

考虑需求响应的虚拟电厂商业机制研究综述

徐 峰¹,何宇俊²,李建标¹,裴星宇¹,陈建福¹,陈启鑫²

(1. 广东电网有限责任公司 珠海供电局,广东 珠海 519000;2. 清华大学 电机系,电力系
统及发电设备控制和仿真国家重点实验室,北京 100084)

Review of research on commercial mechanism for virtual power plant considering demand response

XU Feng¹, HE Yujun², LI Jianbiao¹, PEI Xingyu¹, CHEN Jianfu¹, CHEN Qixin²

(1. Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China;
2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments,
Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要:将分布式能源以聚合模式接入电网的虚拟电厂,为分布式能源管理提供了新的技术手段,为需求侧资源整合参与电力市场构建了新型商业模式。目前针对虚拟电厂的研究主要集中在运行优化与调控策略等方面,缺乏对市场机制和竞争策略的研究,未能充分发挥虚拟电厂的商业价值。围绕虚拟电厂与需求响应互动的商业机制与市场运营模式,介绍了需求响应参与虚拟电厂运营的参与方式、组织框架、市场竞争策略以及市场博弈模型等方面的研究。最后总结了需求响应在虚拟电厂运营中的商业价值和发展前景。研究内容为国内电力市场进一步开放后虚拟电厂的实际运营提供参考和借鉴。

关键词:虚拟电厂;需求响应;分布式能源;商业机制;市场博弈模型

Abstract: Virtual power plant (VPP) is an innovative business mode and provides new technical means for integrating and managing distributed energy in power market. At present, The research on VPP mainly concentrates on its operation and optimal dispatch, lacking of research on market mechanism and competition strategy, and thus the potential of VPP's commercial value is underestimated. By centering on the business mechanism and operating mode of VPP considering demand response, the recent researches on participating ways, market organization and structure, bidding strategies, as well as game theoretical market models are introduced. Finally, the commercial valuation of demand response in VPP operation and prospective of its development are concluded. This research can provide reference value for the real operation of VPP in future deregulated market environment in China.

Key words: virtual power plant; demand response; distributed energy; commercial mechanism; market game model

中图分类号:TK018;TM715 文献标志码:B

0 引言

虚拟电厂(virtual power plant, VPP)是一种通过先进信息通信技术和软件系统实现分布式能源(distributed energy resource, DER)大规模接入电网的区域性多能源聚合模式^[1]。与微电网相比,VPP中的各DER能够不受地域的限制,通过一个控制中心远程调控,在不改变DER并网的方式下,作为一个特殊电厂参与到电网的运行和调度中,实现DER的大规模消纳及优化配置利用。

狭义上的VPP包括直接并网的分布式发电机组以及储能装置。广义来说,VPP的组成元素还包括需求侧的可控负荷、电动汽车等灵活性资源。这些资源具有实时、高效和精准的动态响应能力,能够与DER高效互补,从而提升VPP的整体效益,使需求

侧获得更多效益分成。就此而言,VPP实质上是一种需求侧资源聚合而产生的创新商业模式。

近年来,国内外组织实施了诸多工程性的VPP试验和示范项目,在运营管理、通信调度等方面积累了一定的实际经验。对于VPP的研究多集中在技术领域,包括VPP的电源容量配置、内部优化调度策略以及与电网的协调运行等方面。如前所述,VPP的核心意义更多体现在参与电力市场的竞标和运营上^[2],即通过市场手段最大限度地提升分布式能源和需求侧资源的价值。在此背景下,研究者对VPP参与电力市场交易的模式^[3],市场行为中的竞价策略^[4-6]和博弈模型,以及VPP如何与需求响应相结合^[7-9]等问题,开展了相关研究。

随着我国电力市场建设的推进,VPP的商业化发展迎来了更大的机遇,需要对VPP参与电力市场的机制和模式进行系统梳理和分析。本文将从VPP的国外发展现状出发,分别就需求响应与VPP联合运营的市场参与方式、组织架构,以及在此基础上的VPP参与市场竞价与博弈模型等方面,梳理需求响应的VPP

收稿日期:2019-03-07;修回日期:2019-03-25

基金项目:南方电网公司科技项目(GDKJXM20172000)

This work is supported by Science and Technology Project of Southern Power Grid Corporation of China (No. GDKJXM 20172000)

市场化运营模式的研究成果。通过总结需求响应在VPP运营中的商业价值,展望需求响应与VPP的合作运营前景,并提出相关问题的研究建议,从而指导我国VPP在开放市场环境下的建设和商业运营。

1 VPP的国外发展现状

VPP的概念自提出以来,受到了欧洲、澳洲、美国等发达国家和地区的广泛关注,并开展了一些可供借鉴的小规模示范项目。2007年,卡塞尔大学将遍布德国的风力涡轮机、太阳能系统、沼气电站和水电站组成最大的VPP项目。2009年丹麦电动汽车智能并网项目(EDISON项目)采用VPP技术管理电动汽车智能充放电^[10]。2012年德国莱茵集团(RWE)开始运营第一家商用规模的虚拟电厂,采用西门子设计的能量管理系统对绿色能源设备进行组合管理,实现了稳定供电,并获得政府补贴。此外,欧洲实施的VPP项目还包括欧盟虚拟燃料电池电厂项目、欧盟FENIX项目等。总的来说,欧洲对VPP的应用更注重分布式能源的接入,而美国较少提到“虚拟发电厂”的概念,主要是推进利用用户侧可控负荷的需求响应与电网互动,并已取得显著成效。据统计,2008年美国各类需求响应项目可在用电高峰时段减少负荷高达38 000 MW,成为全球最为成熟的需求侧资源运营市场。在澳大利亚,AGL能源公司在阿德莱德将用户侧分散的光伏资源整合为一个5 MW的VPP,目前已实现与南澳电网的友好互动。总体来看,根据P&S市场研究发布的报告,全球VPP商业价值预计从2016年的1.915亿美元(约合人民币13亿元)增至2023年的11.875亿美元(约合人民币80.4亿元)。

2 考虑需求响应的VPP市场运营机制

VPP在参与电力市场运营过程中,不仅具有传统发电厂具有的稳定出力 and 批量售电特征,还具有多样化电源集成和丰富的调控手段。将需求响应与VPP结合,一方面扩展了VPP的市场运营范围,另一方面可以促进市场导向的需求响应,代替基于行政指令的需求侧管理。考虑需求响应的VPP在电力市场中既可以参与中长期市场、现货市场,也可以向电网提供调频、备用等辅助服务,从而减少可再生能源发电对国家补贴的依赖。市场导向的需求响应主要可分为价格型需求响应(price based demand response, PBDR)和激励型需求响应(incentive based demand response, IBDR),这两种形式的需求响应都能以市场化方式加入VPP的运营。

2.1 PBDR参与VPP运营

PBDR通过动态峰谷电价的方式促使用户主动调整负荷曲线。在PBDR参与VPP运营的情况下,一般由VPP根据对用户负荷的预测与市场竞价情况决

定PBDR的动态电价。采用负荷的价格弹性矩阵对PBDR建模是常见的建模方法,然而在现实中VPP很难获取准确的负荷弹性矩阵。为了避免该问题,文献[11]提出了一种改进的PBDR模型,首先由用户按偏好顺序提供一组可候选的负荷曲线,然后由VPP按照总成本最小化来优化用户选择负荷曲线的行为决策。

PBDR的典型应用场景为电动汽车(electric vehicle, EV)的有序充放电管理^[12]。相比于传统储能, EV不需要额外的投资,且EV大多数时间为空闲停靠状态,可参与到电力市场中,起到调峰调频、配合风力和光伏发电的作用^[13]。在PBDR与市场交互方面,文献[14]提出了EV通过VPP参与日前市场的竞价策略,由VPP根据日前市场价格波动来对EV进行调度。

2.2 IBDR参与VPP运营

IBDR是以激励补偿的方式对用户将自身负荷进行调度或投入备用调度的行为予以回报。当用户负荷被纳入VPP规划时,通常将负荷分为固定负荷和可中断负荷,并对可中断负荷的响应提供补偿费用。

与传统机组相似,IBDR在运行中需要满足一系列运行约束,如削减量约束、削减持续时间约束、最小间隔时间约束、削减爬坡速率约束等^[15]。VPP实施IBDR后需要对用户的响应电量进行检验来计算IBDR的支付费用。可根据历史负荷数据预测用户的基线负荷,并根据响应误差扣除部分费用。对IBDR的定价还可以采取阶梯定价的方式,中断负荷量每达到一定级别,相应地提高补偿价格^[14]。对于IBDR参与备用市场,也可采取不同的定价方式,如分别对上调备用、下调备用和旋转备用设置不同的补偿价格^[16]。

2.3 考虑需求响应的VPP市场组织架构

VPP一般采取集中化的组织架构,由VPP控制中心远程调控各个DER,参与能量市场和辅助服务市场交易等不同市场竞价。需求响应参与VPP的组织示意图如图1所示。其中IBDR可以通过需求响应市场平台进行交易,交易的形式可以采取集中竞价或者双边协商交易。需求响应交易平台还可以对需求响应提供者的响应情况进行事后校验。而PBDR适用于VPP运营者发售一体的情况,由VPP直接发送动态电价给参与PBDR的大用户以及零售用户,无需中间环节,用户可根据动态电价自行响应。

除了集中化的组织架构,研究者也开始关注基于区块链的分散式VPP架构。区块链技术是一种利用块链式数据结构来验证与存储数据,利用分布式节点共识算法来生成和更新数据,利用智能合约来编程和操作数据的分布式基础架构与计算范式^[17]。能源互联网背景下能源与信息的互联,可以使得区块链技术与能源技术结合,并应用在新型电力市场环境中。文献[3]提出了一种基于区块链技术的VPP模式架构。由于VPP的特殊性,该模型并没有完全采用公有链来去中心化,而保留VPP控制中心

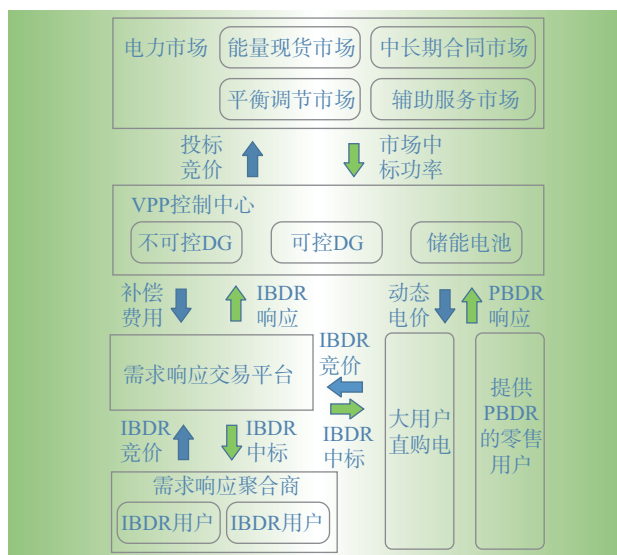


图1 考虑需求响应的VPP架构示意图

Fig. 1 VPP architectural sketch considering demand response

对区块链的发布权和记账权。以区块链技术为基础的VPP架构未来具有相当的发展潜力。

3 VPP的市场竞价与博弈模型分析

竞争性市场环境下的VPP如何参与市场竞价、并与其他市场主体展开市场博弈,是影响VPP与用户收益的关键。在需求响应参与VPP的市场机制基础上,本节对考虑需求响应VPP的市场竞价与博弈模型等方面的研究展开介绍,为VPP的市场化运营中的行为决策、均衡分析、收益分享等相关问题提供解决思路。

3.1 考虑需求响应VPP的市场竞价决策

凭借需求响应的灵活性,VPP通过与需求响应的协调运行可以在不同类型市场竞价,从而将VPP的收益最大化^[18]。文献[4]研究了VPP在能量市场和旋转备用市场中的联合竞价问题。文献[5]提出了基于风光荷储互补优化的VPP竞价混合整数规划模型,将EV作为备用能力调节新能源出力波动。文献[14]提出VPP同时参与双边市场、日前市场、实时市场和平衡市场的三阶段竞标策略。通过同时参与多个市场来降低VPP的运营成本,其中需求响应可以让VPP在高电价时段售出更多电量,从而提高VPP的收益。文献[6]则采用了随机规划方法对VPP分别参与日前市场、日内需求响应市场和实时市场的3阶段竞价决策进行优化,结果表明需求响应交易可有效促进分布式可再生能源的消纳利用,提高VPP的经济效益;但同时也指出当需求容量达到一定程度时,VPP直接购买实时市场电量会比需求侧的“虚拟电能”更有利。

在VPP的电力市场竞价中,需要考虑分布式能源和需求响应的不确定性以及其对市场竞价行为的风险。文献[16]提出了基于鲁棒优化的VPP在日前和

市场调节中竞价模型,根据决策者的风险偏好程度选择恰当的鲁棒控制系数,降低VPP收益波动的风险。

3.2 基于非合作博弈论的市场博弈模型

基于博弈论的市场模型被广泛应用于电力市场主体的行为分析和市场的均衡预测^[7]。采用博弈论方法可以对VPP的市场行为进行精细的分析与预测。基于非合作博弈论的VPP市场模型主要研究VPP的优化决策以及市场的交互行为对市场均衡结果的影响。文献[8]提出了一个基于纳什古诺均衡的随机优化模型来分析VPP对能量市场和辅助服务市场的联合影响。文献[9]将主从博弈模型应用在配电公司、VPP以及需求响应的交互中,用以计算VPP对需求响应的补偿价格。

在需求响应参与的情况下,可将需求侧用户作为独立的行为主体进行博弈分析,为需求响应与VPP的结合提供了新的运营模式。文献[19]提出了VPP与EV的主从博弈模型。其中,VPP作为领导者,以市场收益最大化为目标,对售电价格进行优化,并将优化售电价格发送给EV。EV作为价格跟随者,根据VPP售电价格,以最小化充电成本为目标优化自身的充电行为。EV的优化问题通过卡罗需-库恩-塔克(KKT)条件转化为一组线性约束,并与VPP的优化问题联合求解。

在市场中存在多个VPP的情况下,同样可以用非合作博弈模型来分析VPP与市场的博弈。文献[20]对单个VPP中包含的需求响应采用分时电价(TOU)定价和可中断负荷建模方式,制定了单个VPP的调度策略。通过纳什均衡来分析多个VPP的转移负荷、最优竞价和收益。对于多个VPP互相的博弈行为,文献[21]研究了VPP之间签订双边合同的直购电方式。通过引入合作满意度的概念,建立直购电价优化模型,通过优化直购电价使得合作双方满意度达到最大。

3.3 基于合作博弈论的市场博弈模型

基于资源互补性和协调能力,不同的DER和需求响应以合作模式组成虚拟电厂能够提高各方的收益。合作博弈理论主要涉及多个参与者如何通过合作达到联盟的最大收益以及收益如何分配等问题。合作博弈理论被用来分析VPP中各参与主体的合作能否达成,以及合作收益如何在不同的DER以及需求响应提供者之间进行分配。

文献[22]分析了风电商和EV聚合商分别采取合作博弈和非合作博弈的方式参与日前市场的投标竞争。在合作模式中,风电与EV组成一个VPP参与投标,EV既可以弥补风电的投标偏差,也可以利用多余电池容量在峰谷电价中进行能量套利。对于VPP在日前市场的投标策略,采用古诺博弈模型来模拟VPP与其他传统电厂的博弈行为,并将各参与主体的优化问题转化为KKT条件,构造了一个混合

互补问题(MCP)来计算市场均衡。

VPP的参与主体可通过Shapley值法^[23-24]分配合作剩余效益。Shapley值法是对 n 人合作所得的一种公平分配方法,其核心思想是按照参与者的贡献分配,贡献越多,所得的收益就越多。设一个合作博弈中的参与者的集合为 $N=\{1,2,\dots,n\}$, S 表示包含若干参与者的联盟, $|S|$ 表示联盟 S 中的参与者数量,函数 $v(S)$ 表示联盟 S 创造的效益。则参与主体 i 应分配的效益 ϕ_i 为

$$\phi_i = \sum_{S \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|S|!(|N|-|S|-1)!}{|N|!} (v(S \cup \{i\}) - v(S))$$

Shapley值法在VPP的收益分配问题中得到越来越多的关注。文献[18]分析了VPP内部分属不同利益主体的发电资源通过Shapley值法计算各自分配效益。文献[2]分析了多个虚拟电厂以及虚拟电厂与配电网公司之间通过Shapley值法分配效益。文献[25]则提出了一种基于讨价还价博弈模型的方式来进行VPP中的DER分配效益,并指出DER的博弈空间主要来自于不确定性和风险性。通过构造包含DER边际贡献、预测不确定性和惩罚系数的谈判力函数计算DER的效益分配。

4 结论与展望

本文对考虑虚拟电厂与VPP互动的商业机制与市场运营模式研究进行了系统性梳理,分别对IBDR和PBDR两种形式的需求响应参与VPP运营的参与方式、组织框架、竞价决策以及市场博弈模型等方面进行了深入介绍。综合而言,需求响应与VPP的联盟可以提高VPP的运行效益,降低分布式能源投标偏差的违约风险。需求响应具有在VPP中提供备用调度资源、参与联合市场报价、促进可再生能源的消纳等方面的商业价值。

为了实现需求响应与VPP合作运营的商业化发展前景,还有许多方向需要继续深入研究,包括以下方面:

(1) 加强VPP在能源互联网背景下的商业模式研究。以电蓄热、电制冷设备集群为主的“虚拟储能”既是多能源系统的重要组成部分,同时也具有弹性的需求响应能力。将需求侧的多能转换潜力和多能负荷需求纳入VPP的范围,可以进一步提升VPP的资源配置能力和整体市场价值。包含多能源负荷的VPP商业机制对能源的综合利用具有重要的意义,需要研究多能源负荷的商业价值、定价方式和参与模式,以及冷、热负荷用户的温度体验感和参与意愿对VPP运营模型的影响。

(2) 公平恰当的利润分配机制是促成需求响应与VPP联盟的基础。由于VPP内部不同主体复杂的利益关系,VPP参与市场的行为决策、市场互动以及效益分配的市场博弈模型比传统电厂的市场博弈模型更加复杂,需要考虑不同DER的互补性对效益的

影响。目前该领域研究的文献极少,需要进一步对VPP的市场博弈模型展开研究。一方面探索VPP内部不同主体间的利益分配策略,实现资源的帕累托最优配置;另一方面也要考虑不同VPP同时参与市场竞争时的博弈策略,避免造成价值浪费。

(3) 需要提升VPP的技术调控水平以促进其市场化运营。VPP的价值充分实现有赖于对每一个分布式单元的高效控制,目前国内大部分分布式光伏仍处于无序管理、单向采集、不可控制的状态,对商用空调、照明等典型可控负荷的分组管理也缺乏足够的技术手段。随着传感采集设备和分布式控制组件的广泛应用,以及分布式通信调控技术的成熟应用,能够为虚拟电厂提供更加可行的运营空间。

(4) 为了促进需求响应与VPP的市场化运营,还要在市场体系建设、可行路径等方面开展更多的研究。比如在市场机制方面,需求响应和VPP的联合运营可以参与现货市场中的能量交易,同时可以为系统提供调峰、调频、备用等辅助服务。作为等同发电资源,其还可以参与中长期电量交易,甚至容量市场的竞标引到电网,合理进行中长期规划。又如分布式发电的直接交易是否会为VPP带来新的运营模式,是否应该为VPP赋予绿色属性以提升其综合价值等问题,同样值得关注。针对我国电力市场的实际情况,如何合理规划VPP的范围和职能,为VPP设计合理的竞争机制和有针对性的扶持政策,是政策制定和市场设计方面需要着重考虑的问题。D

参考文献:

- [1] 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):5 103-5 111.
LIU Jizhen, LI Mingyang, PANG Fang, et al. Review on virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5 103-5 111.
- [2] 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.
- [3] 邵炜晖,许维胜,徐志宇,等. 基于区块链的虚拟电厂模型研究[J]. 计算机科学,2018,45(2):25-31.
SHAO Weihui, XU Weisheng, XU Zhiyu, et al. Study on virtual power plant model based on blockchain [J]. Computer Science, 2018, 45(2):25-31.
- [4] MASHHOUR E, MOGHADDAS S M. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets:Part I problem for mulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2):949-956.
- [5] 刘佳楠,李鹏,杨德昌. 基于风光荷储联合优化的虚拟电厂竞价策略[J]. 电力工程技术,2017,36(6):32-37.
LIU Jia'nan, LI Peng, YANG Dechang. The bidding strategy analysis of virtual power plant based on the joint operation of wind-solar-load-storage system[J]. Electric Pow-

- er Engineering Technology, 2017, 36(6):32-37.
- [6] 宋巍,王佳伟,赵海波,等.考虑需求响应交易市场的虚拟电厂多阶段竞价策略研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(19):35-45.
SONG Wei, WANG Jiawei, ZHAO Haibo, et al. Research on multi-stage bidding strategy of virtual power plant considering demand response market[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19):35-45.
- [7] 卢强,陈来军,梅生伟.博弈论在电力系统中典型应用及若干展望[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5 009-5 017.
LU Qiang, CHEN Laijun, MEI Shengwei. Typical applications and prospects of game theory in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5 009-5 017.
- [8] GUO H, CHEN Q, ZHANG J, et al. Evaluating the impacts of VPPs on the joint energy and ancillary service markets equilibrium[C]// 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Chicago, 2017, 1-5.
- [9] HUA W, SUN H, XIAO H, et al. "Stackelberg game-theoretic strategies for virtual power plant and associated market scheduling under smart grid communication environment[C]// 2018 IEEE conference Smart Grid Comm, Aalborg, 2018, 1-6.
- [10] 杨黎辉,许昭,STERGAARD J.,等.电动汽车在含大规模风电的丹麦电力系统中的应用[J].电力系统自动化,2011,35(14):43-47.
YANG Lihui, XU Zhao, STERGAARD J., et al. Electric vehicles in Danish power system with large penetration of windpower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14):43-47.
- [11] 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.
- [12] 周博,吕林,高红均,等.基于两阶段随机规划的虚拟电厂优化交易策略[J].电力建设,2018,39(9):70-77.
ZHOU Bo, LV Lin, GAO Hongjun, et al. Optimal bidding strategy based on two-stage stochastic programming for virtual power plant[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(9): 70-77.
- [13] SORTOMME E, EL-SHARKAWI M A. Optimal scheduling of vehicle-to-grid energy and ancillary services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1):351-359.
- [14] 周亦洲,孙国强,黄文进,等.计及电动汽车和需求响应的多类电力市场下虚拟电厂竞标模型[J].电网技术,2017,41(6):1 759-1 767.
ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Strategic bidding model for virtual power plant in different electricity markets considering electric vehicles and demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(6):1 759-1 767.
- [15] 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): 3 630-3 637.
NIU Wenjuan, LI Yang, WANG Beibei. Demand response based virtual power plant modeling considering uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3 630-3 637.
- [16] 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 for plug-in vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Systems, 2014, 38(13):92-102.
- [17] SWAN M. Blockchain: Blueprint for a new economy[M]. New York: O'Reilly Media, Inc., 2015.
- [18] CHEN J, LIU Y, HE Y, et al. A Comprehensive Valuation of Virtual Power Plant in Multiple Electricity Markets[C]// 2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration(EI2), Beijing, 2018, 1-6.
- [19] 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.
- [20] WANG Y, AI X, TAN Z. Interactive dispatch modes and bidding strategy of multiple virtual power plants based on demand response and game theory[J]. IEEE Trans. on Smart Grid, 2016, 7(1): 510-519.
- [21] 陈好,卫志农,胥峥,等.电力体制改革下的多虚拟电厂联合优化调度策略[J].电力系统自动化,2018,42(7): 1-9.
CHEN Yu, WEI Zhinong, XU Zheng, et al. Optimal scheduling strategy of multiple virtual power plants under electricity market reform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7):1-9.
- [22] 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):155-162.
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): 155-162.
- [23] CONTRERAS J, KLUSCH M, KRAWCZYK J B. Numerical solutions to Nash-Cournot equilibria in coupled constraint electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(1):195-206.
- [24] 谭忠富,宋艺航,张会娟,等.大规模风电与火电联合外送体系及其利润分配模型[J].电力系统自动化, 2013,37(23):63-70.
TAN Zhongfu, SONG Yihang, ZHANG Huijuan, et al. Joint delivery system of large-scale wind power and thermal power generation and its profit distribution model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 63-70.
- [25] 秦婷,刘怀东,王锦桥,等.基于讨价还价博弈理论的分布式能源合作收益分配模型[J].电力自动化设备, 2019,39(1):134-140.
QIN Ting, LIU Huaidong, WANG Jinqiao, et al. Profit allocation model of cooperative distributed energy resources based on bargaining game theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):134-140.