经营模式下,VPP成本收益的组成和来源

不同。若VPP作为“电厂”,参与能量市场或辅助服务市场交易时,其收益来源于市场。市场管理者按照不同类型市场的出清电价、成交量以及具体结算机制对VPP的投标方案进行结算,VPP获得收益。因VPP内部资源参与了市场的交易过程,并提供了能量或辅助服务资源,VPP需向DER联盟支付补偿金,此为VPP在该模式下的成本。补偿的常见形式一般可分为:事前合约型^[58]、激励定价型^[59]和事后核算型^[60]。事前合约型是指VPP与DER联盟就补偿单价和补偿机制在事前进行了合同约定,事后按照合同的约定进行补偿;激励定价型是指VPP事前向DER联盟所有成员广播激励单价,由各联盟成员自主响应,事后按激励单价对用户进行补偿;事后核算型是指VPP参与市场交易后,按照联盟成员响应的贡献度对其进行补偿。当VPP为TSO或DSO提供相关服务时,其收益来源于TSO或DSO对VPP给予的奖励或补偿^[58],其成本与参与市场交易大致类似,有所不同的是,如果VPP提供的响应信号未能很好满足TSO或DSO的调度指令,其还将面临一部分惩罚成本。若VPP作为“负荷”且执行需求响应时,其收益来源与作为“电厂”参与辅助服务市场或响应系统调度指令时相同,其成本与作为“电厂”参与响应系统调度指令时相同;不执行需求响应时,VPP收益来源于与DSO或零售商的合作,收益多少取决于两者之间的收益分配机制,其成本为对DER联盟的经济补偿。

3 支撑VPP商业模式优化运营的关键技术

VPP在各种商业模式下的优化运营需要一系列关键技术的支撑才可以实现,具体如表2所示。

表2 VPP运营关键技术分析
Table 2 Analysis on key technologies of VPP operation

关键技术	主要技术	具体方法	重点难点
状态感知与灵活聚合	异构资源精准建模、电力客户画像技术、资源动态优化聚合	多目标与多尺度主动优化聚合、资源聚合体等值建模、单一负荷精细化建模、自监督学习、半监督学习	优质需求响应用户辨识、异构资源分类建模、多目标与多尺度灵活聚合
信息预测与容量估计	电价预测、负荷/电量预测、分布式光伏预测、响应容量估计	小样本学习、影响因素分析、人工智能算法、图神经网络、长短期记忆神经网络、时间序列法、卷积神经网络	电价影响因素分析、中长期电量预测、分布式光伏出力预测、响应容量估计
市场交易与优化决策	优化投标策略、优化定价策略、资源优化调度	随机优化、模糊优化、鲁棒优化、博弈论、在线学习、自适应免疫遗传算法、自趋优在线负荷跟踪控制	多重不确定因素影响的优化报价策略制定、报价定价耦合影响下的策略制定
补偿结算与效益评估	基线负荷估计、收益分配策略、响应效益评估	同步模式匹配、对照组法、平均法、回归法、Shapley值、主从博弈、信用等级、系统动力学、灰色综合评价	多场景下集群用户基线负荷估计、收益分配机制、多维分层分级综合评估方法

VPP的关键技术主要包含:1)状态感知与灵活聚合;2)信息预测与容量估计;3)市场交易与优化

决策;4)补偿结算与效益评估。状态感知与灵活聚合技术是实现分散式小容量资源汇聚形成大规模

VPP的前提。市场电价的波动、负荷与电量的未来变化对VPP市场交易有直接的重要影响,VPP可调节容量随时间变化的准确估计是其优化投标的重要依据,因此,信息预测与容量估计技术就成为VPP进行市场交易的必备基础。不同场景和市场条件下的交易策略与优化决策决定了VPP的运营效益和承担风险。对分布式灵活资源的经济补偿是VPP市场化运营下承担的主要成本,而效益评估则是其聚合方式和经营策略改进的科学指导。4项关键技术之间环环相扣,共同支撑VPP各种商业模式下的优化运营:技术1)为技术2)提供资源特性分析结果,作为技术2)预测和估计模型的输入信息;技术2)为技术3)提供基础信息预测结果,作为技术3)制定市场优化决策模型的输入信息;技术3)为技术4)提供优化交易运营结果,作为技术4)补偿结算和效益评估的计算依据;技术4)为技术1)提供历史技术经济性能分析结果,作为技术1)资源灵活聚合与精准画像的重要参考。

3.1 状态感知与灵活聚合

状态感知与灵活聚合包括异构资源精准建模以及资源灵活优化聚合两部分,是辅助VPP洞察和了解DER运行特性的基础性工作,助力VPP实现需求侧资源的精确感知、充分利用及价值挖掘。

3.1.1 电力客户画像技术

电力客户画像技术是根据用户社会属性、生活习惯和用能行为等信息抽象出的一个标签化过程。标签化是高度精炼的特征标识,是把数据形象化的一种方法,是电力客户画像技术的基础。典型的电力客户标签主要包括电力用户的年龄、消费能力、家庭人口、用能态度和负荷电量信息等,反映了一个电力客户的基本属性以及行为倾向^[61]。通过对客户标签信息的数据化处理,如在时域或频域上对用户的负荷电量数据进行特征提取和选择,进一步建立多元特征-标签分类识别模型,从而实现特征到标签的映射,形成整体的电力客户画像。电力客户画像技术能够助力VPP的个性化、精准化服务。对于VPP而言,可以利用客户画像技术精准定位具有高参与意愿、高需求响应潜力的优质用户,同时也可依据画像结果制定个性化的需求响应合约,提高终端需求响应用户的参与积极性。目前,主流的客户画像方法通过机器学习的方式实现,根据所需有标签样本数的不同,可以分为有监督学习(所有样本均为有标签)以及半监督学习(部分样本有标签)方法。由于用户标签数据本质上需要通过调查问卷或者实地调研的方式进行获取,这需要耗费大量的人力、物力,因此,相较而言,半监督学习方法能凭借其所需

有标签样本数少的优势,在未来得到更为广泛的应用。然而,有标签样本数量减少,意味着模型输入的有效信息减少,半监督学习要想达到与有监督学习方法相同的画像精度,还需要深入挖掘用户数据中蕴含的潜在价值和规律,并提取更加多元的数据特征来进一步提升画像精度^[62]。未来,自监督学习等新型机器学习算法将在客户画像的效率、准确率以及实用性提升等方面助力VPP筛选优质的需求响应用户。

3.1.2 异构资源精准建模

异构资源精准建模面向的对象是VPP中具有柔性调节能力的广义负荷资源,包括可削减和可转移负荷、电动汽车、分布式储能等。传统负荷的描述方法一般可分为物理建模以及数据建模两大类。前者从资源本身运行特性出发进行描述,如温控负荷热力学模型的构建^[63];后者则通常针对某一类型的资源,通过其历史数据集运行状态,利用相较而言更为简化的模型描述其泛在特性^[64]。

然而,由于资源种类多样、运行参数各异,广义负荷资源呈现类别异构特性。同时,同一类型负荷(如温控负荷)中同样存在物理属性各异的负荷(如空调与热水器),呈现参数异构特性^[65]。故而,一方面需面向单一资源,考虑其基本物理属性、用户主观意愿、舒适度需求等多方因素,研究异构资源精细化建模方法;另一方面需面向资源集群,分析其泛化特征与抽象等效性,研究资源聚合体的等值建模方法,从而为VPP代理海量DER参与电网调控运行提供精细化的建模技术支撑。

3.1.3 资源动态优化聚合

资源动态优化聚合是在异构资源特性建模的基础上,依据不同目标(如不同的电网调控需求、不同市场参与需求),匹配并汇聚一定量具有时域互补性、功能互补性的多元DER形成可调度资源池的过程,是一个多目标、多尺度灵活优化聚合问题,可以理解为一灵活性资源的优化配置问题^[66],也有文献从合作博弈角度出发,将其称之为多代理系统的联盟结构生成问题^[51]。

不同DER的特性不同,可分为以下3类:一是定量补偿型资源,基于激励信号进行主动调节。此类资源在个体层面参与响应,根据收益参考或合约内容进行自主响应,受各类主客观因素影响,响应不确定度大,且所需提前通知的时长最长,单位响应容量所需补偿最低;二是权益让渡型资源,由VPP与DER协定后,获得资源群的控制权限,从而通过信息物理融合系统直接执行优化控制操作,在可调节资源集群的层面参与响应,这一响应方式不确定度

较小、时效性高,同时控制成本也相应更高;三是分布式储能,可依据VPP所制定的充放电计划进行实时充放电调整,基本无不确定性、时效性高,其成本相较最高。

为实现多目标、多尺度灵活的优化聚合,VPP需综合考虑各类可调节资源的调节能力、可调节时段、调节不确定性以及调控成本等进行优化决策,达到决策经济性与鲁棒性之间的纳什均衡。优化聚合的方法主要为主动优化方法,相关研究主要针对不同应用场景(包括削峰填谷、调频、调压等)对聚合参数在时间、速度、容量等方面的不同要求,构建计及多应用场景、多区域空间联动和多时间尺度的需求侧资源动态聚合模型。如文献[67-69]分别面向调频需求、新能源消纳需求以及配电网调压需求,构建了需求侧资源的优化聚合策略。

3.2 信息预测与容量估计

信息预测与容量估计技术包括市场电价预测、分布式光伏预测、响应容量估计三部分内容。无论是在VPP参与市场交易或是直接依据调度指令进行出力调节的过程中,均需要VPP掌握其自身资源特性以及市场特性,服务于后续市场侧交易策略以及内部优化调控策略的制定。

3.2.1 市场电价预测

市场电价的准确预测是VPP在市场交易过程中进行精准投标报价、实现利润最大化的基础与前提,作为电力系统的经典课题已得到了广泛的研究。依据预测的时间尺度不同,可分为中长期预测、短期(日前电价)预测和超短期(实时电价)预测;依据预测内容的不同,可分为确定性预测与概率性预测,前者预测结果为确定的电价数值,后者则同时给出电价的取值及其概率分布情况。由于电价受多种耦合因素的影响,具有明显的时变特性和不确定性,相较于确定性预测,概率预测能够为VPP提供更多参考信息,降低决策风险。如文献[70]基于免疫遗传机制以及贝叶斯概率法则构建了市场出清电价的概率预测方法,可得到未来负荷准确的波动范围。依据预测方法的不同,主要可分为时间序列法以及机器学习模型两大类。前者包括自回归滑动平均模型^[71]和差分自回归滑动平均模型^[72]等。机器学习模型包括随机森林^[73]、极限学习机^[74]、卷积神经网络^[75]、贝叶斯深度学习^[76]等。近年来,出力具有随机波动性的新能源在系统中的渗透率不断提升,对供需平衡以及电力市场的电价走势变化带来了较大的冲击。在新型电力系统建设背景下全面分析电价变化影响因素并进行准确预测同样将是VPP进行市场交易的重要工作。

3.2.2 负荷与电量预测

电力市场的有序放开为售电侧引入了竞争机制^[77],在此背景下,VPP作为电力市场新型主体参与市场竞争成为趋势。根据交易时间尺度的不同,VPP可参与中长期市场与现货市场进行交易,在此过程中,需要准确的中长期、短期、实时电力电量预测作为其参与市场交易的重要支撑。此外,上述3个时间尺度的预测结果对于VPP调度运行、日前开机计划制定与日内实时调度均具有重要的指导意义^[78]。中长期电力电量预测一般采用传统的统计学方法,但由于中长期尺度数据包含信息少、传统方法数据挖掘能力有限等问题,难以满足VPP对预测精度的需求。因此,一些研究者针对如何利用多时间尺度信息提升中长期预测精度进行探究,如文献[79]提出了一种基于高分辨率数据的月度用电量预测方法,文献[80]利用年、月、日3种时间分辨率数据,有效提升了负荷预测精度。短期、实时时间尺度下的高分辨率数据基本能为预测模型提供充足的训练样本,以长短期记忆神经网络^[81]、图神经网络^[82]为代表的深度学习算法凭借其强大的数据挖掘能力,在短期、实时电力电量预测方面得到了广泛应用。从空间角度来看,电力电量预测可分为用户集群级预测、城市电网级预测和地区电网级预测。由于VPP辖域内的DER用户所处地理位置分散,用户数量和容量规模远远小于城市级与地区电网级,因此,VPP的负荷与电量预测属于用户集群级预测。与城市电网级和地区电网级的电力电量预测考虑的因素、采用的方法和技术路线不同,VPP的负荷与电量预测建模更加精细化,通常需要考虑不同种类资源用户的负荷模式差异性,使用聚类算法和面向不同类用户群的预测模型得到全局预测结果。随着电动汽车、分布式光伏等分布式能源的大规模接入,电力电量预测的复杂性明显增加^[83],深入探究新型电力系统建设对配电网带来的影响以进一步提升电力电量预测精度,对VPP发展而言同样起到重要的推动作用。

3.2.3 分布式光伏预测

在中国分布式光伏整县开发政策的推动下^[84],配电网中分布式光伏呈现爆发性增长态势,其出力的随机波动特性对VPP的优化运营提出了较大挑战,需要事先对其进行精准预测。传统集中式光伏预测以历史出力数据、数值天气预报和实测气象数据为基础,通过人工智能算法进行预测^[85-86]。然而,集中式光伏出力预测方法无法直接应用于分布式光伏出力预测。一方面,分布式光伏由于自身单个容量小、安装分散、投资小等原因不会专门配备相关气

象或云图观测设施,导致缺乏相关实测或预测数据。这种数据缺失问题导致分布式光伏功率预测一般只能依靠自身的功率数据,无法套用集中式光伏功率预测方法;另一方面,即便在具备了良好的数据条件后,分布式光伏与集中式光伏在出力特性、气象功率耦合特性等方面存在显著差异,集中式光伏功率预测方法与技术路线并不适用于分布式光伏。此外,现实情况中配电台区还存在一部分没有安装单独表计的表后分布式光伏^[87-89]。具有随机间歇特性的光伏出力和同样具有随机波动特性的用户负荷叠加耦合,使两者精准估计难度剧增。故而,需要首先探究用户负荷与表后光伏的解耦方法,将电网中这一部分“不可见”的分布式光伏分量辨识出来,与实际用电负荷解耦,而后分别进行预测。由于气象条件变化导致配电网各台区间分布式光伏存在强时空相关性,需要考虑各台区间分布式光伏集群在时间和空间维度存在的关联性,并对其进行量化表征,进而实现分布式光伏的出力预测。

3.2.4 响应容量估计

需求侧资源响应容量的预测回答了VPP中需求侧柔性资源可以在什么时段提供多少灵活性的问题,直接关系到其投标策略的制定^[90]。相较于前两类信息的预测,目前需求侧资源响应容量估计尚属于新兴领域,相关研究较少。现有针对响应容量估计的研究多从负荷的物理特性出发^[91-95],其理论依据在于各类资源的需求响应容量很大程度上取决于其用电特性。实际上,资源的需求响应容量通常分为理论响应容量、技术响应容量、经济响应容量和可用响应容量4类,容量大小依次递减。从物理特性入手计算所得结果属于理论响应容量,其大于资源的实际可用响应容量。因此,在考虑资源物理特性的基础上,仍需要在数学模型与数据驱动算法等方面着手对响应容量估计做进一步的探索。然而,数据驱动的分析方法仍存在三方面难点:1)柔性资源需求响应特性(包括响应量、响应时长、响应速率等)受多元复杂因素影响,如气象因素(气温、湿度)、节假日因素、激励价格、响应前负荷工作状态、历史响应情况因素等,需要利用电气工程、行为经济学、社会学、心理学等多学科领域知识共同挖掘具有强相关性的影响因子;2)目前需求响应项目实施的时间较短,尚未积累足够的实际响应数据支撑预测模型的外推与训练,需要研究小样本学习技术等适用于历史数据不足情况下的预测方法;3)由于VPP聚合的DER中含有一部分储能资源,其响应容量存在序贯约束,即相邻时刻的响应容量存在约束关系,需要在聚合模型中考虑其时序耦合特性。

3.3 市场交易与优化决策

市场交易与优化决策包括市场侧的优化投标策略、用户侧的优化定价策略以及资源优化调度策略三部分。从数学层面而言,上述3个方面均是优化问题;而在物理层面上则是VPP运营过程中与不同主体之间进行利益博弈以达到均衡优化的过程。

3.3.1 优化投标策略

在市场侧进行交易的过程中,VPP基于资源状态感知与信息预测的结果,考虑市场价格、用户响应行为等在内的多重不确定性因素影响,进行市场侧投标方案的优化决策。不确定性问题影响下的VPP市场化投标策略主要可分为三大类:第1类是随机优化方法^[96],基于不确定变量的概率分布函数,模拟大量的样本来表示由不确定参数引起的各种可能的场景,如文献[97]中提出了两阶段随机优化模型用于处理电力需求以及用户行为的不确定性;第2类是模糊优化方法^[98],这一方法基于模糊逻辑,可以模拟人脑处理自然界中的不确定性,能够根据不准确的非数值信息做出模糊判断,主要通过隶属度函数和模糊集实现规则推理,如文献[99]使用模糊理论对影响市场出清价格的供暖负荷进行建模;第3类是鲁棒优化方法^[100],与随机及模糊优化方法不同,鲁棒优化通过不确定集的方式描述变量,并且在求解过程中考虑在最坏的情况下满足整体的优化需求,故而其结果一般非常保守。这一稳健的优化方法在电力市场投标报价、发电厂发电计划优化等场景中得到了广泛的应用,如文献[101]构建了两阶段分布鲁棒优化模型以处理VPP中风光资源出力的不确定性。上述方法的综合应用往往能起到优势互补的效果,如文献[102]在日前模型中通过两阶段随机优化方法处理需求侧柔性资源灵活性以及调节信号的不确定性;在日内模型中,则是构建了数据驱动的分布式鲁棒机会约束模型进行求解,两种方法的搭配满足了时效性、鲁棒性以及精确性等多方面的要求。

3.3.2 优化定价策略

VPP基于系统运营商所设定的需求响应补偿价格进行用户侧激励价格的制定,即最优定价问题,其实现的效果是通过价格信号激励用户参与响应。用户接受VPP给予的奖励价格后,结合自身用电舒适度、工作效率和响应收益等各方面因素做出决策,自愿参与响应。对于VPP而言,如何定价是其盈利的关键问题。一方面,如果制定的补偿价格过低,用户参与响应的积极性不高,若提供的需求响应量无法满足要求将面临惩罚;另一方面,若制定的补偿价格过高,则用于激励用户的成本过高,VPP的利润

也会有所损失。故而,如何确定最优的定价对于VPP而言至关重要。现有研究通过博弈论^[103-105]、在线学习^[106-107]等方式刻画定价过程中VPP与用户之间的利润博弈问题。实际上,VPP在市场侧的最优投标策略与在用户侧的最优定价策略是内在耦合、相互影响的。目前,相关研究大多将这两者分开单独考虑,无法计及两个过程之间的联动,这使得VPP的决策有失全局性,同样会带来利润损失风险。因此,VPP市场投标和激励定价的联合优化是需要进一步探究的重要问题。

3.3.3 资源优化调度

市场出清完成后,VPP依据中标结果,优化决策各类DER的序贯优化调控策略,保证实际执行效果。从不同的角度可对现有优化调度方法进行划分:1)从调度过程中的不确定性问题处理方面,可将调度方法分为随机^[108]、鲁棒^[109]等类型,具体方法可参见3.3.1节。2)从优化问题的求解方法层面,通常可分为数学算法以及智能算法两类。前者包括混合整数线性规划、非线性规划等模型^[110]和在线分布式优化算法^[111];后者则包括改进的遗传算法^[112]、自适应免疫遗传算法^[113]、量子遗传算法^[114]、粒子群算法^[115]等。3)从调控模式层面可分为集中式、分布式以及混合式控制模式,如文献[21]中针对集中-分布式VPP组织结构,研究其调峰、调频等性能指标的刻画与联合市场投标策略。4)从优化目标层面,可分为经济性目标、技术性以及综合型目标三大类。经济性目标为最大化VPP收益^[116];可靠性目标为最优跟踪目标功率曲线,如文献[117]提出“刺激-反馈”控制机制,实现VPP的自趋优在线负荷跟踪控制,文献[118]则针对电动汽车提出了日前电力调度和实时功率跟踪的体系架构;综合型目标一般为包括经济性、可靠性等在内的多重目标的综合,如文献[119]将经济效益、碳排放量、等效负荷方差等目标纳入了VPP的优化调度模型。

3.4 补偿结算与效益评估

补偿结算与效益评估面向市场交易过程结束后的结算与评价过程,包括基线负荷估计、收益分配策略以及综合效益评估三部分内容。

3.4.1 基线负荷估计

用户基线负荷(CBL)估计主要面向VPP中的柔性负荷,其定义为假设用户未参与需求响应时本应消耗的用电负荷,是需求响应实施效果认定、补偿结算的依据,同时也是计算用户响应能力的基础^[120]。然而,用户参与需求响应后,其CBL在现实中就不复存在,无法通过测量得到(如图5所示),故需进行估计。需要说明的是,CBL估计与负荷预测

有相似之处也有明显区别。相似之处在于两者都是对未知负荷进行估计/预测,不同之处在于CBL估计可以事前也可以事后,而负荷预测是对未来进行预测,只能是事前进行。此外,CBL真实值无法通过表计测量,只能通过虚拟需求响应事件验证CBL估计精度;负荷预测真实值可以通过表计测量得到,经误差计算后可得到预测精度。CBL估计的对象包括个体与集群用户,个体CBL估计主要面向单一用户,估计结果主要服务于每一需求响应参与者与VPP之间补偿金的事后结算;集群CBL指的是VPP所聚合用户的CBL之和,其估计结果主要服务于VPP和上层系统运营商之间的补偿结算。CBL估计的准确性直接影响着需求响应量的计算、用户需求响应贡献度的精准衡量,以及用户、VPP、系统运营商三者的利益分配。常用的个体CBL估计方法包括平均法^[121]、回归法^[122]、对照组法^[123]、同步模式匹配法等^[124];集群CBL方面尚无针对性研究,目前主要通过个体用户基线估计值直接累加的方式得到。后续可结合用户时间以及空间层面的分布特点与关联性,利用图神经网络技术开展相关研究,提升集群CBL估计精度^[125]。此外,随着分布式光伏在配电台区内的渗透率提升,含分布式光伏用户的集群CBL估计也是值得研究的方向之一。

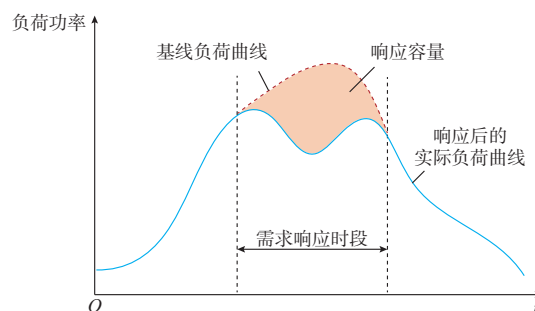


图5 CBL估计示意图
Fig.5 Schematic diagram of CBL estimation

3.4.2 收益分配策略

用户参与需求响应的积极性需要通过其响应收益来保证,而这除了基线估计的准确性之外,还与VPP与用户之间的收益分配策略直接相关。VPP与用户之间通过信息共享,以整体思维整合内外部资源,组成虚拟联盟参与市场交易,过程中两者“风险共担、效益共享”,最终实现双赢的目的。但实际上各主体彼此独立,VPP与用户之间同样存在利润的纷争,两者均希望自身的利润最大化,故而适合采用博弈论进行研究^[126]。VPP需要权衡自身利益以及用户的经济补偿制定合理的分配机制,保证用户参与需求响应项目的积极性以及“虚拟联盟”的稳定

性,达到整体响应效益最优。现有的响应利润分配机制包括 Shapley 值法、均分法等,如文献[127]提出了综合考虑贡献度、风险水平以及利润增长率的改进 Shapley 值法以解决 VPP 中多主体之间的利润公平分配问题。

3.4.3 综合效益评估

在 VPP 单次市场交易过程结束后,需要对此次事件整体的综合效益进行定量刻画,包括技术层面的指标完成度以及经济层面的效益分析,通过复盘总结不断提升响应执行度,优化外特性指标,为下一次竞价出清奠定基础。同时,效益评估还需细化至 VPP 中的各参与主体,使其明确自身的损益以便后续项目实施过程的优化。通过构建量化评价指标体系,实现整体-个体效益的分级综合评估,这一过程也有利于政府机构对相关政策的修订与改进。现有整体综合效益评价方法包括系统动力学^[128]、信用等级^[129]、灰色综合评价^[130]等,如文献[128]融合了经济学原理,利用系统动力学理论对考虑外部效益影响情况下需求响应项目实施的综合效益进行了评估;文献[129]提出了认缴性能、调度时间可靠性、调度容量可靠性、负荷反弹量 4 个指标,并构建了基于信用等级的 VPP 综合效益评估方法,为响应效果评估及筛选历史响应性能更佳的用户提供指导。

4 未来新型电力系统下 VPP 技术展望

未来新型电力系统具备如下 4 个特征:1)广泛互联,即电网互联互通,可以实现各类发电资源充分共享和互为备用;2)智能互动,即 DER 由传统的部分感知、单向控制转变为了高度感知、双向互动,实现了电力资源的智能高效配置;3)灵活柔性,即电网要充分具备调峰调频能力,增强抗扰动能力,适应新能源发展需要;4)低碳经济,即促进绿色电力的消费,实现电力资源的优化配置。VPP 与未来新型电力系统的特征高度契合,其基于先进的量测、通信和控制技术,具备对 DER 的可观、可测、可控能力,实现新型电力系统的广泛互联、智能互动和灵活柔性。此外,VPP 还可以设置不同的运行模式和优化目标,通过参与多类型市场交易,促进未来新型电力系统低碳经济运行。然而,构建未来新型电力系统的进程中,系统的结构形态正在发生着深刻的变革,对 VPP 的发展提出了新的要求。与此同时,随着其他新兴技术的蓬勃发展,新的要求须与新的技术结合起来,助力 VPP 的发展。本章从未来新型电力系统复杂场景下的基线负荷估计、多元辅助服务品种的提供、中长期容量市场交易、综合需求响应技术、基于区块链技术的分布式交易和电碳联合市场交易

6 个方面对 VPP 的发展进行了展望。

4.1 复杂场景下的基线负荷估计

作为需求响应补偿结算的依据,CBL 估计面临如下技术难点与挑战:一方面,CBL 估计结果验证困难,即用户一旦执行需求响应,其 CBL 真实值就不复存在,CBL 估计结果的准确与否在现实中无法得到验证;另一方面,未来新型电力系统发展过程中,在分布式光伏、新型负荷、多需求响应项目等多元复杂因素的耦合作用下,用户用能场景更为多变,现有估计方法若未做适应性调整,将产生较大误差^[89]。因此,仍需针对“个体-集群”用户 CBL 估计及其验证方法开展进一步研究,以提升估计精度。此外,针对难以准确估计基线导致的 VPP 利用率不高的问题,近年来也有相关研究提出了准线型需求响应机制^[11],未来可进一步探索基于准线的 VPP 商业模式。

4.2 多元辅助服务品种

为了适应未来新型电力系统中高比例新能源、高比例电力电子设备接入的需要,VPP 需要在现有辅助服务如调峰、备用、调频等基础上,新增转动惯量、爬坡、稳定切负荷等新型辅助服务品种^[131],促进新能源消纳,提升系统可靠性和电能质量,更好地保障系统安全运行。辅助服务新品种的增加将改变市场主体的技术准入条件、参与机制、调用机制、考核机制、补偿与分摊机制,需要 VPP 设计新的商业模式,并更加关注能提供惯量支撑、快速响应的 DER,加强此类资源的状态感知与灵活聚合、信息预测与容量估计和补偿结算与效益评估技术,以适应这种变化,发挥 VPP 应有的价值与作用。

4.3 中长期容量市场

容量市场的建立旨在以市场竞争的方式形成容量价格以实现发电容量成本回收,是电力市场的有机组成部分,有助于调节现货市场的建设进程^[132]。《关于深化电力现货市场建设试点工作的意见》和《电力中长期交易基本规则》等市场配套文件中也都明确指出要适时建立容量市场,保证电力系统长期容量的充裕性,为未来新能源发电大规模并网提供灵活容量支持^[133]。VPP 通过参与容量市场交易可以获得在不确定性较高的能量市场和辅助服务市场以外的稳定经济收入,可以帮助其对冲经营风险,丰富经营模式。

4.4 综合需求响应

从响应资源角度来说,综合需求响应(IDR)是需求侧在综合能源网络中对常规需求响应的扩展。相较于常规需求响应,IDR 不仅能实现时间转移和用能削减,还增加了响应维度,促进了多种能源之间

的相互转换^[134]。因此,VPP可以充分利用目前的技术手段和DER,考虑冷-热-电-气的相互转化,执行IDR,有效激发需求侧资源的灵活性。

4.5 基于区块链技术的分布式交易

随着VPP聚合DER单体数目的增多以及参与不同时间、空间尺度的市场交易增多,VPP将面临两方面挑战:1)与其他市场主体间缺乏公平可信、成本低廉的交易平台,难以实现社会福利最大化;2)与DER单体间缺乏公开透明的信息平台,DER单体无法在信息对称的环境下对VPP进行选择,增加了信用成本^[135]。区块链技术作为一种去中心化的分布式记账系统,具有信任成本低、信息不可篡改等特点,可以解决上述问题。此外,区块链技术还能满足交易形式多样、能源选择类型多样的分布式交易需求,有利于提升VPP运营收益,促进分布式光伏消纳^[136]。

4.6 电碳联合市场交易

2017年底,中国完成了国家碳排放权交易体系总体设计,并于2021年7月正式上线排放交易系统(ETS),进行碳交易。截至2021年底,ETS碳排放配额累计成交额达80亿元^[137]。而VPP概念的提出,本身即蕴含了绿色低碳的属性,VPP通过协同控制各类DER,达到减碳的目的。因此,未来可以考虑VPP参与电碳联合市场交易。在电碳联合市场交易的背景下,VPP需要具备考虑碳排放的优化运营技术、分析其碳减排效益与核算其碳资产的能力,以进一步挖掘VPP的绿色低碳价值,丰富VPP的商业模式,提升新能源消纳水平,促进节能减排。

5 结语

作为大规模实施需求响应的第三方主体之一,VPP通过高效聚合、协同调度各类DER,可以有效提升电力系统运行灵活性。本文围绕VPP的优化运营问题,对其商业模式和关键技术进行了综述。主要从价值主张、资源组成、经营模式和成本收益4个方面总结了VPP的商业模式;从状态感知与灵活聚合、信息预测与容量估计、市场交易与优化决策、补偿结算与效益评估4个方面梳理了VPP的关键技术,剖析了现有技术模型方法的重点与难点;从复杂场景下的基线负荷估计、多元辅助服务品种的提供、中长期容量市场交易、综合需求响应技术、基于区块链技术的分布式交易和电碳联合市场交易6个方面对VPP的发展进行了展望。

智能化、数字化和信息化是VPP发展的目标。本文从VPP智能化这一角度出发,针对VPP优化运营问题中的商业模式和关键技术进行了综述。

VPP的智能计量^[18]和信息通信技术^[138]同样是其关键技术的重要组成部分,分别对应VPP的数字化和信息化特征,也是VPP未来需要进一步研究和发展的方向。

参考文献

- [1] 中华人民共和国中央人民政府.习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[EB/OL].[2021-03-15].http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.
The Central People's Government of the People's Republic of China. Xi Jinping presided over the Ninth Meeting of the Central Financial and Economic Commission [EB/OL]. [2021-03-15]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/15/content_5593154.htm.
- [2] 国家发展改革委,国家能源局.“十四五”现代能源体系规划[EB/OL].[2022-01-29].http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration. The 14th Five-Year Plan for modern energy system planning[EB/OL]. [2022-01-29]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2022-01/29/c_1310524241.htm.
- [3] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.
SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [4] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [5] 中国工程院.我国碳达峰碳中和战略及路径[EB/OL].[2022-04-02]. https://www.cae.cn/cae/html/main/col1/2022-04/02/20220402174046345475198_1.html.
Chinese Academy of Engineering. The strategy and path of “carbon emission peak and carbon neutrality” of China[EB/OL]. [2022-04-02]. https://www.cae.cn/cae/html/main/col1/2022-04/02/2022040217404634_5475198_1.html.
- [6] 舒印彪,张丽英,张运洲,等.我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J].中国工程科学,2021,23(6):1-14.
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1-14.
- [7] 辛保安.加快建设新型电力系统助力实现“双碳”目标[J].电力设备管理,2021(11):23-24.
XIN Baoan. Accelerate the construction of a new power system to help achieve the “double carbon” target [J]. Electric Power Equipment Management, 2021(11): 23-24.
- [8] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [9] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决

- 措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [10] IEA. Demand response [EB/OL]. [2021-11-01]. <https://www.iea.org/reports/demand-response>.
- [11] 范帅,危怡涵,何光宇,等.面向新型电力系统的需求响应机制探讨[J].电力系统自动化,2022,46(7):1-12.
FAN Shuai, WEI Yihan, HE Guangyu, et al. Discussion on demand response mechanism for new power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 1-12.
- [12] 曾博,杨雅琦,段金辉,等.新能源电力系统中需求侧响应关键问题及未来研究展望[J].电力系统自动化,2015,39(17):10-18.
ZENG Bo, YANG Yongqi, DUAN Jinhui, et al. Key issues and research prospects for demand-side response in alternate electrical power systems with renewable energy sources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 10-18.
- [13] 丁一,惠红勋,林振智,等.面向电力需求侧主动响应的商业模式及市场框架设计[J].电力系统自动化,2017,41(14):2-9.
DING Yi, HUI Hongxun, LIN Zhenzhi, et al. Design of business model and market framework oriented to active demand response of power demand side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 2-9.
- [14] 田世明,王蓓蓓,张晶.智能电网条件下的需求响应关键技术[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3576-3589.
TIAN Shiming, WANG Beibei, ZHANG Jing. Key technologies for demand response in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3576-3589.
- [15] 卫志农,余爽,孙国强,等.虚拟电厂的概念与发展[J].电力系统自动化,2013,37(13):1-9.
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [16] 新华社.中共中央国务院关于加快建设全国统一大市场的意见[EB/OL].[2022-03-25].http://www.gov.cn/zhengce/2022-04/10/content_5684385.htm.
Xinhua News Agency. Opinions of the CPC Central Committee and the State Council on building a unified national market at a faster pace [EB/OL]. [2022-03-25]. http://www.gov.cn/zhengce/2022-04/10/content_5684385.htm.
- [17] 卫璇,潘昭光,王彬,等.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[J].全球能源互联网,2020,3(6):539-551.
WEI Xuan, PAN Zhaoguang, WANG Bin, et al. Review on virtual power plant resource aggregation and collaborative regulation using cloud-tube-edge-end architecture [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 539-551.
- [18] 周亦洲,孙国强,黄文进,等.多区域虚拟电厂综合能源协调调度优化模型[J].中国电机工程学报,2017,37(23):6780-6790.
ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Optimized multi-regional integrated energy coordinated scheduling of a virtual power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6780-6790.
- [19] 王宣元,刘敦楠,刘葵,等.泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J].电网技术,2019,43(9):3175-3183.
WANG Xuanyuan, LIU Dunnan, LIU Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous Internet of Things [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3175-3183.
- [20] 李嘉媚,艾芊,殷爽睿.虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J].中国电机工程学报,2022,42(1):37-56.
LI Jiamei, AI Qian, YIN Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37-56.
- [21] 关舒丰,王旭,蒋传文,等.基于可控负荷响应性能差异的虚拟电厂分类聚合方法及辅助服务市场投标策略研究[J].电网技术,2022,46(3):933-944.
GUAN Shufeng, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Classification and aggregation of controllable loads based on different responses and optimal bidding strategy of VPP in ancillary market [J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 933-944.
- [22] 王佳颖,史俊伟,文福拴,等.计及需求响应的光热电站热电联供型微网的优化运行[J].电力系统自动化,2019,43(1):176-185.
WANG Jiaying, SHI Junyi, WEN Fushuan, et al. Optimal operation of CHP microgrid with concentrating solar power plants considering demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(1): 176-185.
- [23] 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.
- [24] 牛文娟,李扬,王蓓蓓.考虑不确定性的需求响应虚拟电厂建模[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3630-3637.
NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3630-3637.
- [25] 陈敏,高赐威,郭庆来,等.互联网数据中心负荷时空可转移特性建模与协同优化:驱动力与研究架构[J/OL].中国电机工程学报:1-14 [2022-04-29]. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.212442.
CHEN Min, GAO Ciwei, GUO Qinglai, et al. Load modeling and coordinated optimization of spatiotemporally-coupled internet data centers: motivation and architecture [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-14 [2022-04-29]. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.212442.
- [26] WANG Y, AI X, TAN Z F, et al. Interactive dispatch modes and bidding strategy of multiple virtual power plants based on demand response and game theory [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 510-519.
- [27] 袁桂丽,王琳博,王宝源.基于虚拟电厂“热电解耦”的负荷优化调度及经济效益分析[J].中国电机工程学报,2017,37(17):4974-4985.
YUAN Guili, WANG Linbo, WANG Baoyuan. Optimal dispatch of heat-power load and economy benefit analysis based on decoupling of heat and power of virtual power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4974-4985.
- [28] DALL'ANESE E, GUGGILAM S S, SIMONETTO A, et al. Optimal regulation of virtual power plants [J]. IEEE

- Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1868-1881.
- [29] SOWA T, VASCONCELOS M, SCHNETTLER A, et al. Method for the operation planning of virtual power plants considering forecasting errors of distributed energy resources [J]. Electrical Engineering, 2016, 98(4): 347-354.
- [30] WANG H, RIAZ S, MANCARELLA P. Integrated techno-economic modeling, flexibility analysis, and business case assessment of an urban virtual power plant with multi-market co-optimization[J]. Applied Energy, 2020, 259: 114142.
- [31] THAVLOV A, BINDNER H W. Utilization of flexible demand in a virtual power plant set-up[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 640-647.
- [32] SHAFIEKHANI M, BADRI A, SHAFIE-KHAH M, et al. Strategic bidding of virtual power plant in energy markets: a bi-level multi-objective approach [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 113: 208-219.
- [33] BARINGO A, BARINGO L, ARROYO J M. Day-ahead self-scheduling of a virtual power plant in energy and reserve electricity markets under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 1881-1894.
- [34] QIU J, MENG K, ZHENG Y, et al. Optimal scheduling of distributed energy resources as a virtual power plant in a transactive energy framework [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(13): 3417-3427.
- [35] 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.
- [36] 云秋晨,田立亭,齐宁,等.基于投资组合理论的虚拟电厂资源优化组合方法[J].电力系统自动化,2022,46(1):146-154.
- YUN Qiuchen, TIAN Liting, QI Ning, et al. Optimization method of resource combination for virtual power plant based on modern portfolio theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 146-154.
- [37] 陈厚合,王子璇,张儒峰,等.含虚拟电厂的风电并网系统分布式优化调度建模[J].中国电机工程学报,2019,39(9):2615-2625.
- CHEN Houhe, WANG Zixuan, ZHANG Rufeng, et al. Decentralized optimal dispatching modeling for wind power integrated power system with virtual power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2615-2625.
- [38] 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.
- [39] 谈金晶,李扬.多能源协同的交易模式研究综述[J].中国电机工程学报,2019,39(22):6483-6497.
- TAN Jinjing, LI Yang. Review on transaction mode in multi-energy collaborative market [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6483-6497.
- [40] 李彬,郝一浩,祁兵,等.支撑虚拟电厂互动的信息通信关键技术展望[J].电网技术,2022,46(5):1761-1770.
- LI Bin, HAO Yihao, QI Bing, et al. Key information communication technologies supporting virtual power plant interaction[J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1761-1770.
- [41] 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].电力系统自动化,2020,44(22):143-151.
- YI Zhongkai, XU Yinliang, WU Wenchuan. Market clearing strategy for distribution system considering multiple power commodities offered by virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 143-151.
- [42] JANSEN J. Flexible electricity networks to integrate the expected energy evolution [EB/OL]. [2009-09-01]. http://fenix.ice.fraunhofer.de/docs/att2x/2009_Fenix_Book_FINAL_for_selfprinting.pdf.
- [43] Next Kraftwerke. Next Kraftwerke passes 10 000 megawatt milestone of aggregated capacity [EB/OL]. [2022-04-21]. <https://www.next-kraftwerke.com/news/10000-megawatt-of-aggregated-capacity>.
- [44] BERND M. BUCHHOLZ. Smart grids—fundamentals and technologies in electricity networks [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [45] AGL. Spotlight on: virtual power plants[EB/OL]. [2020-09-22]. <https://www.agl.com.au/thehub/articles/2020/09/spotlight-on-virtual-power-plants>.
- [46] Autogrid. AutoGrid announces \$85 million funding round to accelerate energy transition[EB/OL]. [2021-10-15]. <https://blog.auto-grid.com/autogrid-announces-85-million-funding-round-to-accelerate-energy-transition/>.
- [47] 国家能源局.江苏建成世界最大“虚拟电厂”[EB/OL].[2017-05-26]. http://www.nea.gov.cn/2017-05/26/c_136317853.htm.
- National Energy Administration. Jiangsu province of China built the world's largest “virtual power plant” [EB/OL]. [2017-05-26]. http://www.nea.gov.cn/2017-05/26/c_136317853.htm.
- [48] 新华网.上海首次使用虚拟电厂“智慧减碳”[EB/OL].[2021-05-10].https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_12639207.
- Xinhua Net. Shanghai uses virtual power plant for “smart carbon reduction” for the first time [EB/OL]. [2021-05-10]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_12639207.
- [49] 经济参考报.国网冀北虚拟电厂示范工程投运传统电网实现能源互联三级跨越[EB/OL].[2019-12-12]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588139/c13071472/content.html>.
- Economic Information Daily. The demonstration project of virtual power plant in Northern Hebei of State Grid has been put into operation, and the traditional power grid has realized the three-level leap of energy interconnection [EB/OL]. [2019-12-12]. <http://www.sasac.gov.cn/n2588025/n2588139/c13071472/content.html>.
- [50] WIRTZ B W, PISTOIA A, ULLRICH S, et al. Business models: origin, development and future research perspectives [J]. Long Range Planning, 2016, 49(1): 36-54.
- [51] 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):2097-2108.
- 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 System Technology, 2020, 44(6): 2097-2108.
- [52] SHABANZADEH M, SHEIKH-EL-ESLAMI M K, HAGHIFAM M R. A medium-term coalition-forming model of

- heterogeneous DERs for a commercial virtual power plant [J]. *Applied Energy*, 2016, 169: 663-681.
- [53] 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.
- [54] DABBAGH S R, SHEIKH-EL-ESLAMI M K. Risk assessment of virtual power plants offering in energy and reserve markets [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(5): 3572-3582.
- [55] HU J J, MORAIS H, LIND M, et al. Multi-agent based modeling for electric vehicle integration in a distribution network operation [J]. *Electric Power Systems Research*, 2016, 136: 341-351.
- [56] 董文略, 王群, 杨莉. 含风光水的虚拟电厂与配电公司协调调度模型 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 75-81.
DONG Wenlue, WANG Qun, YANG Li. A coordinated dispatching model for a distribution utility and virtual power plants with wind/photovoltaic/hydro generators [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 75-81.
- [57] 窦迅, 王俊, 叶飞, 等. 考虑虚拟电厂组合策略的售电公司优化调度及购电决策 [J]. *电网技术*, 2020, 44(6): 2078-2086.
DOU Xun, WANG Jun, YE Fei, et al. Optimal dispatching and purchase-sale decision making of electricity retailers considering virtual power plant combination strategies [J]. *Power System Technology*, 2020, 44(6): 2078-2086.
- [58] WANG F, GE X X, LI K P, et al. Day-ahead market optimal bidding strategy and quantitative compensation mechanism design for load aggregator engaging demand response [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2019, 55(6): 5564-5573.
- [59] MOHANDS B, EL MOURSI M S, HATZIARGYRIOU N D, et al. Incentive based demand response program for power system flexibility enhancement [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(3): 2212-2223.
- [60] RAHMANI-DABBAGH S, SHEIKH-EL-ESLAMI M K. A profit sharing scheme for distributed energy resources integrated into a virtual power plant [J]. *Applied Energy*, 2016, 184: 313-328.
- [61] YAN S Q, LI K P, WANG F, et al. Time-frequency feature combination based household characteristic identification approach using smart meter data [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(3): 2251-2262.
- [62] WANG F, LU X X, CHANG X Q, et al. Household profile identification for behavioral demand response: a semi-supervised learning approach using smart meter data [J]. *Energy*, 2022, 238: 121728.
- [63] 窦晓波, 孙帅, 陆斌, 等. 基于空调自适应修正模型的户用微电网能量优化 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(15): 42-50.
DOU Xiaobo, SUN Shuai, LU Bin, et al. Energy optimization of household microgrid based on adaptive adjustment model of air conditioning [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(15): 42-50.
- [64] 汤奕, 鲁针针, 伏祥运. 居民主动负荷促进分布式电源消纳的需求响应策略 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(24): 49-55.
TANG Yi, LU Zhenzhen, FU Xiangyun. Demand response strategies for promoting consumption of distributed power generation with residential active loads [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(24): 49-55.
- [65] 孙毅, 李泽坤, 许鹏, 等. 异构柔性负荷建模调控关键技术及发展方向研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(24): 7146-7158.
SUN Yi, LI Zekun, XU Peng, et al. Research on key technologies and development direction of heterogeneous flexible load modeling and regulation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(24): 7146-7158.
- [66] 李明轩, 齐步洋, 贺大玮. 工业园区需求响应资源聚合优化配置方法 [J/OL]. *电网技术*: 1-8 [2022-04-25]. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1666.
LI Mingxuan, QI Buyang, HE Dawei. Optimization method of the aggregation of the demand response resources in an industrial park [J/OL]. *Power System Technology*: 1-8 [2022-04-25]. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.1666.
- [67] 姚焱, 张沛超. 大规模变频空调参与电力系统辅助服务的协调控制方法 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(22): 127-134.
YAO Yao, ZHANG Peichao. Coordinated control method for ancillary services of power system with participation of large-scale inverter air-conditioner [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(22): 127-134.
- [68] 祁兵, 曾璐琨, 叶秋子, 等. 面向新能源消纳的需求侧聚合负荷协同控制 [J]. *电网技术*, 2019, 43(1): 324-331.
QI Bing, ZENG Lukun, YE Qiuzi, et al. Cooperative control of aggregated loads at demand side for accommodating new energy [J]. *Power System Technology*, 2019, 43(1): 324-331.
- [69] 王琦, 方昊宸, 窦晓波, 等. 基于光伏与空调负荷协调优化的有源配电网经济调压策略 [J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(24): 36-43.
WANG Qi, FANG Haochen, DOU Xiaobo, et al. Economic voltage regulation strategy for active distribution network based on coordinated optimization of photovoltaic and air-conditioning load [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(24): 36-43.
- [70] 王高琴, 沈炯, 李益国. 基于聚类和贝叶斯推断的市场出清电价离散概率分布预测 [J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(34): 90-95.
WANG Gaoqin, SHEN Jiong, LI Yiguo. Forecasting of MCP's discrete probability distribution based on clustering and Bayesian method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2007, 27(34): 90-95.
- [71] 曾鸣, 刘玮, 汪晓露. 含置信区间的改进 ARIMA 电价预测 [J]. *电力系统保护与控制*, 2009, 37(18): 25-31.
ZENG Ming, LIU Wei, WANG Xiaolu. An improved ARIMA approach on electricity price forecasting with confidence interval [J]. *Power System Protection and Control*, 2009, 37(18): 25-31.
- [72] CONEJO A J, PLAZAS M A, ESPINOLA R, et al. Day-ahead electricity price forecasting using the wavelet transform and ARIMA models [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(2): 1035-1042.
- [73] 魏勤, 陈仕军, 黄炜斌, 等. 利用随机森林回归的现货市场出清价格预测方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(4): 1360-1367.
WEI Qin, CHEN Shijun, HUANG Weibin, et al. Forecasting method of clearing price in spot market by random forest regression [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(4): 1360-1367.

- [74] 殷豪,曾云,孟安波,等.基于奇异谱分析的短期电价预测[J].电力系统保护与控制,2019,47(1):115-122.
YIN Hao, ZENG Yun, MENG Anbo, et al. Short-term electricity price forecasting based on singular spectrum analysis [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47 (1) : 115-122.
- [75] LAGO J, DE RIDDER F, DE SCHUTTER B. Forecasting spot electricity prices: deep learning approaches and empirical comparison of traditional algorithms [J]. Applied Energy, 2018, 221: 386-405.
- [76] BRUSAFERRI A, MATTEUCCI M, PORTOLANI P, et al. Bayesian deep learning based method for probabilistic forecast of day-ahead electricity prices [J]. Applied Energy, 2019, 250: 1158-1175.
- [77] 王飞,李正辉,李渝,等.基于数据序列分辨率压缩尺度优化的月度电量预测方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(11):62-68.
WANG Fei, LI Zhenghui, LI Yu, et al. Data series resolution compression scale optimization based monthly electricity consumption forecasting [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 62-68.
- [78] 李昭昱,艾芊,张宇帆,等.数据驱动技术在虚拟电厂中的应用综述[J].电网技术,2020,44(7):2411-2419.
LI Zhaoyu, AI Qian, ZHANG Yufan, et al. Application of data-driven technology in virtual power plant[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2411-2419.
- [79] LI Z H, LI K P, WANG F, et al. Monthly electricity consumption forecasting: a step-reduction strategy and autoencoder neural network [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2021, 27(2): 90-102.
- [80] 罗澍忻,麻敏华,蒋林,等.考虑多时间尺度数据的中长期负荷预测方法[J].中国电机工程学报,2020,40(增刊1):11-19.
LUO Shuxin, MA Minhua, JIANG Lin, et al. Medium and long-term load forecasting method considering multi-time scale data[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(Supplement 1): 11-19.
- [81] 孙庆凯,王小君,张义志,等.基于LSTM和多任务学习的综合能源系统多元负荷预测[J].电力系统自动化,2021,45(5):63-70.
SUN Qingkai, WANG Xiaojun, ZHANG Yizhi, et al. Multiple load prediction of integrated energy system based on long short-term memory and multi-task learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 63-70.
- [82] 顾默,赵兵,陈昊.基于时间卷积网络与图注意力网络的分行业日售电量预测方法[J].电网技术,2022,46(4):1287-1297.
GU Mo, ZHAO Bing, CHEN Hao. Daily electricity sales forecasting by industries based on time convolution network and graph attention network[J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1287-1297.
- [83] 孙辉,杨帆,高正男,等.考虑特征重要性值波动的MBILSTM短期负荷预测[J].电力系统自动化,2022,46(8):95-103.
SUN Hui, YANG Fan, GAO Zhengnan, et al. Short-term load forecasting based on mutual information and Bi-directional long short-term memory network considering fluctuation in importance values of features[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 95-103.
- [84] 国家能源局.国家能源局综合司关于公布整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点名单的通知[EB/OL].[2022-04-22].
http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-09/08/c_1310186582.htm.
National Energy Administration. Notice of the Comprehensive Department of the National Energy Administration on publishing the pilot list of roof distributed photovoltaic development in the whole county (city, district) [EB/OL]. [2022-04-22]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-09/08/c_1310186582.htm.
- [85] VAN DER MEER D W, WIDÉN J, MUNKHAMMAR J. Review on probabilistic forecasting of photovoltaic power production and electricity consumption [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 1484-1512.
- [86] WANG F, XUAN Z M, ZHEN Z, et al. A day-ahead PV power forecasting method based on LSTM-RNN model and time correlation modification under partial daily pattern prediction framework[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 212: 112766.
- [87] LI K P, YAN J C, HU L, et al. Two-stage decoupled estimation approach of aggregated baseline load under high penetration of behind-the-meter PV system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4876-4885.
- [88] LIN J, MA J, ZHU J G. A privacy-preserving federated learning method for probabilistic community-level behind-the-meter solar generation disaggregation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 268-279.
- [89] WANG F, GAO X, LI K P, et al. PV-load decoupling based demand response baseline load estimation approach for residential customer with distributed PV system [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(6): 6128-6137.
- [90] WANG F, XIANG B, LI K P, et al. Smart households' aggregated capacity forecasting for load aggregators under incentive-based demand response programs [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(2): 1086-1097.
- [91] 李亚平,姚建国,雍太有,等.居民温控负荷聚合功率及响应潜力评估方法研究[J].中国电机工程学报,2017,37(19):5519-5528.
LI Yaping, YAO Jianguo, YONG Taiyou, et al. Estimation approach to aggregated power and response potential of residential thermostatically controlled loads [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5519-5528.
- [92] CUI W Q, DING Y, HUI H X, et al. Evaluation and sequential dispatch of operating reserve provided by air conditioners considering lead-lag rebound effect [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6935-6950.
- [93] SONG M, SUN W, WANG Y F, et al. Hierarchical scheduling of aggregated TCL flexibility for transactive energy in power systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2452-2463.
- [94] 孙毅,毛烨华,李泽坤,等.面向电力大数据的用户负荷特性和可调节潜力综合聚类方法[J].中国电机工程学报,2021,41(18):6259-6271.
SUN Yi, MAO Yehua, LI Zekun, et al. A comprehensive clustering method of user load characteristics and adjustable potential based on power big data [J]. Proceedings of the

- CSEE, 2021, 41(18): 6259-6271.
- [95] QI N, CHENG L, XU H L, et al. Smart meter data-driven evaluation of operational demand response potential of residential air conditioning loads [J]. Applied Energy, 2020, 279: 115708.
- [96] WANG F, GE X X, YANG P, et al. Day-ahead optimal bidding and scheduling strategies for DER aggregator considering responsive uncertainty under real-time pricing [J]. Energy, 2020, 213: 118765.
- [97] AYÓN X, GRUBER J K, HAYES B P, et al. An optimal day-ahead load scheduling approach based on the flexibility of aggregate demands [J]. Applied Energy, 2017, 198: 1-11.
- [98] WANG H Z, LIU Y Y, ZHOU B, et al. Taxonomy research of artificial intelligence for deterministic solar power forecasting [J]. Energy Conversion and Management, 2020, 214: 112909.
- [99] CHAOUACHI A, KAMEL R M, ANDOULSI R, et al. Multiobjective intelligent energy management for a microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (4): 1688-1699.
- [100] ZHANG C, XU Y, DONG Z Y, et al. Robust coordination of distributed generation and price-based demand response in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9 (5): 4236-4247.
- [101] 孙晶琪, 王愿, 郭晓慧, 等. 考虑环境外部性和风光出力不确定性的虚拟电厂运行优化 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 50-59.
- SUN Jingqi, WANG Yuan, GUO Xiaohui, et al. Optimal operation of virtual power plant considering environmental externality and output uncertainty of wind and photovoltaic power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46 (8): 50-59.
- [102] ZHANG H C, HU Z C, MUNSING E, et al. Data-driven chance-constrained regulation capacity offering for distributed energy resources [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2713-2725.
- [103] 魏犇, 陈玥, 刘锋, 等. 基于主从博弈的智能小区代理商定价策略及电动汽车充电管理 [J]. 电网技术, 2015, 39(4): 939-945.
- WEI Wei, CHEN Yue, LIU Feng, et al. Stackelberg game based retailer pricing scheme and EV charging management in smart residential area [J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 939-945.
- [104] 董雷, 涂淑琴, 李烨, 等. 基于元模型优化算法的主从博弈多虚拟电厂动态定价和能量管理 [J]. 电网技术, 2020, 44(3): 973-983.
- DONG Lei, TU Shuqin, LI Ye, et al. A stackelberg game model for dynamic pricing and energy management of multiple virtual power plants using metamodel-based optimization method [J]. Power System Technology, 2020, 44 (3) : 973-983.
- [105] 张高, 王旭, 蒋传文. 基于主从博弈的含电动汽车虚拟电厂协调调度 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 48-55.
- ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen. Stackelberg game based coordinated dispatch of virtual power plant considering electric vehicle management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(11): 48-55.
- [106] XU H C, ZHANG K Q, ZHANG J B. Optimal joint bidding and pricing of profit-seeking load serving entity [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5427-5436.
- [107] XU H C, SUN H B, NIKOVSKI D, et al. Deep reinforcement learning for joint bidding and pricing of load serving entity [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6366-6375.
- [108] 姜华, 杨知方, 林伟, 等. 计及分布式新能源不确定性的虚拟电厂调度边界概率分布刻画方法 [J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12 [2022-04-23]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211194.
- JIANG Hua, YANG Zhifang, LIN Wei, et al. Probability distribution of dispatch region for a virtual power plant considering distributed renewable uncertainties [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-12 [2022-04-23]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.211194.
- [109] 卢志刚, 王荟敬, 赵号, 等. 含 V2G 的虚拟电厂双层逆鲁棒优化调度策略 [J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1245-1252.
- LU Zhigang, WANG Huijing, ZHAO Hao, et al. Strategy of bilevel inverse robust optimization dispatch of virtual power plant containing V2G [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1245-1252.
- [110] 吴宛璐, 韩帅, 郭小璇, 等. 计及空调负荷等多类型需求侧资源的虚拟电厂优化运行策略 [J]. 电力需求侧管理, 2020, 22 (1): 10-14.
- WU Wanlu, HAN Shuai, GUO Xiaoxuan, et al. Optimized operation strategy of multi-type demand side resources in virtual power plant considering air conditioning load [J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(1): 10-14.
- [111] 范帅, 何光宇, 郑湘明, 等. 基于在线分布式优化的虚拟电厂自趋优运行方法研究 [J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14 [2022-07-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220519.1833.041.html>.
- FAN Shuai, HE Guangyu, ZHENG Xiangming, et al. Research on online distributed optimization-based self-approaching optimization operation method of virtual power plant [J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-14 [2022-07-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220519.1833.041.html>.
- [112] 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 [J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2538-2548.
- [113] 袁桂丽, 刘骅骐, 禹建芳, 等. 含碳捕集热电机组的虚拟电厂热电联合优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4440-4449.
- YUAN Guili, LIU Huaqi, YU Jianfang, et al. Combined heat and power optimal dispatching in virtual power plant with carbon capture cogeneration unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4440-4449.
- [114] 张高, 王旭, 蒋传文, 等. 采用双层优化调度的虚拟电厂经济性分析 [J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2295-2302.
- ZHANG Gao, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Economic analysis of virtual power plants based on Bi-level optimization dispatch [J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2295-2302.

- [115] 袁桂丽,陈少梁,刘颖,等.基于分时电价的虚拟电厂经济性优化调度[J].电网技术,2016,40(3):826-832.
YUAN Guili, CHEN Shaoliang, LIU Ying, et al. Economic optimal dispatch of virtual power plant based on time-of-use power price[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 826-832.
- [116] 刘扬洋,蒋传文,谭胜敏,等.考虑风险调整资本收益率阈值约束的虚拟电厂优化调度策略[J].中国电机工程学报,2016,36(17):4617-4627.
LIU Yangyang, JIANG Chuanwen, TAN Shengmin, et al. Optimal dispatch of virtual power plant considering risk adjusted return on capital constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4617-4627.
- [117] 周欢,王芬,李志勇,等.虚拟电厂自趋优负荷跟踪控制策略[J].中国电机工程学报,2021,41(24):8334-8349.
ZHOU Huan, WANG Fen, LI Zhiyong, et al. Load tracking control strategy for virtual power plant via self-approaching optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8334-8349.
- [118] 张卫国,宋杰,郭明星,等.考虑电动汽车充电需求的虚拟电厂负荷均衡管理策略[J].电力系统自动化,2022,46(9):118-126.
ZHANG Weiguo, SONG Jie, GUO Mingxing, et al. Load balancing management strategy for virtual power plants considering charging demand of electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 118-126.
- [119] 张军六,樊伟,谭忠富,等.计及需求响应的气电互联虚拟电厂多目标调度优化模型[J].电力建设,2020,41(2):1-10.
ZHANG Junliu, FAN Wei, TAN Zhongfu, et al. Multi-objective optimization model of gas-electricity interconnected virtual power plant considering demand response[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(2): 1-10.
- [120] LI K P, WANG F, MI Z Q, et al. Capacity and output power estimation approach of individual behind-the-meter distributed photovoltaic system for demand response baseline estimation[J]. Applied Energy, 2019, 253: 113595.
- [121] WIJAYA T K, VASIRANI M, ABERER K. When bias matters: an economic assessment of demand response baselines for residential customers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1755-1763.
- [122] LIANG X, HONG T Z, SHEN G Q. Improving the accuracy of energy baseline models for commercial buildings with occupancy data[J]. Applied Energy, 2016, 179: 247-260.
- [123] LEE E, LEE K, LEE H, et al. Defining virtual control group to improve customer baseline load calculation of residential demand response[J]. Applied Energy, 2019, 250: 946-958.
- [124] WANG F, LI K P, LIU C, et al. Synchronous pattern matching principle-based residential demand response baseline estimation: mechanism analysis and approach description[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6972-6985.
- [125] TAO P, XU F, DONG Z B, et al. Graph convolutional network-based aggregated demand response baseline load estimation[J]. Energy, 2022, 251: 123847.
- [126] 胡嘉凯,蒋传文,李磊.用户侧利益主体虚拟电厂联盟行为及交易机制[J].电力建设,2020,41(9):1-9.
HU Jiakai, JIANG Chuanwen, LI Lei. Research on coalitional strategy and mechanism of demand-side entities by virtual power plant[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(9): 1-9.
- [127] 麻秀范,余思雨,朱思嘉,等.基于多因素改进 Shapley 的虚拟电厂利润分配[J].电工技术学报,2020,35(增刊2):585-595.
MA Xiufan, YU Siyu, ZHU Sijia, et al. Profit allocation to virtual power plant members based on improved multifactor shapley value method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(Supplement 2): 585-595.
- [128] 谈金晶,王蓓蓓,李扬.系统动力学在需求响应综合效益评估中的应用[J].电力系统自动化,2014,38(13):128-134.
TAN Jinjing, WANG Beibei, LI Yang. Application of system dynamics on comprehensive benefits valuation of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 128-134.
- [129] 谢畅,王蓓蓓,李然,等.基于信用等级的虚拟电厂需求响应效果后评估[J].电力建设,2017,38(9):67-72.
XIE Chang, WANG Beibei, LI Ran, et al. Post-evaluation of demand response effects in virtual power plant based on credit rating[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 67-72.
- [130] 曾博,白婧萌,郭万祝,等.智能配电网需求响应效益综合评价[J].电网技术,2017,41(5):1603-1612.
ZENG Bo, BAI Jingmeng, GUO Wanzhu, et al. Comprehensive evaluation for benefits of demand response in smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1603-1612.
- [131] 国家能源局.国家能源局关于印发《电力并网运行管理规定》的通知[EB/OL].[2021-12-21].http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c_1310391369.htm.
National Energy Administration. Notice of the National Energy Administration on printing and distributing the provisions on regulations on management of power grid connected operation[EB/OL].[2021-12-21].http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c_1310391369.htm.
- [132] 尚楠,张翔,宋艺航,等.适应清洁能源发展和现货市场运行的容量市场机制设计[J].电力系统自动化,2021,45(22):174-182.
SHANG Nan, ZHANG Xiang, SONG Yihang, et al. Design of capacity market mechanism adapting to clean energy development and spot market operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 174-182.
- [133] 麻秀范,陈静,余思雨,等.计及容量市场的用户侧储能优化配置研究[J].电工技术学报,2020,35(19):4028-4037.
MA Xiufan, CHEN Jing, YU Siyu, et al. Research on user side energy storage optimization configuration considering capacity market[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4028-4037.
- [134] 徐箴,孙宏斌,郭庆来.综合需求响应研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2018,38(24):7194-7205.
XU Zheng, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Review and prospect of integrated demand response[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7194-7205.
- [135] 张宁,王毅,康重庆,等.能源互联网中的区块链技术:研究框架与典型应用初探[J].中国电机工程学报,2016,36(15):4011-4023.
ZHANG Ning, WANG Yi, KANG Chongqing, et al.

Blockchain technique in the energy Internet: preliminary research framework and typical applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4011-4023.

- [136] 王蓓蓓, 李雅超, 赵盛楠, 等. 基于区块链的分布式能源交易关键技术[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(14): 53-64.

WANG Beibei, LI Yachao, ZHAO Shengnan, et al. Key technologies on blockchain based distributed energy transaction [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 53-64.

- [137] 北京理工大学能源与环境政策研究中心. 中国碳市场回顾与展望[EB/OL]. [2022-01-09]. <https://ceep.bit.edu.cn/docs/2022-01/eb3a1bf65b6e499281122c9d55ef2f7d.pdf>.

Center for Energy and Environmental Policy Research, Beijing Institute of Technology. Review and prospect of Chinese carbon market[EB/OL]. [2022-01-09]. <https://ceep.bit.edu.cn/docs/2022-01/eb3a1bf65b6e499281122c9d55ef2f7d.pdf>.

- [138] 李彬, 郝一浩, 祁兵, 等. 支撑虚拟电厂互动的信息通信关键技术研究展望[J]. 电网技术, 2022, 46(5): 1761-1770.

LI Bin, HAO Yihao, QI Bing, et al. Key information communication technologies supporting virtual power plant interaction [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1761-1770.

葛鑫鑫(1995—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 需求响应与电力市场。E-mail: xinxinge@ncepu.edu.cn

付志扬(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 机器学习与数据挖掘、新能源功率与负荷预测、虚拟电厂。E-mail: fzy@ncepu.edu.cn

徐 飞(1974—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向: 电热综合能源系统动态建模及协调优化运行、需求侧灵活资源调控技术。E-mail: xufei@tsinghua.edu.cn

王 飞(1973—), 男, 通信作者, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 需求响应与虚拟电厂、新能源预测、电力市场与综合能源等。E-mail: feiwang@ncepu.edu.cn

(编辑 代长振)

Business Model and Key Technologies of Virtual Power Plant for New Power System

GE Xinxin¹, FU Zhiyang², XU Fei³, WANG Fei^{1,4,5}, WANG Junlong⁶, WANG Tao²

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Department of Mathematics and Physics, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

3. State Key Laboratory of Power System and Generation Equipment (Tsinghua University), Beijing 100084, China;

4. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China;

5. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Microgrid (North China Electric Power University), Baoding 071003, China; 6. State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050022, China)

Abstract: The power-source-side structure and load-side configuration of the new power system dominated with renewable energy have undergone profound changes, resulting in increasingly prominent difficulties in power and electricity balance, and more urgent demands for flexible and adjustable resources on the user side. Through demand response and coordinated control, the virtual power plant (VPP) aggregates massive, decentralized and diversified flexible loads and distributed energy resources to form a unified and flexible regulation capability of large capacity, which is crucial to ensure the safe and stable operation of the new power system. This paper summarizes the basic concept, business model and key technologies of VPP. Firstly, the concept, characteristics and functions of VPP are introduced, and the demonstration projects of VPP at home and abroad are compared and analyzed. Secondly, the business model of VPP is expounded from the aspects of value proposition, resource composition, business model and cost-benefit. Thirdly, the key technologies of VPP are summarized from the aspects of state perception and flexible aggregation, information prediction and capacity estimation, market transaction and optimization decision, compensation settlement and benefit evaluation, and the key and difficult points of the existing technologies, models and methods are analyzed. Finally, the future development direction of VPP for new power system is prospected.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2018YFE0122200) and State Grid Corporation of China (No. SGHEYX00SCJS2000037).

Key words: virtual power plant; demand response; new power system; distributed energy resource; business model; system flexibility

