

“双碳”背景下虚拟电厂研究综述

彭道刚^{1,2}, 税纪钧¹, 王丹豪¹, 赵慧荣^{1,2}

1. 上海电力大学自动化工程学院, 上海市 杨浦区 200090;
2. 上海发电过程智能管控工程技术研究中心, 上海市 杨浦区 200090)

Review of Virtual Power Plant Under the Background of “Dual Carbon”

PENG Daogang^{1,2}, SHUI Jijun¹, WANG Danhao¹, ZHAO Huirong^{1,2}

1. College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China;
2. Shanghai Engineering Research Center of Intelligent Management and Control for Power Process, Yangpu District, Shanghai 200090, China)

摘要: 为应对化石燃料日益短缺问题和全球气候变化带来的一系列威胁, 实现“双碳”目标, 风电、光伏等可再生能源在电网中的接入比例不断提高。然而, 可再生能源发电具有随机性和不可控性, 且接入位置分散, 增加了电力系统安全稳定运行的难度。虚拟电厂(virtual power plant, VPP)的提出为上述问题提供了可行路径。总结并阐述了虚拟电厂的概念、分类, 比较了虚拟电厂与微电网的主要区别, 分别从协调控制、资源聚合与优化调度、参与电力市场等角度对现有研究进行分析并总结归纳, 进一步以区块链、数字孪生技术为例, 分析数字技术在虚拟电厂中的应用, 最后指出适合我国国情的虚拟电厂发展前景以及未来可能面临的挑战。

关键词: 虚拟电厂(VPP); 可再生能源; 碳达峰; 碳中和; 协调控制; 资源聚合; 优化调度; 电力市场

ABSTRACT: In order to cope with the increasing shortage of fossil fuels and a series of threats brought by global climate change, and achieve the goal of “dual carbon”, the proportion of renewable energy such as wind power and photovoltaic power in the grid has been continuously increased. However, the renewable energy power generation is random and uncontrollable, and the access location is scattered, which increases the difficulty of safe and stable operation of the power system. The introduction of virtual power plant (VPP) provides a feasible path for the above problems. The concept

and classification of VPP was summarized and expounded. Moreover, the main differences between VPP and microgrid were compared. The existing researches from the perspectives of coordinated control, resource aggregation and optimal scheduling, and participation in the electricity market were analyzed and summarized. Taking the blockchain and digital twin technologies as examples, the applications of digital technologies in VPP were analyzed. Finally, the development prospects of VPP suitable for China's national conditions and the challenges that may be faced in the future were pointed out.

KEY WORDS: virtual power plant (VPP); renewable energy; carbon peak; carbon neutrality; coordinated control; resource aggregation; optimal scheduling; electricity market

0 引言

随着化石能源短缺、环境污染和气候变暖问题日益明显, 如何实现低碳、可持续发展成为世界范围内的重要议题^[1]。为有效应对全球气候变化带来的一系列威胁, 2020年9月, 国家主席习近平在第75届联合国大会一般性辩论上的讲话^[2]中提出“双碳”目标。2021年全国两会, “碳达峰、碳中和”被首次写入政府工作报告^[3]。针对富煤、贫油、少气的资源禀赋特征, 能源结构从化石能源向可再生能源的转型可为我国实现“双碳”目标提供可行路径。

虽然可再生能源具备环保、经济、灵活等优势, 但其出力随机性以及不可控性也会对电力系统的稳定运行产生一定影响^[4]。在能源结构转型

基金项目: 国家自然科学基金项目(92067105, 52006131, 62373241); 上海市科学技术委员会科研项目(20020500500, 20YF1414900)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (92067105, 52006131, 62373241); Shanghai Science and Technology Commission Program (20020500500, 20YF1414900).

的背景下,电力系统应基于市场运营,但由于分布式发电(distributed generator, DG)的特点,仅靠其本身参与电力系统并不可行^[5]。为解决上述问题,可将分布式发电聚合成一个实体(integrated entity, IE)^[6]。

虚拟电厂(virtual power plant, VPP)通过先进的通信、计量和控制技术,基于通信和聚合的思想^[7],在不改变分布式发电并网方式的前提下,以各类聚合体的形式对外呈现,并参与到电力市场中。随着智能电网、综合智慧能源和能源互联网等技术的快速发展,虚拟电厂这一概念受到更广泛的关注,其在充分利用信号处理、信息通信、计量、数据处理等先进技术的基础上,融合边缘计算、数字孪生(digital twin, DT)、区块链等数字技术,使其有望成为新能源接入的智慧能源技术支撑框架^[8]。

本文对虚拟电厂的概念、分类及其与微电网的区别进行介绍,总结归纳虚拟电厂协调控制、资源聚合与优化调度、参与电力市场3个方面的研究进展,分析区块链和数字孪生技术在虚拟电厂中应用的可行性,并指出虚拟电厂在我国“双碳”背景下的发展前景以及未来可能面临的挑战,为后续开展适合我国能源背景和电力现状的虚拟电厂关键技术研究提供参考,促进能源转型以及“双碳”目标的实现。

1 虚拟电厂概述

1.1 虚拟电厂基本概念

虚拟电厂的概念源于1997年Shimon Awerbuch在其著作中对虚拟公共设施的定义^[9]:虚拟公共设施是独立且以市场为驱动的实体之间的一种灵活合作,这些实体能够在不拥有相应资产的情况下,为消费者提供其所需要的公共服务。

自虚拟电厂的概念提出至今,由于不同国家电力背景存在差异,对虚拟电厂的研究侧重点也不同,因此对于虚拟电厂的框架尚无统一定义^[7-8,10]。Caldon等^[11]将虚拟电厂描述为一个地理位置上由多个分布式发电组合聚集成的拓展网络。Bignucolo等^[12]将虚拟电厂描述为分散于中低压配电网中各个节点的不同类型分布式能源

(distributed energy resource, DER)的集合。Morais等^[13-14]先将虚拟电厂定义为多技术和多地点的异质实体,随后又将其确定为与自治微电网相同的网络。Blick等^[10]开展了基于功率匹配器的虚拟电厂项目,在该项目中,虚拟电厂由微型热电联产装置、混合热泵、光伏发电装置、可控电器、电动汽车、风力发电站以及燃气轮机构成。

整体来看,虚拟电厂概念的核心可以总结为通信和聚合,不应被定义为分布式能源的集合体,而应将其定义为利用先进计量、通信、控制等技术,将地理位置分散且与不同层级的电网直接或间接相连的分布式电源、柔性负荷等聚集起来,通过能量管理系统(energy management system, EMS)协调优化控制并参与到整个电力市场,同时优化资源利用、提高大电网稳定性和供电可靠性的一种综合体,其结构如图1所示。

1.2 虚拟电厂分类

虚拟电厂可以聚合各种类型的分布式能源,并通过能量管理系统协调优化多种分布式能源,参与主辅市场。根据功能不同,一般可以将虚拟电厂划分为商业型虚拟电厂(commercial VPP, CVPP)和技术型虚拟电厂(technical VPP, TVPP)2类^[15]。虚拟电厂运行框架如图2所示,其中:TSO为输电系统运营商(transmission system operator);DSO为配电系统运营商(distribution system operator)。

CVPP的功能是制定最优购电和售电计划,参与电力市场竞标获取最大收益,不考虑对配电网安全和稳定运行的影响^[16]。在CVPP架构中,各分布式能源向其递交边际成本、测量数据等, CVPP以利润最大化为目标制定购电、售电计划。当CVPP中标时, CVPP执行独立系统运营商(independent system operator, ISO)的调度指令,向TVPP递交分布式能源发电计划与运行成本等信息。需要指出的是: CVPP和分布式能源均有选择权, CVPP可以选择任意数量的分布式能源作为自身组成部分,同样地,分布式能源也可以选择任意一个CVPP代表其参与电力市场^[17]。

TVPP的功能是为电力系统提供辅助服务,需考虑分布式能源聚合对大电网、配电网的实时影

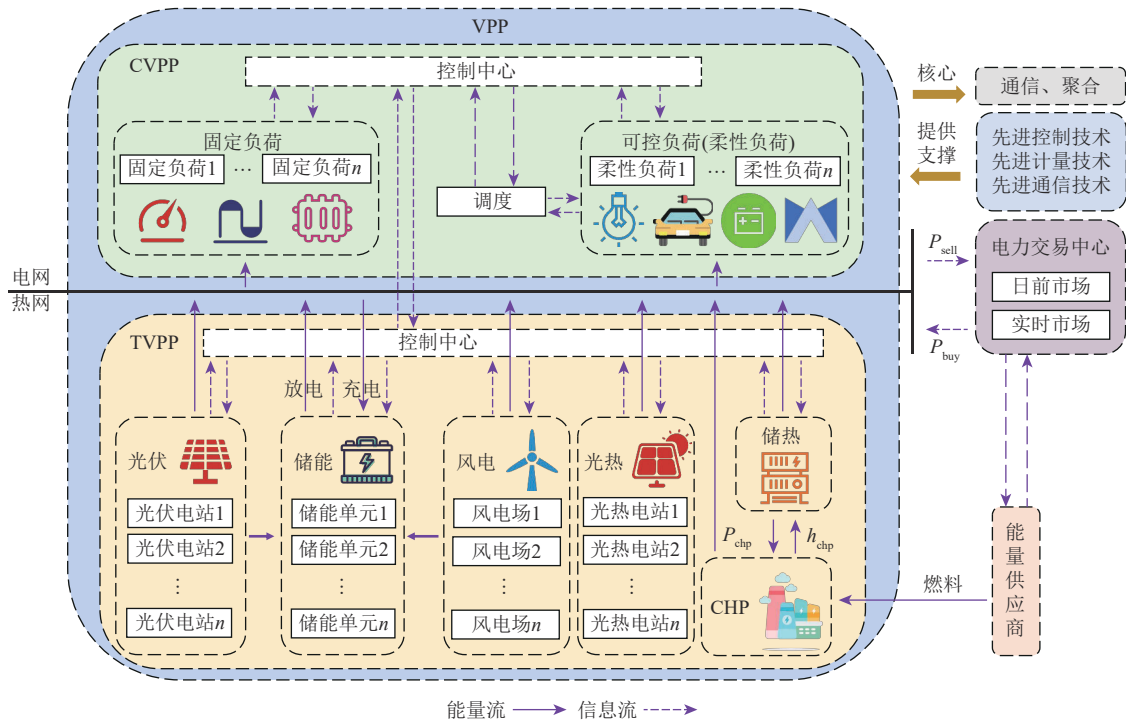


图1 虚拟电厂结构

Fig. 1 Structure of VPP

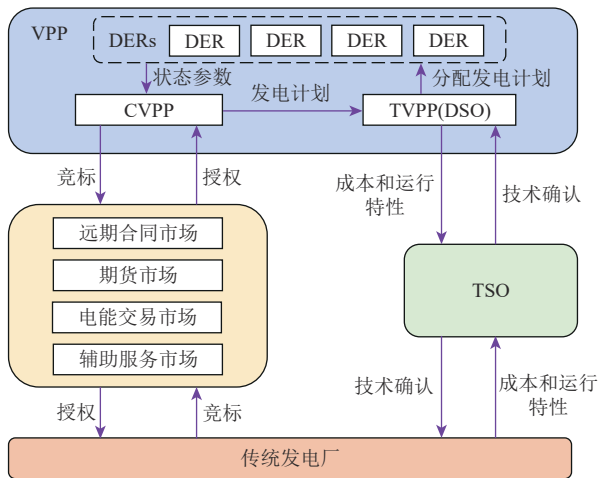


图2 虚拟电厂运行框架

Fig. 2 Operating structure of VPP

响。TVPP还负责对所在区域的TSO和DSO提供平衡和其他配套辅助服务，考虑CVPP内部所包含可控灵活性资源的工况、运行参数、边际成本等信息以及由ISO提供的网络信息，形成其可调节功率成本和调节功率率域。

根据虚拟电厂所包含分布式能源的实际情况，虚拟电厂可单独作为CVPP参与电力市场，也可单独作为TVPP提供辅助服务，还可先作为CVPP

参与电力市场，再作为TVPP提供辅助服务。

1.3 虚拟电厂与微电网的区别

目前，虚拟电厂和微电网是解决小容量分布式能源并网的主要手段，也是实现分布式发电并网最具创造力和吸引力的2种形式^[6]。国内一般将微电网描述为由分布式发电、保护装置、能量转换装置、储能装置以及负荷汇集而成，实现自主控制、管理以及保护的小型发配电自治系统^[18]。虚拟电厂和微电网均是解决分布式发电及其他元件整合并网问题的有效手段，但二者在设计理念、组成、运行模式与特性等方面仍有诸多区别^[19]。微电网注重自治，而虚拟电厂更侧重参与及对外的展现。微电网整合地理位置较近的分布式发电，而虚拟电厂凭借先进通信和计量技术，可聚合多个地理位置接近或分散的分布式能源。另外，虚拟电厂与系统相互作用的要求较微电网更严苛，可用常规电厂运行特性和统计数据评价虚拟电厂。

2 虚拟电厂研究现状

2.1 虚拟电厂协调控制

一般可以将虚拟电厂协调控制分为集中控制、

集中-分散控制和完全分散控制3类^[8]。在集中控制结构中,虚拟电厂的全部决策由控制协调中心(control coordination center, CCC)制定^[20],对分布式电源控制器(distributed generation controller, DGC)下发出力、启停等信息。在集中-分散控制结构中,虚拟电厂被分为2层,同样地,协调控制也分为上下2层。上层控制中心(即虚拟电厂控制中心)将任务分解,发配到下层控制中心,由各个下层控制中心制定所聚合的每个单元的发电、用电方案;同时,下层控制中心将采集到的信息数据传递到上层控制中心,由上层控制中心实现对整体虚拟电厂的协调控制。在完全分散控制结构中,虚拟电厂被划分为多个子系统,系统间通过先进通信技术进行协作,控制中心则成为数据交换和处理中心。

为平衡电力需求和供应之间的关系,以减少负载对电网的影响,国内外学者围绕集中控制结构展开研究。文献[21-25]均采用了直接负载控制(direct load control, DLC)优化算法来确定虚拟电厂终端可控设备的最佳负载控制计划。文献[21]基于线性规划,提出了一种热水器控制策略,通过检测不同的不受控热水器数据,对多样化的热水器负载需求和不同控制动作的受控热水器回报模式进行建模。文献[22]在文献[21]的基础上,通过分割回报模式改善预先确定的候选控制时间表,使控制更加灵活。文献[23]基于动态规划实现负荷设备的启/停周期,与文献[21-22]不同之处在于,该控制策略在降低峰值负荷的基础上最大限度减少了控制的负荷量,以提高收益和客户满意度。文献[24]则基于线性规划实现控制周期内效用利润最大化。在上述研究基础上,Ruiz等^[25]基于DLC来管理由大量具有恒温控制设备的终端用户组成的虚拟电厂,确定虚拟电厂中可控负荷的最佳控制策略,以优化控制周期内负载;然后采用建筑能源模拟工具EnergyPlus模拟每种终端用户类型的模型,以准确获得空调和加热器在不同控制动作作用下的热行为;最后在西班牙北部一个实际电力系统上验证了算法的有效性,为虚拟电厂参与输电系统运营市场提供了一条可行路径。

然而,基于集中控制结构的虚拟电厂由于通

信网络复杂,通常会遇到诸如通信时延等问题^[26],传统虚拟电厂架构不能满足电力系统与市场要求。因此,集中-分散控制结构逐渐取代集中控制结构,成为研究热点。在集中-分散控制结构中,各个代理之间仅根据通信协议交互少量信息,因此在该架构下的控制可靠且高效^[27-35]。陈厚合等^[27]提出了一种分布式调度模型和协同优化的计算框架,计及电网现状和分区,利用交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)构建了调度模型和计算框架。陆秋瑜等^[28]基于次梯度投影分布式控制法,提出了虚拟电厂经济性一次调频方法。近年来,基于多代理技术的分布式控制尤为受到关注^[29-34]。于娜等^[29]提出了一种分层聚合结构的多代理系统(multi-agent system, MAS)控制架构。刘思源等^[30]提出了基于MAS的多虚拟电厂分层控制结构,并研究了二者的兼容性。文献[31-32]通过构建两阶段优化模型实现MAS的最优经济性目标。文献[33-34]通过构建虚拟电厂多目标优化模型实现全局调度最优。刘源等^[35]则针对文献[30-34]中存在的MAS调度及风险控制问题,提出了基于条件风险价值(conditional value-at-risk, CVaR)的两阶段双层分解(bi-level decentralized planning, BLDP)模型,并用此模型模拟MAS的控制结构及各代理层之间的相互联系。

通过对上述文献的分析可以发现,集中控制模式下的通信网络复杂、通信时延等问题并不能完全表征虚拟电厂的核心思想,集中-分散控制和完全分散控制能够在同时满足电力系统与市场要求的前提下,使控制更加可靠高效。因此,未来将围绕集中-分散和完全分散控制结构开展协调控制相关研究。整体来看,虚拟电厂对分布式能源的协调控制极大地缓解了网侧压力。

2.2 虚拟电厂资源聚合与优化调度

虚拟电厂资源聚合与优化调度可以概括如下:在满足约束条件的前提下,协调所聚合的分布式发电,实现运行成本、碳排放最小化以及收益最大化的目标。从微观上看,这是对虚拟电厂中多个分布式发电实现容量分配或出力的优化调度;从宏观上看,这是把虚拟电厂视为一个整体参与

电网调度。根据虚拟电厂的提出目的和核心思想,资源聚合与优化调度是实现虚拟电厂的手段,也是现阶段的研究重点^[36]。

近年来,研究者主要基于不确定性处理、多时间尺度优化、需求响应、CVaR等方面研究虚拟电厂的资源聚合和优化调度。文献[15, 37-38]基于不确定性的响应需求实现了虚拟电厂优化调度。杨秀等^[15]建立商业层与技术层相结合的虚拟电厂双层优化模型,分别以用户利润最高和分布式发电出力成本最小为目标,并充分考虑需求侧和发电侧的利益。王芸芸等^[37]基于双层优化模型,在上层模型中聚合风电场、光伏电站、抽水蓄能电站和需求响应负荷,以总成本最低为目标,建立了满足市场公平性的多能源经济优化调度模型。袁桂丽等^[38]考虑价格型需求响应(price demand response, PDR),通过调整价格信号或激励机制来改善需求侧在系统中产生的影响。

计及分布式能源出力不确定性、电价不确定性等因素,文献[39-42]对多时间尺度协调优化调度架构展开了研究。杨洪朝等^[39]提出了多虚拟电厂(Multi VPPs)日内两阶段多时间尺度协调优化调度架构,如图3所示,上层为虚拟电厂互联后所涉及的共享设备,下层为所涉及的可再生能源等设备,分别采用小时级和分钟级调度策略。李翔宇等^[40]在日内优化中引入马尔科夫决策过程

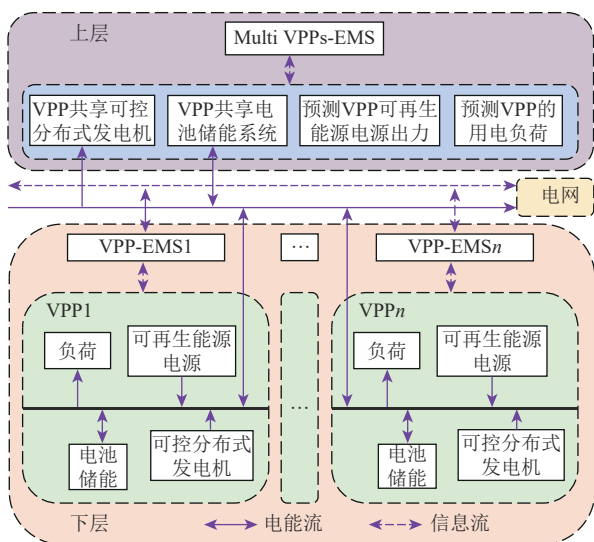


图3 多虚拟电厂多时间尺度优化调度架构

Fig. 3 Multi-time scale optimal scheduling architecture for multi-virtual power plants

(Markov decision process, MDP)以减少建模层级,并提出了包括虚拟电厂日前计划、滚动计划、实时计划在内的全时域优化调度框架。张大海等^[41]在文献[39-40]基础上,考虑将光热(concentrating solar power, CSP)电站和电储能装置(electrical energy storage device, EESD)作为虚拟电厂的组成部分,从资源聚合和优化调度的角度出发,建立基于鲁棒随机优化理论的虚拟电厂随机优化调度模型,以提高新能源并网时的可调度性。葛晓琳等^[42]针对固定时间尺度调度策略的不足,提出了日前随机博弈与实时变时间尺度协同优化方法,对实时调节时间尺度进行自适应改变,协调优化调节成本与调度偏差。

此外,也有学者基于碳交易^[43]、场景决策^[44]、合作博弈^[37, 42]、资源配置^[45-46]等方面研究虚拟电厂的资源聚合与优化调度。

2.3 虚拟电厂参与电力市场

随着电力市场的逐渐开放以及交易机制的逐步完善,对虚拟电厂响应市场电价、负荷需求变化能力以及参与调峰调频等方面提出了更高要求。虚拟电厂参与的电力市场可以分为主能量市场和辅助服务市场,其交易框架^[47]如图4所示。当虚拟电厂参与日前市场时,市场运营商根据虚拟电厂和常规发电机组提交的交易电量以及各方信息确定次日能源价格并对外公布,市场参与者根据该信息调整自身投标量并再次汇报,直至投标量和能源价格达到平衡。当虚拟电厂参与日内市场时,由于可再生能源的出力随机性和不可控性,为保证电网稳定性和能源供需平衡,在弃风、弃光时启动调峰市场实时出清。

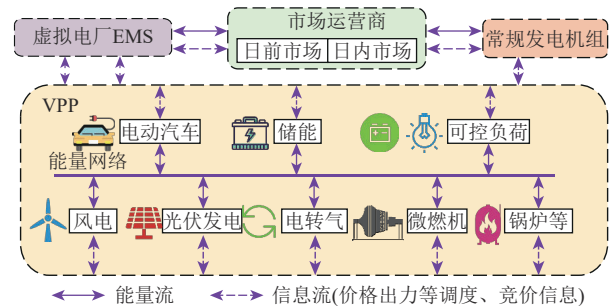


图4 虚拟电厂参与电力市场交易框架

Fig. 4 Trading framework of VPP participating in the electricity market

陈刚等^[48]提出了基于上下层双阶段的电-热能源市场交易策略,上下层分别以购能成本最小和收益最大为目标优化价格和投标量,并通过先进通信技术实现信息交互。宋大为等^[49]也提出了一种双层两阶段联合竞价策略模型,但与文献[48]不同的是,该研究同时考虑到在竞价决策过程中报价的随机性与竞争对手策略的不确定性对竞价策略的影响。刘敦楠等^[50]针对电力现货市场难以适应多元市场主体的差异化物理经济特性和多样化交易需求,提出了多元市场主体的交易报价方式和灵活能量块交易出清模型。

现阶段,虚拟电厂处于参与辅助服务市场为主、参与能量市场为辅的业务形态。刘浩文等^[51]为降低电网调压成本、提高整体经济效益,提出了基于边缘计算虚拟电厂无功服务优化出清模型。卿竹雨等^[52]在响应价格制定策略中引入强化学习,提出了考虑分散式资源互动响应的虚拟电厂智能化调峰定价策略。也有学者^[53-54]从宏观层面探讨了虚拟电厂参与辅助服务市场。还有学者^[47,55]将主能量市场和辅助服务市场作为一个整体进行研究。祖文静等^[47]设计了虚拟电厂参与主辅市场的交易体系,考虑新能源出力的不确定性以及主能量市场与调峰辅助服务市场价格的相关性,构建了虚拟电厂参与主辅市场的联合出清优化模型。叶飞等^[55]针对虚拟电厂内部资源和外部市场对竞标策略的互动影响,提出了考虑购售风险的虚拟电厂双层竞标策略。

3 “双碳”背景下虚拟电厂的数字技术

以区块链和数字孪生为例,分析数字技术在虚拟电厂中的应用及其在虚拟电厂协调控制、资源聚合和优化调度中提供的辅助与支撑作用。

3.1 区块链在虚拟电厂中的应用

区块链是一种不可篡改、可追溯的分布式数据库,其具有去中心化、时序数据、集体维护、可编程和安全可信等特点^[56]。文献[56-57]从广义和狭义上给出区块链的定义,张宁等^[58]将区块链描述为由区块有序链接的数据结构,每个区块由用于链接的区块头和记录数据信息的区块主体2部分构成。区块链技术在虚拟电厂中的应用^[58]如

图5所示,可以从功能维度、对象维度和属性维度3个方面进行归纳和分析。本文结合虚拟电厂与区块链自身特性并参考现有研究,主要对区块链技术辅助虚拟电厂优化调度、支撑虚拟电厂参与电力市场交易2个方面进行归纳分析。

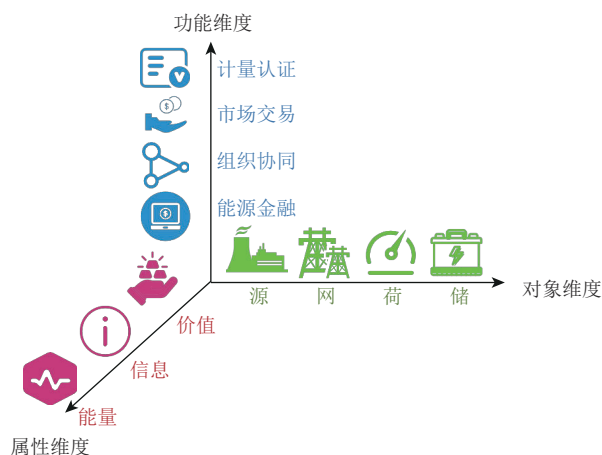


图5 区块链技术在虚拟电厂中的应用

Fig. 5 Application of blockchain technology in VPP

1) 区块链技术辅助虚拟电厂优化调度

区块链技术可作为虚拟电厂优化调度的辅助技术。文献[59-60]探讨了基于区块链的虚拟电厂模型,重点分析了区块链技术应用用于虚拟电厂的可行性,并将应用中存在的问题归纳如下:区块链的信息并非完全安全可靠;运行效率较低,资源利用不充分;智能合约责任主体缺失。文献[61-65]探索了区块链技术引入虚拟电厂的可能性,其中,余维等^[61]提出了一种基于能源区块链网络的虚拟电厂运行与调度模型,该模型更强调反映需求侧实时信息,提高了系统的数据安全性和存储安全性。周国亮等^[62]提出利用共识机制实现调度,并利用拜占庭容错(practical Byzantine fault tolerance, PBFT)算法实现负荷在机组间的合理分配。任建文等^[63]对区块链技术引入虚拟电厂的合理性进行分析,并基于PBFT实现区块链下半中心化的两阶段鲁棒优化调度模型。陈凯玲等^[64]在文献[61-63]的基础上,基于多元用电主体的概念,提出了改进的虚拟电厂运行调度模型。王海群等^[65]将区块链技术引入能源互联网系统中,形成能源区块链网络,进而实现虚拟电厂分布式调度,利用等耗量微增率准则,实现了虚拟电厂电能调

度最优化。周步祥等^[66]从虚拟电厂的功能特征出发,创建由商业链、技术链和资产链组成的区块链,综合考虑多虚拟电厂形成的多决策主体利益关联与冲突的局面,建立考虑网络安全约束的多虚拟电厂主从博弈优化运行方法。以上研究为区块链技术实现虚拟电厂的分布式调度提供了参考。

2) 区块链技术支撑虚拟电厂参与电力市场交易

部分学者^[67-73]侧重研究基于区块链的虚拟电厂参与电力市场交易模型。文献[67-68]构建了基于区块链的分布式能源交易模型,其中文献[67]分别从物理结构、智能合约以及交易流程3个模块构建了基于联盟区块链的分布式能源交易模型。平健等^[69]针对分布式能源交易违约现象严重的问题,提出了基于信用证明(proof-of-credit, PoC)共识机制的分布式能源信用管控机制。李强等^[70]针对基于区块链技术的虚拟电厂可信交易平台对虚拟电厂交易的适配性和应用场景等问题,搭建了涵盖各项服务的全链条服务,并验证了运行模式的可行性。玄佳兴等^[71]针对分布式能源交易集中调度处理可靠性低、速度慢等问题,提出了主从分片区块链的分布式能源交易模型,从链采用文献[69]所提出的PoC共识机制。陈子杰等^[72]基于现有研究搭建了基于区块链的硬件仿真平台;针对现有能源区块链研究尚未定量对比不同共识算法优劣的问题,该团队^[73]又提出了多维度的共识算法定量评估方法,以及应用两阶段混合公式算法的能源区块链的实现方案。

现阶段关于分布式电力交易的区块链算法应用研究较多,但基于区块链技术的虚拟电厂研究仍处于起步阶段。因此,以上2个方面的融合研究或将成为未来的研究重点。

3.2 数字孪生在虚拟电厂中的应用

数字孪生的概念起源于美国密歇根大学Grieves教授的产品生命周期管理(product lifecycle management, PLM)中的设想^[74],他首次提出了镜像空间模型(mirrored spaces model, MSM),并指出该模型由真实空间、虚拟空间和链接机制3个元素组成。数字孪生可以更广义地描述为:利用数字技术创建物理实体的虚拟模型,利用数据模

拟物理实体在现实情景中的活动,以及利用虚实互动、数据融合分析、决策迭代优化等方法,为物理实体增强或扩展新的能力^[75]。

随着物联网、工业互联网等新一代信息与通信技术高速发展,数字孪生技术受到了广泛关注。学者们开始探讨数字孪生技术在能源电力上的应用。房方等^[76]提出面向智能发电的数字孪生架构,探讨了在智能发电系统中部署数字孪生技术的一般性方法,并分别从过程自动化、综合效益管理、生产风险管控、设备设计交付、新应用研发、高效信息交流、协同决策和人员操作培训8个方面探索数字孪生技术在智能发电中应用的可行性。文献[77-78]则围绕数字孪生技术在智慧能源行业中的应用问题,分析该技术的实现路径与技术挑战。赵鹏等^[79]重点分析了数字融合建模与电网资源协同互动,提出了电力物联网体系架构和安全防御机制。齐波等^[80]从状态感知、数据治理、模型构建3个方面阐述了数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用。盛戈峰等^[81]在文献[80]的研究基础上,提出了新型电力系统背景下电力设备高效运行和智能维护的基本特征和技术体系。蒲天骄等^[82]基于数字孪生五维模型,针对能源互联网实际需求,结合多业务环节,提出了能源互联网数字孪生模型,分别从物理感知、传输交互、数据共享、应用服务、虚拟空间和安全防护等方面分析其架构。文献[83-84]分别探讨了电力数字孪生系统(digital twin of power systems, PSDT)的实现框架和项目成熟度评价体系。

目前,数字孪生技术在能源电力上的应用研究主要集中在电力系统、综合能源系统等较为宏观的方面,数字孪生技术在虚拟电厂上的融合与应用的相关研究仍较少。严兴煜等^[85]基于数字孪生技术在能源电力上的应用研究,提出了以下概念:数字孪生虚拟电厂是指物理空间实体和信息维度虚拟电厂虚实融合与共存的形式。数字孪生虚拟电厂系统(digital twin VPP system, DTVPPS)包含物理实体、数字孪生体、孪生数据、连接以及智能应用等,总体架构^[85]如图6所示。

DTVPPS技术生态系统由物理层、信息中枢层、感知层和智能应用层组成,其中:物理层是

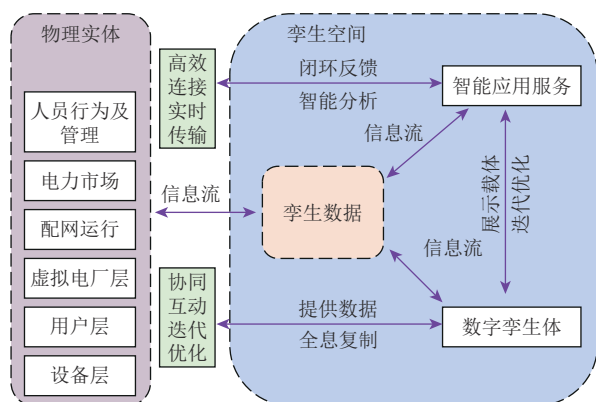


图6 数字孪生虚拟电厂系统总体架构

Fig. 6 Framework of DTVPPS

该系统的基础，主要包括源、网、荷、储的物理实体、人员行为等；信息中枢层是系统的智慧大脑，由孪生模型、智能分析平台等部分构成；感知层是系统数据感知接入的媒介，借助高性能传感器获取物理实体电气量，实现对聚合的物理对象的状态感知、环境检测、行为追踪以及数据传输等；智能应用层按场景分为设备管理、应用业务、配网接入、运营管理等模块^[85]。

数字孪生技术在虚拟电厂领域的研究目前还处于起步阶段，但考虑到我国电力行业的特点，可预见数字孪生技术在虚拟电厂中的应用有望成为未来的研究重点。

4 发展前景与挑战

鉴于我国对清洁能源和新兴技术发展的大力推动，加之虚拟电厂自身特性又符合我国能源电力发展的要求与方向，因此虚拟电厂具有巨大的发展前景。以上探讨的虚拟电厂并非完全适合我国电力工业，还需要结合实际情况进行研究，虚拟电厂的发展前景和面临的挑战可能有以下方面：

1) CVPP和TVPP相互协作。TVPP完成运行特性聚合后，会受到上级电网的控制，从而无法获取更多利润；由于CVPP的规模扩大，市场行为有可能会影响电力系统安全稳定运行。因此，单纯的CVPP或TVPP无法满足分布式能源的经济效益以及配电网安全稳定运行的要求，需要借助CVPP的经济基础和TVPP的技术支撑，共同促进虚拟电厂进一步推广应用。

2) 建立考虑多能源与多重不确定性的优化调度与控制策略。由于虚拟电厂中可再生能源的高比例接入，其出力随机性和不可控性不断提高，在制定调度计划时面临不确定的风险，不仅会影响配电网的安全稳定运行，还会对虚拟电厂收益造成一定影响。因此，在考虑内部资源协调的同时，还需要考虑不确定性因素带来的影响，从虚拟电厂安全稳定运行和实现经济效益最大化2个方面深入研究。

3) 虚拟电厂参与多种市场。完善的虚拟电厂架构不仅参与主能量市场，也应提供与传统电厂相同的各种辅助服务。利用虚拟电厂聚合分布式发电提供无功服务，可以在很大程度上减轻电网的调节成本，实现整体利益最大化。虽然已有学者在虚拟电厂参与辅助服务市场方面进行研究，但如何克服分布式能源地域性特征和削弱电网运行条件影响仍是亟待解决的问题^[51]。

4) 数字技术在虚拟电厂中的融合应用。与传统工业制造领域相比，电力系统呈现规模大、复杂程度高以及反馈实时性要求高等特点，因此对区块链、数字孪生等数字技术在虚拟电厂中的应用提出了更高的要求。探讨数字技术的融合应用可以从DTVPPS技术生态系统各层入手，挖掘可实现的典型应用，为电力发展提供技术基础和建设思路，为电网数字化、智能化建设提供新途径。

5 结论

虚拟电厂是基于先进控制、通信、计量等技术的分布式能源综合体，通过协调调度聚合的资源参与电力市场。在“双碳”背景下，对虚拟电厂的研究重点聚焦在协调控制、资源聚合与优化调度、参与电力市场等方面。同时，区块链、数字孪生等数字技术都可应用在虚拟电厂的体系架构中，以促进虚拟电厂技术的发展。总的来说，虚拟电厂在推动资源高效利用、可再生能源发电、我国电力市场环境和体制改革与完善等方面均具有广阔的发展前景。

参考文献

[1] 姜红丽, 刘羽茜, 冯一铭, 等. 碳达峰、碳中和背景

- 下“十四五”时期发电技术趋势分析[J]. 发电技术, 2022, 43(1): 54-64.
- JIANG H L, LIU Y X, FENG Y M, et al. Analysis of power generation technology trend in 14th five-year plan under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(1): 54-64.
- [2] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.
- XI J P. Statement at the general debate of the 75th session of the United Nations General Assembly[J]. *Gazette of the State Council of the People's Republic of China*, 2020(28): 5-7.
- [3] 李克强. 政府工作报告: 2021年3月5日在第十三届全国人民代表大会第四次会议上[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(8): 5-17.
- LI K Q. Government work report: delivered at the fourth session of the 13th National People's Congress on March 5, 2021[J]. *Gazette of the State Council of the People's Republic of China*, 2021(8): 5-17.
- [4] 宣文博, 李慧, 刘忠义, 等. 一种基于虚拟电厂技术的城市可再生能源消纳能力提升方法[J]. 发电技术, 2021, 42(3): 289-297.
- XUAN W B, LI H, LIU Z Y, et al. A method for improving the accommodating capability of urban renewable energy based on virtual power plant technology[J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(3): 289-297.
- [5] 李英量, 周丽雯, 王德明, 等. 计及用户分级的虚拟电厂经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 121-130.
- LI Y L, ZHOU L W, WANG D M, et al. Virtual power plant economic dispatching considering user classification[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(16): 121-130.
- [6] MASHHOUR E, MOGHADDAS-TAFRESHI S M. A review on operation of micro grids and Virtual Power Plants in the power markets[C]//2009 2nd International Conference on Adaptive Science & Technology (ICAST). Accra, Ghana: IEEE, 2010: 273-277.
- [7] 刘东, 樊强, 尤宏亮, 等. 泛在电力物联网下虚拟电厂的研究现状与展望[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(4): 3-12.
- LIU D, FAN Q, YOU H L, et al. Research status and trends of virtual power plants under electrical internet of things[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(4): 3-12.
- [8] 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 J Z, LI M Y, FANG F, et al. Review on virtual power plants[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 5103-5111.
- [9] SHIMON A, ALISTAIR P. *The virtual utility*[M]. Boston, MA: Springer, 1997.
- [10] BLIEK F W, VAN DEN NOORT A, ROOSSEN B, et al. The role of natural gas in smart grids[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2011, 3(5): 608-616.
- [11] CALDON R, PATRIA A R, TURRI R. Optimisation algorithm for a virtual power plant operation[C]//39th International Universities Power Engineering Conference, 2004. Bristol, UK: IEEE, 2005: 1058-1062.
- [12] BIGNUCOLO F, CALDON R, PRANDONI V, et al. The voltage control on MV distribution networks with aggregated DG units (VPP)[C]//Proceedings of the 41st International Universities Power Engineering Conference. Newcastle-upon-Tyne, UK: IEEE, 2007: 187-192.
- [13] MORAIS H, CARDOSO M, CASTANHEIRA L, et al. VPPs information needs for effective operation in competitive electricity markets[C]//2007 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics. Vienna, Austria: IEEE, 2007: 1183-1188.
- [14] MORAIS H, KADAR P, CARDOSO M, et al. VPP operating in the isolated grid[C]//2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2008: 1-6.
- [15] 杨秀, 杜楠楠, 孙改平, 等. 考虑需求响应的虚拟电厂双层优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 137-146.
- YANG X, DU N N, SUN G P, et al. Bi-level optimization dispatch of virtual power plants considering the demand response[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(2): 137-146.
- [16] 陈会来, 张海波, 王兆霖. 不同类型虚拟电厂市场及调度特性参数聚合算法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 15-28.
- CHEN H L, ZHANG H B, WANG Z L. A review of market and scheduling characteristic parameter aggregation algorithm of different types of virtual power plants[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(1): 15-28.
- [17] 夏榆杭, 刘俊勇. 基于分布式发电的虚拟发电厂研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 100-106.
- XIA Y H, LIU J Y. Review of virtual power plant based on distributed generation[J]. *Electric Power*

- Automation Equipment, 2016, 36(4): 100-106.
- [18] 霍龙, 张誉宝, 陈欣. 人工智能在分布式储能技术中的应用[J]. 发电技术, 2022, 43(5): 707-717.
HUO L, ZHANG Y B, CHEN X. Artificial intelligence applications in distributed energy storage technologies[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(5): 707-717.
- [19] 赵敏, 陈颖, 沈沉, 等. 微电网群特征分析及示范工程设计[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1469-1476.
ZHAO M, CHEN Y, SHEN C, et al. Characteristic analysis of multi-microgrids and a pilot project design [J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1469-1476.
- [20] GONG J X, XIE D, JIANG C W, et al. Multiple objective compromised method for power management in virtual power plants[J]. Energies, 2011, 4(4): 700-716.
- [21] LEE S H, WILKINS C L. A practical approach to appliance load control analysis: a water heater case study[J]. IEEE Power Engineering Review, 1983, 3(5): 64.
- [22] KURUCZ C N, BRANDT D, SIM S. A linear programming model for reducing system peak through customer load control programs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(4): 1817-1824.
- [23] CHU W C, CHEN B K, FU C K. Scheduling of direct load control to minimize load reduction for a utility suffering from generation shortage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(4): 1525-1530.
- [24] NG K H, SHEBLE G B. Direct load control: a profit-based load management using linear programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 688-694.
- [25] RUIZ N, COBELO I, OYARZABAL J. A direct load control model for virtual power plant management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 959-966.
- [26] TSIKALAKIS A G, HATZIARGYRIOU N D. Centralized control for optimizing microgrids operation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 241-248.
- [27] 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 H H, WANG Z X, ZHANG R F, 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.
- [28] 陆秋瑜, 杨银国, 王中冠, 等. 基于次梯度投影分布式控制法的虚拟电厂经济性一次调频[J]. 电力建设, 2020, 41(3): 79-85.
LU Q Y, YANG Y G, WANG Z G, et al. Economic primary frequency control of virtual power plant applying distributed control method based on sub-gradient projection[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(3): 79-85.
- [29] 于娜, 于乐征, 李国庆. 智能电网环境下基于多代理的商业用户可控负荷管理策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 89-95.
YU N, YU L Z, LI G Q. Controllable load management strategy for commercial users based on multi-agent in smart grid environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 89-95.
- [30] 刘思源, 艾芊, 郑建平, 等. 多时间尺度的多虚拟电厂双层协调机制与运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 753-761.
LIU S Y, AI Q, ZHENG J P, et al. Bi-level coordination mechanism and operation strategy of multi-time scale multiple virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 753-761.
- [31] 曾鉴, 刘俊勇, 杜新伟, 等. 风电全消纳下虚拟电厂内部资源鲁棒调度策略[J]. 现代电力, 2019, 36(3): 80-87.
ZENG J, LIU J Y, DU X W, et al. Robust scheduling strategy of the internal resources in VPP based on wind power completely consumed[J]. Modern Electric Power, 2019, 36(3): 80-87.
- [32] 李嘉媚, 艾芊. 考虑调峰辅助服务的虚拟电厂运营模式[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 1-13.
LIU J M, AI Q. Operation mode of virtual power plant considering peak regulation auxiliary service[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 1-13.
- [33] 韦纯进, 樊艳芳, 张雅, 等. 基于二维联盟多代理技术的风-光-储集群广域协调控制[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 308-316.
WEI C J, FAN Y F, ZHANG Y, et al. Wide-area coordinated control of WPESs cluster based multi-agent technology for two-dimensional alliance[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(1): 308-316.
- [34] 盛万兴, 段青, 王良, 等. 基于多代理协调机制的能量路由器群组与配电网综合规划[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 1-13.
SHENG W X, DUAN Q, WANG L, et al. Comprehensive planning for energy routers and distribution network based on multi-agent system

- coordination mechanism[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(1): 1-13.
- [35] 刘源, 檀勤良, 张兴平. 基于交互算法的多代理虚拟电厂调度优化及风险分析[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(6): 2-12.
- LIU Y, TAN Q L, ZHANG X P. Multi-agent VPP coordinated control optimization and risk analysis based on the interactive algorithm[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(6): 2-12.
- [36] 方燕琼, 艾芊, 范松丽. 虚拟电厂研究综述[J]. *供电*, 2016, 33(4): 8-13.
- FANG Y Q, AI Q, FAN S L. A review on virtual power plant[J]. *Distribution & Utilization*, 2016, 33(4): 8-13.
- [37] 王芸芸, 马志程, 周强, 等. 兼顾公平性的多能源合作博弈优化调度[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(10): 482-492.
- WANG Y Y, MA Z C, ZHOU Q, et al. Multi energy cooperative game optimal scheduling considering fairness[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(10): 482-492.
- [38] 袁桂丽, 钟飞, 张睿, 等. 考虑碳捕集及需求响应的虚拟电厂热电联合优化调度[J/OL]. *电网技术*: 1-9 [2023-02-04]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1786>.
- YUAN G L, ZHONG F, ZHANG R, et al. Combined heat and power scheduling optimization for virtual power plants considering carbon capture and demand response[J/OL]. *Power System Technology*: 1-9 [2023-02-04]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2022.1786>.
- [39] 杨洪朝, 杨迪, 孟科. 高比例可再生能源渗透下多虚拟电厂多时间尺度协调优化调度[J]. *智慧电力*, 2021, 49(2): 60-68.
- YANG H Z, YANG D, MENG K. Multi-time scale coordination optimal scheduling of multiple virtual power plants with high-penetration renewable energy integration[J]. *Smart Power*, 2021, 49(2): 60-68.
- [40] 李翔宇, 赵冬梅. 基于模糊-概率策略实时反馈的虚拟电厂多时间尺度优化调度[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(7): 1446-1455.
- LI X Y, ZHAO D M. Research on multi-time scale optimal scheduling of virtual power plant based on real-time feedback of fuzzy-probability strategy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(7): 1446-1455.
- [41] 张大海, 负韞韵, 王小君, 等. 计及风光不确定性的新能源虚拟电厂多时间尺度优化调度[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(11): 529-537.
- ZHANG D H, YUN Y Y, WANG X J, et al. Multi-time scale of new energy scheduling optimization for virtual power plant considering uncertainty of wind power and photovoltaic power[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(11): 529-537.
- [42] 葛晓琳, 曹旭丹, 李伶玲. 多虚拟电厂日前随机博弈与实时变时间尺度优化方法[J/OL]. *电力自动化设备*: 1-15 [2023-02-04]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202301003>.
- GE X L, CAO X D, LI Y L. Day-ahead stochastic game and real-time adaptive time scale optimization method for multiple virtual power plants[J/OL]. *Electric Power Automation Equipment*: 1-15 [2023-02-04]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202301003>.
- [43] 贾德香, 柳占杰, 高赛, 等. 计及碳-电一体化交易的虚拟电厂竞价策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(2): 89-97.
- JIA D X, LIU Z J, GAO Q, et al. Bidding strategy of the virtual power plant based on the consideration of carbon-electricity integration trading in auxiliary service market[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(2): 89-97.
- [44] 黄勤坤, 邱瑜, 王飞, 等. 考虑多重不确定性的虚拟电厂随机优化调度[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(11): 8-16.
- HUANG Q K, QIU Y, WANG F, et al. Stochastic optimal scheduling of virtual power plants considering multiple uncertainties[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(11): 8-16.
- [45] 白雪岩, 樊艳芳, 刘雨佳, 等. 考虑可靠性及灵活性的风光储虚拟电厂分层容量配置[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(8): 11-24.
- BAI X Y, FAN Y F, LIU Y J, et al. Wind power storage virtual power plant considering reliability and flexibility tiered capacity configuration[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(8): 11-24.
- [46] 郭佳兴, 王金梅, 张海同. 基于虚拟电厂的多能源协同系统调度优化策略[J]. *电力建设*, 2022, 43(12): 141-151.
- GUO J X, WANG J M, ZHANG H T. Scheduling optimization strategy based on virtual power plant for multi-energy collaborative system[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(12): 141-151.
- [47] 祖文静, 杜易达, 李鹏, 等. 计及不确定性与相关性的虚拟电厂参与主辅市场联合交易优化研究[J]. *智慧电力*, 2022, 50(10): 70-77.
- ZU W J, DU Y D, LI P, et al. Optimization of virtual power plant participating in joint trading in main and auxiliary markets considering uncertainty and

- correlation[J]. *Smart Power*, 2022, 50(10): 70-77.
- [48] 陈刚, 那广宇, 王琛淇, 等. 考虑综合需求响应和储能的双阶段虚拟电厂交易策略[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2021, 40(1): 64-71.
CHEN G, NA G Y, WANG C Q, et al. Two-stage virtual power plant trading strategy considering comprehensive demand response and energy storage[J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2021, 40(1): 64-71.
- [49] 宋大为, 尹硕, 何洋, 等. 基于虚拟电厂的多元小微主体参与现货市场的竞价策略[J]. *南方电网技术*, 2021, 15(9): 75-84.
SONG D W, YIN S, HE Y, et al. Bidding strategy of multiple small and micro entities participating in the spot market based on virtual power plant[J]. *Southern Power System Technology*, 2021, 15(9): 75-84.
- [50] 刘敦楠, 李竹, 徐尔丰, 等. 面向新型电力系统的灵活能量块交易出清模型[J]. *电网技术*, 2022, 46(11): 4150-4162.
LIU D N, LI Z, XU E F, et al. Flexible block order trading clearing model for new power systems[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(11): 4150-4162.
- [51] 刘浩文, 刘东, 陈张宇, 等. 多级协同虚拟电厂环境下的无功辅助服务优化出清[J]. *电网技术*, 2021, 45(7): 2533-2541.
LIU H W, LIU D, CHEN Z Y, et al. Optimal reactive power service clearing based on multilevel cooperative VPP[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(7): 2533-2541.
- [52] 卿竹雨, 安锐, 高红均, 等. 考虑分散式资源互动响应的虚拟电厂智能化调峰定价[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(5): 96-103.
QING Z Y, AN R, GAO H J, et al. Intelligent peak regulation pricing for virtual power plant considering interactive response of distributed resource[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(5): 96-103.
- [53] 杨梓俊, 荆江平, 邓星, 等. 虚拟电厂参与江苏电网辅助服务市场的探讨[J]. *电力需求侧管理*, 2021, 23(4): 90-95.
YANG Z J, JING J P, DENG X, et al. Discussion on virtual power plant participating in ancillary service market of Jiangsu power grid[J]. *Power Demand Side Management*, 2021, 23(4): 90-95.
- [54] 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 J M, AI Q, YIN S R. 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.
- [55] 叶飞, 邵平, 王宣元, 等. 考虑购售风险的虚拟电厂双层竞标策略[J]. *电力建设*, 2020, 41(6): 28-35.
YE F, SHAO P, WANG X Y, et al. Bi-level bidding strategies for virtual power plants considering purchase and sale risks[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(6): 28-35.
- [56] 袁勇, 王飞跃. 区块链技术发展现状与展望[J]. *自动化学报*, 2016, 42(4): 481-494.
YUAN Y, WANG F Y. Blockchain: the state of the art and future trends[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(4): 481-494.
- [57] 何蒲, 于戈, 张岩峰, 等. 区块链技术与应用前瞻综述[J]. *计算机科学*, 2017, 44(4): 1-7.
HE P, YU G, ZHANG Y F, et al. Survey on blockchain technology and its application prospect[J]. *Computer Science*, 2017, 44(4): 1-7.
- [58] 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 N, WANG Y, KANG C Q, et al. Blockchain technique in the energy internet: preliminary research framework and typical applications [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(15): 4011-4023.
- [59] 何奇琳, 艾芊. 区块链技术在虚拟电厂中的应用前景[J]. *电器与能效管理技术*, 2017(3): 14-18.
HE Q L, AI Q. Application prospect of block chain technology in virtual power plant[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2017(3): 14-18.
- [60] 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 W H, XU W S, XU Z Y, et al. Study on virtual power plant model based on blockchain[J]. *Computer Science*, 2018, 45(2): 25-31.
- [61] 余维, 胡跃, 杨晓宇, 等. 基于能源区块链网络的虚拟电厂运行与调度模型[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(13): 3729-3736.
SHE W, HU Y, YANG X Y, et al. Virtual power plant operation and scheduling model based on energy blockchain network[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(13): 3729-3736.
- [62] 周国亮, 李刚. 区块链背景下虚拟电厂分布式调度策略研究[J]. *计算机工程与应用*, 2020, 56(15): 268-273.
ZHOU G L, LI G. Research on distributed scheduling strategy of virtual power plant considering blockchain [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2020,

- 56(15): 268-273.
- [63] 任建文, 张青青. 基于能源区块链的虚拟电厂两阶段鲁棒优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(8): 23-33.
REN J W, ZHANG Q Q. Two-stage robust optimal scheduling of virtual power plant based on energy blockchain[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 23-33.
- [64] 陈凯玲, 顾闻, 王海群. 能源区块链网络中的虚拟电厂运行与调度模式[J]. 系统管理学报, 2022, 31(1): 143-149.
CHEN K L, GU W, WANG H Q. Mode of virtual power plant operation and dispatching in energy blockchain network[J]. Journal of Systems & Management, 2022, 31(1): 143-149.
- [65] 王海群, 费斐, 陈凯玲. 基于能源区块链的虚拟电厂分布式调度策略[J]. 系统管理学报, 2022, 31(2): 406-411.
WANG H Q, FEI F, CHEN K L. Distributed dispatching strategy of virtual power plant based on energy blockchain[J]. Journal of Systems & Management, 2022, 31(2): 406-411.
- [66] 周步祥, 张越, 臧天磊, 等. 基于区块链的多虚拟电厂主从博弈优化运行[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 155-163.
ZHOU B X, ZHANG Y, ZANG T L, et al. Blockchain-based Stackelberg game optimal operation of multiple virtual power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 155-163.
- [67] 熊威, 杨彬佑, 张睿, 等. 基于联盟链的分布式能源交易模型研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(10): 24-29.
XIONG W, YANG B Y, ZHANG R, et al. Research on distributed energy trading model based on consortium chain[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 24-29.
- [68] 马腾, 刘洋, 刘俊, 等. 智能合约技术下微电网群电能分布式交易模型[J]. 电力建设, 2021, 42(1): 41-48.
MA T, LIU Y, LIU J, et al. Distributed transaction model of electricity in multi-microgrid applying smart contract technology[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(1): 41-48.
- [69] 平健, 严正, 陈思捷, 等. 基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7137-7145.
PING J, YAN Z, CHEN S J, et al. Credit risk management in distributed energy resource transactions based on blockchain[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7137-7145.
- [70] 李强, 李冰, 常哲铭. 基于区块链的虚拟电厂可信交易[J]. 现代信息科技, 2021, 5(17): 165-168.
LI Q, LI B, CHANG Z M. The trusted transaction of virtual power plant based on blockchain technology[J]. Modern Information Technology, 2021, 5(17): 165-168.
- [71] 玄佳兴, 柳旭, 李国民, 等. 基于多链协同区块链的分布式能源交易[J]. 电力建设, 2021, 42(11): 34-43.
XUAN J X, LIU X, LI G M, et al. Distributed energy transaction based on multi-chain collaborative blockchain[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11): 34-43.
- [72] 陈子杰, 沈翔宇, 陈思捷, 等. 基于区块链的分布式能源交易物理-信息仿真平台[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 87-96.
CHEN Z J, SHEN X Y, CHEN S J, et al. Blockchain-based cyber-physical simulation platform for distributed energy trading[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 87-96.
- [73] 沈翔宇, 罗博航, 陈思捷, 等. 能源区块链共识算法性能的评估方法与实证分析: 以分布式能源交易为例[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5113-5126.
SHEN X Y, LUO B H, CHEN S J, et al. An evaluation method and empirical analysis of energy blockchain consensus algorithms: a case study of distributed energy trading[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5113-5126.
- [74] MICHAEL W, GRIEVES. Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises[J]. International Journal of Product Development, 2005, 2(1/2): 71-84.
- [75] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
TAO F, LIU W R, LIU J H, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [76] 房方, 张效宁, 梁栋焯, 等. 面向智能发电的数字孪生技术及其应用模式[J]. 发电技术, 2020, 41(5): 462-470.
FANG F, ZHANG X N, LIANG D Y, et al. Digital twin technology for smart power generation and its application modes[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(5): 462-470.
- [77] 唐文虎, 陈星宇, 钱瞳, 等. 面向智慧能源系统的数字孪生技术及其应用[J]. 中国工程科学, 2020, 22(4): 74-85.
TANG W H, CHEN X Y, QIAN T, et al. Technologies and applications of digital twin for developing smart energy systems[J]. Strategic Study of CAE, 2020, 22(4): 74-85.

- [78] 王成山, 董博, 于浩, 等. 智慧城市综合能源系统数字孪生技术及应用[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1597-1608.
WANG C S, DONG B, YU H, et al. Digital twin technology and its application in the integrated energy system of smart city[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1597-1608.
- [79] 赵鹏, 蒲天骄, 王新迎, 等. 面向能源互联网数字孪生的电力物联网关键技术及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 447-458.
ZHAO P, PU T J, WANG X Y, et al. Key technologies and perspectives of power internet of things facing with digital twins of the energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 447-458.
- [80] 齐波, 张鹏, 张书琦, 等. 数字孪生技术在输变电设备状态评估中的应用现状与发展展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1522-1538.
QI B, ZHANG P, ZHANG S Q, et al. Application status and development prospects of digital twin technology in condition assessment of power transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1522-1538.
- [81] 盛戈峰, 钱勇, 罗林根, 等. 面向新型电力系统的电力设备运行维护关键技术及其应用展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3072-3084.
SHENG G H, QIAN Y, LUO L G, et al. Key technologies and application prospects for operation and maintenance of power equipment in new type power system[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3072-3084.
- [82] 蒲天骄, 陈盛, 赵琦, 等. 能源互联网数字孪生系统框架设计及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(6): 2012-2029.
PU T J, CHEN S, ZHAO Q, et al. Framework design and application prospect for digital twins system of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2012-2029.
- [83] 贺兴, 艾芊, 朱天怡, 等. 数字孪生在电力系统应用中的机遇和挑战[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2009-2019.
HE X, AI Q, ZHU T Y, et al. Opportunities and challenges of the digital twin in power system applications[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2009-2019.
- [84] 沈沉, 曹仟妮, 贾孟硕, 等. 电力系统数字孪生的概

念、特点及应用展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(2): 487-499.

SHEN C, CAO Q N, JIA M S, et al. Concepts, characteristics and prospects of application of digital twin in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 487-499.

- [85] 严兴煜, 高赐威, 陈涛, 等. 数字孪生虚拟电厂系统框架设计及其实践展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 604-619.

YAN X Y, GAO C W, CHEN T, et al. Framework design and application prospect for digital twin virtual power plant system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 604-619.

收稿日期: 2023-03-01。

作者简介:



彭道刚

彭道刚(1977), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为低碳智能发电、综合智慧能源与虚拟电厂等, pengdaogang@126.com;



税纪钧

税纪钧(1999), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为低碳智能发电、虚拟电厂优化运行调度, shuijijun@mail.shiep.edu.cn;



王丹豪

王丹豪(1992), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能发电、综合智慧能源、工业物联网等, danhao.wang@qq.com;



赵慧荣

赵慧荣(1990), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能发电技术、综合能源系统建模与优化控制等, hrzhao@shiep.edu.cn.

(责任编辑 尚彩娟)