

虚拟电厂协同调度及市场交易的研究现状及展望

陶伟健¹, 艾芊², 李晓露¹

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200093; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 随着可再生能源的不断发展, 其分散性、间歇性和波动性的问题也逐渐凸显。针对这些问题, 提出了虚拟电厂这一种新的解决方案。首先介绍了虚拟电厂的基本概念, 并从协调控制技术、优化调度和市场交易3个角度分析虚拟电厂的研究现状。此外还分析了不同优化调度模型及其求解算法的优缺点以及区块链技术在分布式交易方面的优势, 并探讨了区块链技术应用与虚拟电厂交易的可行性。最后展望了虚拟电厂未来的研究方向。

关键词: 虚拟电厂; 分布式控制; 优化调度; 博弈论; 区块链技术

Research Status and Prospects of Collaborative Scheduling and Market Trading of Virtual Power Plants

TAO Weijian¹, AI Qian², LI Xiaolu¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Electric Power University, Shanghai 200093, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the increasing growth of renewable energy sources, their decentralized, intermittent, and volatile characteristics have become prominent challenges. To address these issues, a novel solution called the virtual power plant (VPP) has been proposed. Firstly an overview of VPPs is introduced, the current research status is analyzed from three perspectives: coordinated control technology, optimal scheduling, and market trading. Furthermore, different models and algorithms for optimal scheduling and their advantages and disadvantages are analyzed. The paper also highlights the benefits of blockchain technology in distributed trading and discusses the feasibility of applying blockchain to VPP trading. Finally, future research directions in the field of virtual power plants are prospected.

Key words: virtual power plants; distributed control; optimal scheduling; game theory; blockchain technology

0 引言

在环境污染和能源短缺的形势下, 分布式能源将逐渐替代传统的化石能源。分散的分布式能源难以预测和协调, 可能导致出力的波动和不稳定性。因此, 对电网的安全稳定运行产生了一定的影响, 给电力系统带来了新的挑战和影响^[1]。在电力低碳转型过程中, 分布式能源的开发得到前所未有的重视, 传统的电力调度方式亟需升级。将分散在各地的分布式能源聚合成一个实体为解决上述问题提供了一个可行的思路。

虚拟电厂(virtual power plant, VPP)的概念受到国内外的广泛关注。虚拟电厂采用了先进的信息网络技术将可再生能源、储能系统、柔性负荷等分布式资源整合成一个整体, 并实现其协同调度^[2]。虚拟电厂通过协同控制各种分布式资源可以减少它们接入电网时对电网的冲击, 并促进多种能源的互补, 同时满足电力市场快速发展的需求。与此同时, 虚拟电厂在参与电力市场交易时, 存在隐私、信息安全和分布式电源结算周期较长等问题。针对上述问题, 可以将区块链技术引入到虚拟电厂中, 构建一种以区块链为基础的虚拟电厂的交易模式。这种结合能够利用区块链技术的特性, 保证交易的公开透明和不可篡改性, 并充分发挥虚拟电厂的技术优势, 从而实现更加高效的能源交易。这种创新

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFB2401203)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2021YFB2401203).

性的交易模式为能源市场的发展提供了新的思路。

本文将从虚拟电厂的概念、运行与协调控制、优化调度及基于区块链的市场交易 4 个方面概括虚拟电厂的研究现状。最后,探讨了虚拟电厂未来的研究方向。

1 虚拟电厂的概述

1.1 虚拟电厂的概念定义

随着虚拟电厂的快速发展,学者对虚拟电厂的定义也有许多不同的看法和解释。文献[3]定义了一种电力需求侧管理的新模式:能效电厂,它可以实现与传统发电站和相应的输配电系统同样的目标,同时也可以增加能源利用率,降低用户的功耗。文献[4]把虚拟电厂定义为聚合的分布式能源集群,并参与到电力市场或辅助服务市场。文献[5]认为虚拟电厂不仅包含直接接入电网的分布式发电机组和储能装置,还包括需求侧的可控负荷和电动汽车等分布式资源。这些分布式资源通过一个统一的控制中心进行协调管理,共同参与电网的运行和调节。以上文献的定义均突出了虚拟电厂对多种资源的优化聚集,从而构成一个特殊的发电厂参与到电网的运营。

因此虚拟电厂并不是直接发电,其本质是一套分布式资源管理系统,将电网中大量散落的分布式资源整合起来,通过协同控制参与电力市场,并加入电网调度,实现削峰填谷的目标,同时提供调频、调压、备用等辅助服务,以增强电网的安全性。图 1 为虚拟电厂结构示意图。

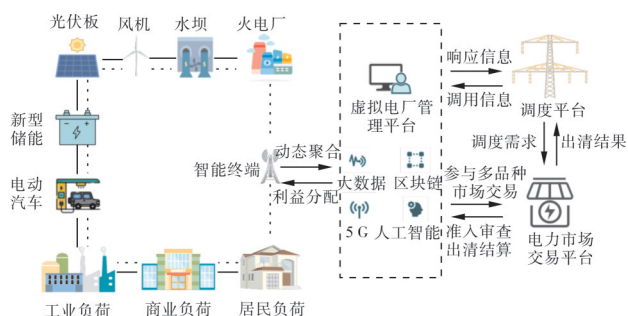


图 1 虚拟电厂的结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of a virtual power plant

1.2 虚拟电厂的管理框架

根据所实现的功能,一般可将虚拟电厂划分为两类:一类是商业型虚拟电厂(commercial VPP,

CVPP),另一类是技术型虚拟电厂(technical VPP, TVPP)[6]。二者的基本运行框架如图 2 所示。

CVPP 主要专注于虚拟电厂在能源市场和辅助服务市场中的交易功能。通过获得分布式能源的运行参数、边际成本、测量和预测等数据,并与电价预测等市场信息相结合,优化投资组合潜在收益,并参加市场竞标。TVPP 更注重虚拟电厂根据系统调度指令直接参与配电网的运行和管理。TVPP 侧重于将虚拟电厂作为一个整体来管理和调度,以满足配电网的运行需求。其重点在于协调和优化分布式资源的使用,以实现系统的稳定性、可靠性和效率[7]。

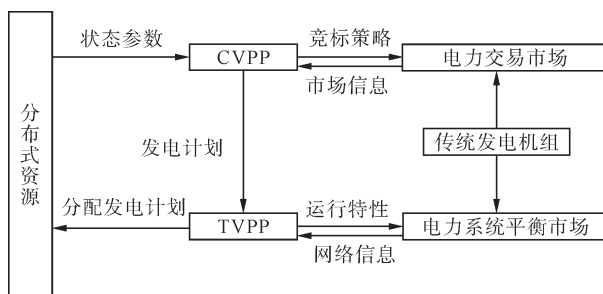


图 2 虚拟电厂的基本运行框架

Fig. 2 Basic operating framework of a virtual power plant

1.3 国内外虚拟电厂的工程项目

1.3.1 国外虚拟电厂的工程项目

虚拟电厂的概念一经提出,便得到多个国家和地区的广泛关注,并开展了一系列的示范项目。在欧洲,对虚拟电厂的应用主要注重研究分布式能源的出力特点和优化调度技术,使分布式资源能够稳定可靠地接入电网并参与市场交易。2005 年欧盟 FENIX 项目是全球首个集成了技术目标和市场目标的虚拟电厂项目,该项目成功地将大量分布式资源聚合成一个大型虚拟电厂[8],开发了可扩展和分层流动的信息和通信架构,证明了欧洲应用虚拟电厂的可行性,为进一步完善现有大型虚拟电厂提供了宝贵的经验和指导。2012 年德国 RWE 虚拟电厂项目借助先进的能源管理系统,有效地协调和管理绿色能源设备,实现了稳定的电力供应,并获得了政府补贴。Next Kraftwerke 成立于 2009 年,是欧洲最大的虚拟电厂运营商之一,提供了全套的虚拟电厂解决方案。该公司的虚拟电厂聚合资源包括沼气电厂、热电联产厂、水电、光伏、电池储能、电动汽车和工业负荷等。截至 2022 年底已成功汇聚了

15 346 个发电机组,总联网容量达 12 294 MW,并继续在欧洲地区推动虚拟电厂的发展。而在美国,更注重对用户侧可控负荷的需求响应,以有效利用负荷来平衡电量的供需^[9],相关政策也为虚拟电厂的发展提供了良好的环境,并且在相关法规的保障下,虚拟电厂已经成为管理分布式电源和实施负荷响应的重要解决方案。2016 年特斯拉与佛蒙特州公用事业公司合作开展虚拟电厂项目,该项目为客户提供了优惠价格和补贴以换取客户部分电力使用权。2018 年,特斯拉还宣布与南澳大利亚州政府合作,建设世界上最大的虚拟电厂。此外,2022 年加州公共事业公司 PG&E 与特斯拉合作开展了紧急减负荷计划,通过虚拟电厂的方式减少电网在需求高峰时期的发电需求。拥有 Powerwall 的 PG&E 客户可以自愿选择通过特斯拉的应用程序注册加入,在电网用电紧急高峰时期参与调度。通过聚合廉价的绿色能源,虚拟电厂有效地替代了昂贵的燃气火电,从而获得收益。最后,日本作为亚洲最早实施虚拟电厂概念的国家之一,政府也明确提出了推广虚拟电厂(VPP)的政策措施,并于 2016 年制定了示范项目计划,以推动虚拟电厂技术的商业化发展。

1.3.2 国内虚拟电厂的工程项目

如表 1 所示,近年来,中国多个省份积极推进虚拟电厂示范项目,通过政府引导和市场化运营模式的创新,为虚拟电厂的快速发展注入新动力。2016 年,上海黄浦区启动了商业建筑虚拟电厂示范项目,使其成为负荷类型最为丰富、填谷负荷比重最大的地区之一。该项目将商业建筑纳入虚拟电厂节点,以通过调节负荷来确保电力系统的安全运行。然而,由于每个商业建筑的运营模式和能耗特征各异,虚拟电厂的管理和协调可能会面临更大的复杂性挑战。同时,冀北地区在 2019 年也推进了虚拟电厂项目,重点参与调峰为主的辅助服务市场,以促进可再生能源的有效消纳。该项目采取完全市场化运营模式,在夏季,约有 600 MW 的空调负荷通过虚拟电厂参与实时响应。与此同时,完全市场化的运营也可能导致激烈的市场竞争,参与者之间的竞争可能会对虚拟电厂的盈利能力产生一定的影响。2021 年,南方电网在广东投入运营了首个市级虚拟电厂,首次实现实时负荷响应和邀约响应功能,精准缓解区域性电力供应紧张。市级虚拟电厂作为较新的概念和技术,需要广泛吸引不同类型

用户的参与,因此需要克服潜在的参与门槛和用户意愿的限制。浙江省也进行了虚拟电厂试点项目,其中丽水绿色能源虚拟电厂由全市境内 800 多座水电站组成,可参与辅助电网调峰工作。另外,平湖虚拟电厂接入的 10 个用户精准提供调峰调频调压等辅助服务市场,合计容量为 15.7 MW。这些示范项目为中国虚拟电厂的发展提供了宝贵经验,通过不断的市场化探索和创新,虚拟电厂有望在未来迅速壮大,为中国能源转型和智能电网建设带来了新机遇。

表 1 国内虚拟电厂工程项目

Tab. 1 Domestic virtual power plant engineering projects

地区	主要场景	聚合资源类型	特点
上海	商业楼宇能源管理、削峰填谷	商业楼宇、5G 基站等	以商业楼宇为主的虚拟电厂体系
冀北	新能源消纳、需求响应	可调节工商业、电采暖、智能家居等	多主体参与调峰辅助服务市场
广东	邀约响应、实时响应	负荷型、储能型资源	实时需求响应
浙江	需求响应、削峰填谷、调频调压	储能型资源、充电桩、居民负荷等	国内单次响应体量最大

综上所述,相比于国外,我国在虚拟电厂领域仍存在较大差距。一方面,国外拥有更为丰富的资源类型,而国内主要依赖于负荷侧资源,种类相对单一,难以实现规模效益的形成,应在技术突破的基础上从负荷侧逐步过渡到聚合源侧资源上;另一方面,国外的虚拟电厂在能量市场和辅助服务市场方面更加成熟,具备成熟的商业模式。目前,国内的虚拟电厂发展尚处于初级阶段,尚未建立完善的全面解决方案,主要以试点示范为主。同时,管理体系和市场激励机制也需要进一步完善。

2 虚拟电厂的运行控制方式

根据虚拟电厂的运行特性和目前的发展现状,可以将虚拟电厂的运行控制方式分为 3 种:集中控制、集中-分散控制和完全分散控制^[10]。其中,集中控制方式是指所有的控制操作都由一个中心控制系统完成;集中-分散控制方式则是在中心控制系统的基础上,分配一部分控制权给各个组成单位的本地控制系统;完全分散控制方式则是所有的控制权都交由各个组成单位的本地控制系统独立完成。

2.1 集中控制方式

集中控制运行方式要求建立一个集中的控制协调中心(control coordination center, CCC),该中心具备获取各个单位信息的能力。这使得 CCC 能够对各单元进行管理,并根据不同的优化目标进行操作,如成本最小化、利润最大化以及碳排放最小化等。其控制方式如图 3 所示。

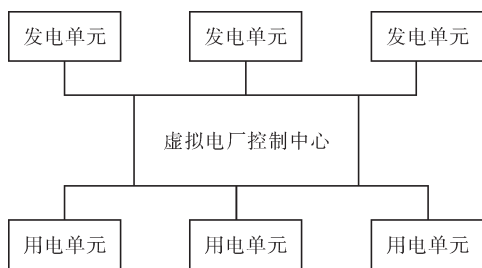


图 3 虚拟电厂的集中控制方式

Fig. 3 Centralized control mode of virtual power plants

文献[11]中虚拟电厂通过一个运行控制中心对内部资源采用集中控制方式进行统一调度和管理,这种集中控制方式可以实现虚拟电厂内各个能源设备之间的协同运作,提高能源的利用效率和经济性。文献[12]中虚拟电厂通过集中控制系统对包含电动汽车和风电机组在内的多个分散式资源进行协调管理,并通过集中控制电动汽车来平抑风电的波动性。文献[13]中将分布式发电系统、储能系统、需求响应项目通过集中控制方式参与电力交易市场。文献[14]提出一种基于多目标优化的虚拟电厂集中控制算法,并将其应用于虚拟电厂的控制和运营。

但是这种控制方式的兼容性比较差,基本不可以拓展,并且容易受到单点故障的影响,一旦控制中心出现故障,整个系统就无法运行^[15]。这种方式对通信带宽的要求较高,同时也容易出现通信延迟和瓶颈问题,难以适应高渗透率可再生能源的虚拟电厂的运行需求^[16],由此可知,未来的研究和发展应该着重解决这些问题,以提高集中控制方式的虚拟电厂的通信性能和可靠性。

2.2 集中-分散控制方式

在分散控制中,虚拟发电厂被划分为两个层级,即总控制中心和本地控制中心。总控制中心的职责是对任务进行优化调度,并将任务分配给不同的本地控制中心。总控制中心的重点是对能量进行优化调度,以满足市场规则 and 用户需求,提高系统

的效率。本地控制中心的职责是制定本区域内单元的发电或用电的具体方案,并将相关信息传递给总控制中心。相对于集中控制,这种控制的方法将中央控制中心分解为不同的层级,每个层级担负不同的任务,实现不同的功能,这种控制方法有利于减轻通讯系统的负担。其控制方式如图 4 所示。

文献[17]将热电联产系统、锅炉系统、储能系统通过集中-分散控制进行聚合管理,每个发电机都由一个本地控制器进行控制。这些本地控制器之间通过一个集中控制器使用 MPC 技术进行协调,使得整个系统的效率最大化。集中控制器通过收集每个本地控制器的信息,可以实时地优化系统的运行,实现全局最优解,从而使得可再生能源和热电联产的最大化利用。文献[18]中把小型的可控机组加入到虚拟电厂,通过集中-分散控制方式实现虚拟电厂的高效协同,使得虚拟电厂的输出功率可以根据市场需求进行调节,从而参与到电力市场中去。

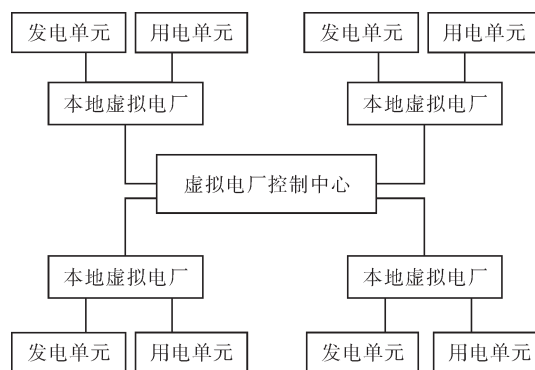


图 4 虚拟电厂的集中-分散控制方式

Fig. 4 Central-decentralized control of virtual power plants

由此可见,在集中-分散控制方式下系统的决策和控制操作由控制中心负责,但分散部分的执行器和传感器可通过分散的控制器连接到控制中心。该控制方式可以缓解单点故障的问题,并且能够利用分散控制器实现控制指令的分解化和并行化,从而减轻通信负荷并降低通信延迟。极大改进了目前在集中控制模式下存在的通讯阻塞以及系统兼容性不佳等问题。然而,该控制方式仍存在一些中心化的问题,无法根本解决集中控制中心不够可靠等问题,仍需要进一步的改进和优化。

2.3 完全分散控制方式

完全分散控制方式基于多智能体一致性理论将

虚拟电厂划分为相互独立的自治智能子单元,形成分布式多智能体系统。这些子单元通过通信网络传递一致性变量,但不受数据交换与处理中心的控制。相反,它们仅接收相关信息并独立地进行本地决策计算以管理自身的运行状态。其控制方式如图 5 所示。

在多代理结构的基础上,文献[19]构建了一个虚拟电厂完全分散控制方式的调度模型,实现了最大化的使用效率和灵活性。

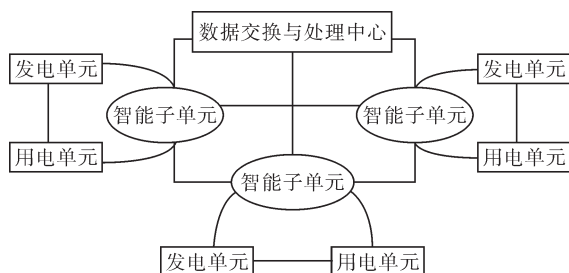


图 5 虚拟电厂的完全分散控制方式

Fig. 5 Fully decentralized control of virtual power plants

由此可见,虚拟电厂采用完全分散的控制方式,无需中心化机构的支持,可以支持高比例的分布式资源自由接入,这种分布式控制方式将成为虚拟电厂的主流趋势。随着信息采集节点和数据量规模化拓展,有限的物理通信基础设施难以应对低时延、高可靠、高频次、高并发的信息采集、传输和利用带来的技术挑战。此外,分散控制下的数据安全和隐私保护也是需要重点关注的问题,以防止恶意操作和数据泄露。区块链技术的出现可以解决虚拟电厂完全分散控制方式中的一些问题。因此,为了进一步提升虚拟电厂协调控制的效率与安全性,如何将两者相结合实现虚拟电厂多层次多主体的分层控制架构是未来的研究方向之一。

3 虚拟电厂的优化调度策略

3.1 目标函数与约束条件

虚拟电厂通过协调控制手段聚合了发电机组、可再生能源、储能系统和各种考虑特定目标函数的柔性负荷。为了达到供需平衡,需要建立一种合理的优化调度模型,并创建相应的目标函数。同时,为了满足电力市场的要求和保证系统的可靠性,调度模型还需考虑一系列关于能量平衡和技术限制的约束条件。

虚拟电厂的优化调度模型中目标函数可分为经济性和技术性两种类型^[20]。经济目标函数主要考虑运行成本和运行利润,例如追求最小化运行成本或最大化收益;技术性目标包括稳定性、可靠性、电能质量和安全性^[21]。文献[22]考虑了负荷跟踪偏差等技术性目标,通过采用“刺激-反馈”控制机制实现虚拟电厂的自适应在线负荷跟踪控制。该机制可以根据负荷情况进行实时调整,以确保负荷跟踪的精确性和稳定性。另有一些文献中建立了同时考虑经济性和技术性目标的 VPP 多目标优化调度模型。图 6 展示了有关经济目标函数的组成部分。图 7 展示了虚拟电厂在能源市场中的不同约束条件,这些约束条件涉及 VPP 的最佳运行。主要包括:供需平衡约束,各种设备和需求响应的运行约束、储能的充放电平衡约束、电网运行约束。

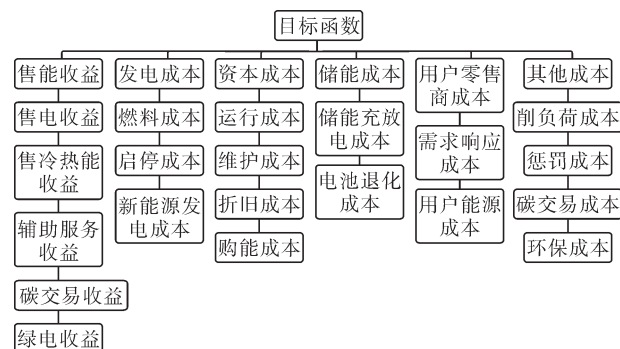


图 6 目标函数

Fig. 6 Objective function

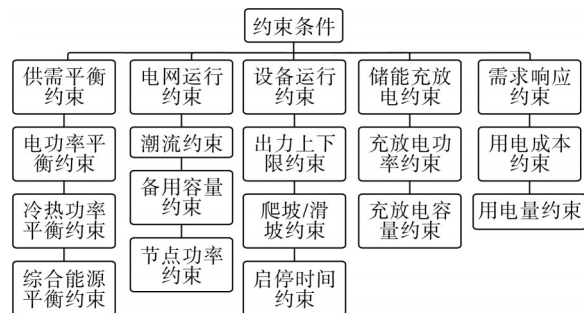


图 7 约束条件

Fig. 7 Constraints

当前,虚拟电厂的优化调度研究还相对简单,仍存在不足之处。在虚拟电厂的优化调度中,除了经济性指标还应考虑更多约束条件,如碳排放、线路阻塞和电压安全等,在保证配电网安全的同时使虚拟电厂能够在经济性和环境可持续性之间找到平衡,实现双碳目标。

3.2 优化调度问题的分类与求解算法

根据变量类型(整数或连续)和约束条件类型(线性或非线性), 可以把优化问题分为四类: 线性规划问题、混合整数线性规划问题、非线性规划问题、混合整数非线性规划问题。

线性规划作为一种优化调度模型, 具有模型简单和求解快速的优点, 因为其目标函数和约束条件均为线性形式。然而, 在某些情况下, 优化模型涉及到储能系统的充放电状态, 需要引入整数变量, 从而需要构建混合整数线性规划模型。对于这种模型, 可以通过使用带有高效求解器的软件轻松获得最优解。然而, 在一些文献中, 优化模型引入了非线性约束条件, 增加了求解的难度。由于无法保证模型的凸性, 这会进一步加大问题的复杂性。在解决这类问题时, 首先需要利用 Karush-Kuhn-Tucker 最优性条件和对偶理论将其转化为混合整数线性模型。接着, 可以运用线性规划和整数规划技术对该模型进行求解以得到满足约束条件的最优解。这种转化方法不仅能够降低问题的复杂性, 而且为后续的优化过程打下了坚实的基础。此外, 其他文献中将模型表述为具有整数变量和非线性约束的形式, 使问题变为难以求解的混合整数非线性模型。由于这些问题涉及到非线性因素, 通常是非凸的, 这意味着可能存在多个局部解, 无法保证获得全局最优解。

多层规划模型将问题分为多个层次, 每个层次包含不同的决策变量和约束条件, 可以针对特定的问题进行建模和求解。这种模型能够更好地模拟现实问题的复杂性。文献[33]中提出了一种双层优化模型, 用于虚拟电厂与用户之间的协同优化, 上层目标函数旨在最大化虚拟电厂的净收益, 而下层目标函数则旨在最小化用户侧的购电成本, 并验证了该模型能够有效减少虚拟电厂的投标偏差。文献[35]以虚拟电厂的运营收益最大, 同时使系统的运营费用和弃能费用最小为目标, 构建了一个多目标的优化调度模型。

表2总结了虚拟电厂优化调度模型的优缺点。

求解虚拟电厂的优化调度模型方法主要分为数学方法和启发式方法。其中数学方式可以保证收敛到最优解, 以内点法、点估计、列生成、交替方向乘法、分支限界法等为代表。而启发式方法的目标是得到一个特定的结果, 该问题通过大量的实验

表2 优化调度模型的优缺点

Tab. 2 Advantages and disadvantages of optimized scheduling

model			
参考 文献	求解模型	优点	缺点
文献 [23-24]	线性 规划	模型简单, 求解快速	目标函数和约束条件是线性的, 无法考虑不确定因素
文献 [25-26]	混合整 数线性 规划	引入了离散决策的能力	当决策变量的整数约束引入后, 问题变得更加复杂, 求解难度增加
文献 [27-29]	非线性 规划	可以更好地处理目标函数和约束条件中包含非线性关系的问题, 接近实际情况	对于复杂的非线性问题, 求解困难, 没有通用的高效算法适用于所有问题
文献 [30-32]	混合整 数非线性 规划	提供更灵活的决策空间, 可以考虑更多因素和变量的相互影响, 更接近实际情况	求解时间最长, 求解难度最大, 无法保证全局最优解
文献 [33-34]	多层 规划	将问题分层处理, 更好地模拟现实问题的复杂性	求解过程复杂, 需要处理多个层次的决策变量和约束条件
文献 [35]	多目标 规划	考虑多个决策目标, 提供多个可行解的选择	解的选择相对主观, 需要决策者对其进行偏好分析和权衡

来测试, 在求解精度和计算成本及速度之间进行权衡。虽然不能保证最终求解结果为最优解, 但与数学方法相比, 计算负担减少。启发式方式主要包括遗传算法^[36]、粒子群算法^[37]等。总的来说, 数学方法和启发式方法都可以用来求解虚拟电厂优化调度模型, 但需要根据实际问题的特点和要求选择合适的方法。几种典型的应用于虚拟电厂优化模型的求解算法的优缺点归纳如表3所示。

未来需要致力于开发更准确、更高效的虚拟电厂优化调控模型。还需要利用机器学习、深度学习和智能算法等技术, 实现面向分布式优化、复杂模型的高效求解算法, 改进模型的精度和提升迭代式算法的求解速度, 以更好地应对虚拟电厂的复杂性和实时性要求。

3.3 基于不确定性处理的优化调度

随着全球低碳经济和能源革命的推进, 各国都致力于实现“碳中和”和“碳达峰”的目标^[38]。在这一背景下, 绿色和低碳的新兴发电形式, 特别是装机容量最大的风力发电和光伏发电, 已成为各国能源

表 3 求解算法的优缺点

Tab. 3 Advantages and disadvantages of solving algorithms

求解算法	优点	缺点
内点法	对于线性规划和非线性规划问题,具有较好的收敛性和求解效率	可能需要迭代较多次才能找到最优解
点估计	简单易懂,计算方便;可以从样本数据中获得总体参数的估计值	估计结果可能存在一定的误差,尤其是在样本容量较小或数据不满足某些分布假设;无法提供参数估计的置信区间和可信区间等信息
数学方法	列生成	可以处理大规模优化问题,减少计算复杂度;在每一次迭代中,只需要求解一部分子问题,提高了计算效率;可以根据问题的特点灵活生成变量
交替方向乘子法	适用于求解凸优化问题,具有较好的收敛性;可以通过并行计算来加速求解过程	对于某些问题,需要迭代较多次才能找到最优解;需要设计合适的变量生成策略
分支限界法	能够找到全局最优解;可以应用于各种模型;可以有效减少搜索空间	对于非凸问题,无法保证收敛到全局最优解;在每个子问题中需要选择适当的步长和停止准则
启发式方法	遗传算法	可以将问题转化为适合遗传算法处理的数学模型;交叉和变异算子对结果影响较大
粒子群算法	可以应用于各种复杂问题,具有较好的全局搜索能力;并行计算能力较强,适用于处理大规模问题	对于大规模问题,可能需要搜索大量的解空间;需要设计合适的上下界限定方法才能提高求解效率。
		收敛速度较慢;参数设置对算法的性能和搜索结果有较大的影响

供应的重要组成部分^[39]。考虑到风力、光伏等可再生能源的波动性和不确定性对电网运行的不利影响,针对其出力的不确定性,选择合适的调度方法尤为关键。如图 8 所示,为了解决这一问题,随机规划和鲁棒优化是最常用的方法^[40]。这些方法旨在有效处理风力、光伏等可再生能源的出力波动性和不确定性,以确保电网的稳定运行。

随机规划通过随机变量来描述不确定信息,假

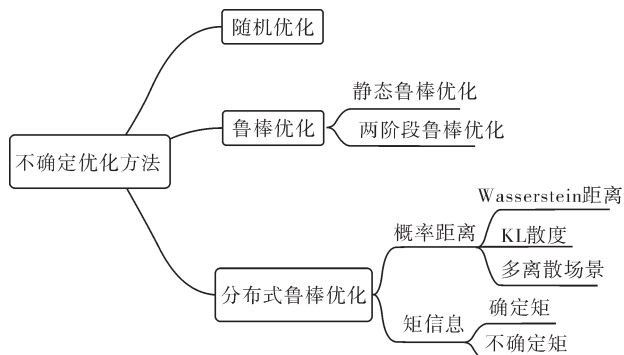


图 8 处理不确定性的优化方式

Fig. 8 An optimal way to deal with uncertainty

定参数服从一个分布,从而得到最优目标的调度方式。文献[41]将风电成本通过概率的方法来表达出来,并建立虚拟电厂的期望值优化模型。文献[42]则提出了一种基于机会约束规划的虚拟电厂经济调度模型,该模型考虑了风光发电波动的不确定因素,利用旋转备用约束以一定置信水平进行设置,以平衡决策方案中的风险和经济效益。文献[43]建立了基于机会约束规划的多时间尺度优化模型。文献[44]通过随机规划法处理风电出力的不确定性。

随机规划是一种利用随机变量来描述参数的概率分布,从而生成多个随机场景^[45]。但是由于确定性概率曲线的生成可能不够精确,这种方法可能无法完全反映实际情况。相比之下,鲁棒优化通过使用不确定集合来代替随机变量的确切概率分布,可以在最坏情况下得到系统的最优调度方案,更加符合实际工程需求^[46]。文献[47]针对风电出力预测精度较低的情况,采用鲁棒优化方式处理风电出力的不确定性,通过调节鲁棒系数决策出不同程度上抑制不确定性影响的优化调度方式。文献[48]提出了一种两阶段鲁棒优化模型,相比于传统的鲁棒优化方法,该模型可以根据实际情况灵活调节参数的大小,从而显著提高系统的鲁棒性和经济性。分布鲁棒优化方式相比于传统鲁棒优化方式可通过数据驱动的方式降低模型的保守性。可以分为基于概率距离和矩信息两类^[45]。文献[49]采用基于 Wasserstein 距离的分布鲁棒方式对风光不确定性进行处理,并利用对偶转换和数据驱动方法将该模型转换为单层模型来求解。文献[50]在此基础上采用含电转气的耦合能源系统并引入条件风险价值和分布式鲁棒优化方法相结合的方式处理不确定性。还有研究通过研究引入储能系统来解决分布式电源的波动性问

题,文献[51]提出了一种利用电动汽车储能系统缓解可再生能源发电技术带来不确定性的方法。通过电动汽车的储能系统,可以使得多余的能量存储在电动汽车电池中,以便在需要时释放回电网以满足需求峰值。文献[52]则是通过柔性负荷的快速响应特点来处理风光发电的不确定性问题。

根据现有情况,目前的风光不确定性建模研究主要以模型驱动为主。然而,未来的发展趋势可能会更多地依赖基于人工智能算法的数据驱动技术,将这两种方法结合起来将成为未来风光不确定性建模研究的热门方向。这种综合方法将能够更好地应对风光不确定性带来的挑战,提高风光电力系统的性能和效益。

3.4 基于博弈论的优化调度

在快速发展的电力市场下,为了更好地符合实际情况,配电网需要同时整合多个虚拟电厂。因此,虚拟电厂之间就会存在竞争或者合作关系,整合自身资源参与市场竞争时,必须充分考虑其他竞争者的出价策略对自身的影响。所以针对虚拟电厂群的外部优化调度的研究显得尤为重要。通常采用博弈论来描述虚拟电厂集群参与电网优化调度过程。目前研究多VPP之间的博弈问题的方法主要有两种:合作博弈以及非合作博弈^[53]。

合作博弈是指一些参与者互相合作完成目标,获得最大利益,然后再将利益在内部进行分配,本质还是一个收益分配问题^[54]。文献[55]提出了一种基于合作博弈的虚拟电厂群优化调度方法,并引入功率偏差惩罚机制,在一定程度上减轻了虚拟电厂功率出现偏差的影响。文献[56]采用联盟博弈方式实现各主体的利益最大化,并通过Shapley值分配联盟内各成员的收益。然而联盟博弈只能保证联盟内部的收益,可能会出现非全局最优化的缺陷。文献[57]引入纳什谈判克服了联盟博弈的缺陷,建立了基于纳什谈判的多能VPP群优化运行模型,根据均值不等式将主问题分解成两个子问题,并采用交替方向乘法保障VPP之间的隐私问题。

非合作博弈研究了参与者在博弈过程中仅关注自身利益而忽略他人利益的情况下^[58],如何做出策略选择以获得最大收益。在这种情况下,参与者制定策略时只考虑个人利益,而不考虑合作的可能性。文献[59]通过非合作博弈竞价对多虚拟电厂进行经济调度,并利用改变步长的方式找到纳什均衡

点,得到各虚拟电厂的最优报价。文献[60]提出了一种能源共享的运营机制,该机制基于Stackelberg博弈理论,并构建了一个非合作博弈模型。该模型采用分层思想,上层领导者的目标是实现利润最大化,而下层跟随者则追求效用与成本的平衡。为了求解该模型达到均衡的最优解,文中采用了分布式算法。在实际电网调度过程中,博弈双方往往不会共享全部信息,故需要引入非完全信息博弈理论来分析优化调度问题。文献[61]提出了一种基于贝叶斯博弈的虚拟电厂多主体协同优化模型。

综上,博弈论方法在虚拟电厂经济调度领域已经得到了广泛应用。但在兼顾虚拟电厂安全性和经济性两方面的博弈方法研究相对初步,需开展研究设计出合适的安全约束条件和经济目标函数,并在博弈模型中进行权衡和优化。此外,在未来逐渐开放的电力市场环境下,各市场参与主体之间可能存在着不同的利益诉求,既有合作的潜在可能,也存在着竞争和利益冲突的情况。如何将合作博弈和非合作博弈相结合可能成为未来研究的重要方向之一。

4 基于区块链技术的虚拟电厂交易模式

4.1 虚拟电厂参与电力市场的交易模式

随着智能电网的快速发展,电力市场正朝着开放化的方向迈进,相关的交易机制也在不断完善。虚拟电厂利用先进的通信技术,将大量分布式资源进行聚合调度。虚拟电厂具备迅速响应市场电价和负荷需求变化的能力,这对于推动电力市场自由化、增强市场的灵活性、优化电网运营以及引导用户进行负荷调峰和频率调控等方面具有重要作用^[62]。

虚拟电厂可以参与电能量市场和辅助服务市场^[63]。其交易流程如图9所示。首先,虚拟电厂对内部的分布式资源进行日前优化,并根据优化结果制定竞价计划,参与市场竞争。在市场出清后,根据调度指令执行日前计划。接下来,在实时市场中,虚拟电厂根据各分布式资源的实时预测出力重新制定竞标策略。平衡市场在实时市场出清后启动,并用于消纳剩余的不平衡电量。最终,交易完成后进行结算,或重新选择供应商进行交易。这样的交易流程能够实现电力市场的协调与平衡,确保电力供需的可靠性和效益^[64]。

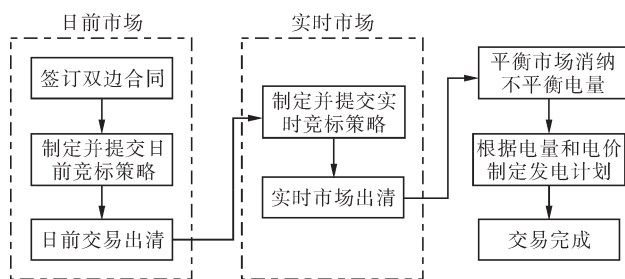


图 9 VPP 参与电力市场交易流程图

Fig. 9 Flow chart of VPP participation in electricity market trading

4.2 区块链技术下的虚拟电厂交易模式

区块链最早的概念来自于数字货币领域，它的本质是利用现代加密技术将共识机制确认的区块按时间序列叠加而成的一种分布式账本^[65]。区块链是一种独特的数据结构，它由按照时间顺序链接的加密区块组成。每个区块由区块体和区块头两个部分构成^[66]。这种组织方式赋予了区块链技术多项独特特点，包括去中心化、开放透明、安全性以及智能合约等^[67]。

传统虚拟电厂采用中心化模式，存在交易结算和信息安全等方面的问题^[68]。其中，交易结算由运行中心负责，这可能会导致在处理复杂交易时结算周期较长。此外，虚拟电厂的利益分配机制不公开，这会导致分布式能源的收益下降，同时交易过程中的信用成本也会增加。虚拟电厂还缺乏安全可靠的信息系统，存在信息隐私和安全问题，如果黑客入侵该系统，会导致关键数据的非授权获取和恶意篡改。区块链技术应用于虚拟电厂的分布式交易中，可以保证各分布式电源得到公平公正的信息，保证安全可靠的交易。虚拟电厂与区块链主要有如下契合点。

1) 去中心化：虚拟电厂在其发展过程中，控制结构逐渐从集中控制方式向完全分散控制方式演化，而区块链通过共识算法实现去中心化，确保内部节点协调工作，共同完成任务。在区块链中，各个区块具有相同的权利和义务，共同协作以维护整个系统的稳定运行，这与虚拟电厂内部分布式资源的分散布局、个体之间的协同互补以及平等参与电网调度的特性相契合。

2) 开放透明：区块链技术可以构建一个去中心化的信任机制，使得电力数据和交易方私有信息被加密上链。区块链技术还可以实现电力系统的精细

化管理，通过记录每笔电的输、发、配、送等环节，为每度电构建数字映射，可以为大数据和人工智能提供可信的数据源。这样一来，可以更准确地监测和管理电力系统，优化能源分配和使用，提高系统的效率和可靠性。

3) 安全交易：区块链本身具有金融属性，可以参与到电网各环节的出清结算。区块链的加密技术和分布式存储可以提高交易的安全性，减少数据篡改和信息泄露的风险。通过区块链，参与方可以直接进行点对点交易，并且所有的交易记录都可以被公开和验证。

4) 智能合约：智能合约是一种基于区块链的自动化合约机制，可以确保交易的合规性、合法性和有效性。通过智能合约，可以对电力交易过程中的每个合同实现全生命周期管理。这样一来，权益和价值的转移可以自动化进行，减少了中间环节和纸质文件的需求，提高了交易的速度和效率。

基于区块链技术的虚拟电厂交易模式主要包括两方面。一方面，区块链技术为多虚拟电厂和传统发电厂构建了公开透明的交易平台，各电厂将电价和电量等信息上传至区块链，激励电厂降低成本，促进市场竞争，使资源得到更加合理、公平地分配。另一方面，虚拟电厂内部的分布式能源与负荷之间可以实现点对点交易，区块链技术的共识机制保证信息公开透明，各分布式资源通过智能合约实现灵活交易和自动结算，虚拟电厂运营商和产消者之间实现双向选择过程。区块链技术的不断发展，为分布式能源交易带来了更多的公正和安全保障。

如图 10 所示，基于区块链技术的虚拟电厂分布式交易平台采用了区块链去中心化、共识算法、智能合约和安全机制等关键技术特点，以实现市场主体管理^[69]、分布式交易^[70]、用电溯源管理^[71]和信用评估管理^[72]等功能。该平台通过虚拟电厂的聚合，将分布式交易主体纳入其中，包括个人用户、能源供应商和储能设备提供商等。利用跨链技术，建立主侧链结构的虚拟电厂能源交易机制，将虚拟电厂业务区块链分为主链与多个侧链，采用简单支付验证模式进行双向锚定，以实现信息交互。电网公司负责维护主链，记录各种互动情况和交互协议的完成情况，以确保整体交易数据的一致性和安全性。侧链由一个或多个虚拟电厂及其下属需求侧资源组成，实现侧链内部的投标、竞价、交割、结算

等环节。侧链也允许针对特定场景需求进行优化和扩展。通过将主链与侧链相结合的区块链治理结构,确保了能源交易在不同的场景需求下都能实现灵活高效的处理,从而使能源交易平台能够满足不同参与者的需求。此外,平台参与主体还包括交易中心、营销中心和调度机构,作为可信中心机构保障电网运行安全。通过区块链的透明性和不可篡改性,以及智能合约的自动化执行能力,该平台能够实现可靠的能源交易和管理,为能源市场的发展提供了新的机遇。

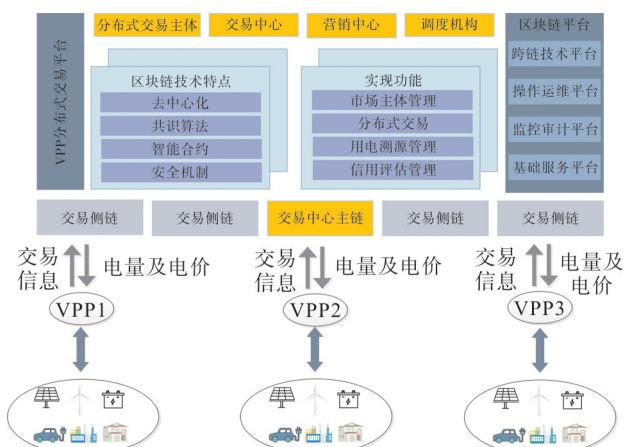


图 10 基于区块链技术的虚拟电厂分布式交易平台

Fig. 10 VPP distributed trading platform based on blockchain technology

目前,针对基于区块链的电力市场交易模式的理论研究和设计,主要集中在研究交易双方的点对点交易和有中间拍卖商介入的集中出清交易两方面。图 11 为两种交易模式的框架。

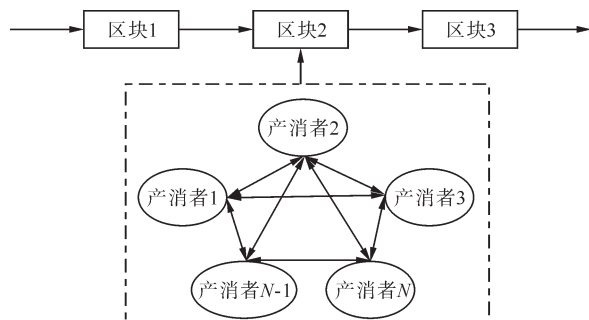


图 11 点对点交易

Fig. 11 Peer-to-peer trading

点对点交易模式利用了区块链的去中心化和去信任化特性,使得交易过程中不存在中心节点,交易平台不参与买卖双方的议价,仅仅起到记录交易

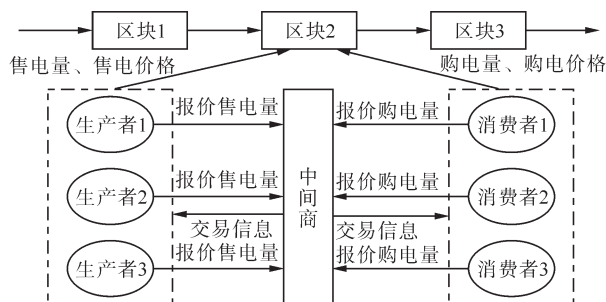


图 12 集中出清交易

Fig. 12 Concentrated clearing transactions

的作用^[73]。这种交易方式极大地提高了交易的安全性,保障了买卖双方的利益。文献[74]设计了一种基于区块链技术下对微网交易模型进行优化的方法。如何在虚拟电厂参与电力市场交易中利用区块链技术,已经成为新的研究热点。文献[75]建立了基于点对点交易机制的日前、实时市场交易模型,在日前市场中实现虚拟电厂内部分布式电源的点对点交易,在实时市场中通过VCG拍卖机制实现虚拟电厂之间的点对点交易。文献[76]讨论了基于区块链技术的多虚拟电厂主从博弈的优化运行方式,将资产链、商业链和技术链的交互过程编写成智能合约,通过GA-QP的边缘计算方式提高计算速度。

集中出清交易方式通过去中心化交易平台集中双方的报价和需求,公开透明地进行一次或多次报价协调,以保护参与双方的利益。这种方式可以采用两种报价方式:集合竞价和连续双向拍卖^[67]。

集合竞价是一种竞价模式,它以“价格先行,时间先行”为准则,允许参与者在收集竞价信息之前,通过比较竞价者的报价和需求量,从而做出最终的价格决策。如文献[77]提出了基于区块链的分布市场交易平台,支持买卖双方进行双边贸易,以便实现对可再生能源的实时消纳。连续双向拍卖是多次报价协调双方,在保障交易安全隐私性的同时,达到目标最优的连续双边拍卖;并在频繁价格波动中,可在单向违约时,有效保证另一方利益不受损^[78]。文献[79]中基于区块链技术,实现了对交易双方的实时监控,并采用自适应进取性策略,以便根据市场变化及成交价格的波动,给出最优的报价。这种交易模式提高了交易效率和资源利用率,促进了能源市场的发展。

无论是点对点交易还是集中出清交易,都可以

利用区块链技术来确保交易的安全性、透明性和可信度。区块链的特性,如去中心化、不可篡改性、可追溯和智能合约的自动执行,可以为交易提供可靠的基础。两种交易方式都旨在提高电力市场的效率和灵活性。点对点交易通过去除中间环节,降低交易成本和复杂性,提供更快速、高效和个性化的能源交易。而集中出清交易通过中心机构的协调和管理,提供公平、公正和透明的交易环境,并促进市场的竞争和合作。

目前,虚拟电厂的交易模式的研究主要专注于虚拟电厂在单一市场中的参与,例如能量市场或辅助服务市场。然而,未来的发展需要建立适应虚拟电厂参与多个交易品种和多个时间尺度的市场交易体系。这意味着虚拟电厂应该能够灵活参与不同类型的市场交易,如能量市场、辅助服务市场、需求响应交易等,并且可以根据实际情况进行合理的资源配置和交易决策。在交易技术方面,引入基于区块链的可信交易技术对于虚拟电厂的市场化交易具有重要意义。通过利用区块链技术,可以建立开放透明、可溯源的交易过程,并通过智能合约技术可以实现虚拟电厂参与能量和辅助服务市场的联合交易出清与结算机制。这将提高交易的可信度和安全性,降低交易成本,并促进虚拟电厂的参与和交易效率。

5 结语

本文探讨了虚拟电厂在协同调度和参与电力市场的应用,在协调控制方面,比较分析了集中控制、集中-分散控制和完全分散控制3种不同的控制方式的优缺点。在优化调度方面,主要对比分析了虚拟电厂优化调度模型以及求解算法的优缺点,并总结归纳了基于不确定性处理、博弈论在优化调度方向的应用。在参与电力市场方面讨论了基于区块链技术的虚拟电厂分布式交易方式。随着VPP的研究不断深入,有待研究的热点问题主要分为以下两个方面。

在优化协同调控方面,首先需要使用先进的数据分析和人工智能技术,建立更准确的负荷预测和优化模型。此外,虚拟电厂需要实现多种能源形式的协同优化,包括电能、新能源和氢气等,构建虚拟电厂多类型规模化资源聚合模型,并充分利用各种能源的优势并提高能源的整体效益。建立虚拟电

厂参与能量和辅助服务市场的多层级优化控制方式。未来,虚拟电厂除了具备本地自治能力外,还应具备区域规模化自治能力,因此需要提高完全分布式控制方式的多智能体之间的协调能力。

未来分布式发电市场化后,电力市场交易需要一个点对点、公开透明、安全可信的交易环境,基于区块链技术的交易体系具有良好的可信性和安全性,其分布式特性和去中心化特点可以有效保护数据的安全性。未来,可以通过引入更多的优化算法和智能合约等技术,提高交易效率,降低交易成本。此外,区块链技术的应用还可以进一步加强数据的安全保障,实现交易数据可验证但不可见,防止数据被篡改和泄露,提高虚拟电厂交易的可信性和稳定性。随着区块链技术的不断发展和完善,需要将区块链技术和分布式交易进行深度融合,实现参与主体对等,交易透明,安全互助的效果。因此,未来基于区块链技术的虚拟电厂可信交易将迎来更加广阔的发展前景和应用场景。

参考文献

- [1] 廖怀庆,刘东,黄玉辉,等.考虑新能源发电与储能装置接入的智能电网转供能力分析[J].中国电机工程学报,2012,32(16):9-16.
LIAO Huaiqing, LIU Dong, HUANG Yuhui, et al. Smart grid power transfer capability analysis considering integrated renewable energy resources and energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 9-16.
- [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] 王丹,范孟华,贾宏杰.考虑用户舒适约束的家居温控负荷需求响应和能效电厂建模[J].中国电机工程学报,2014,34(13):2071-2077.
WANG Dan, FAN Menghua, JIA Hongjie. User comfort constraint demand response for residential thermostatically-controlled loads and efficient power plant modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2071-2077.
- [4] 王宣元,刘敦楠,刘蓁,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 Dunnann, 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.
- [5] 徐峰,何宇俊,李建标,等.考虑需求响应的虚拟电厂商业机制研究综述[J].电力需求侧管理,2019,21(3):2-6.
XU Feng, HE Yujun, LI Jianbiao, et al. Review of research on commercial mechanism for virtual power plant considering demand response[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(3): 2-6.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] COLL-MAYOR D, PAGET M, LIGHTNER E. Future intelligent power grids: analysis of the vision in the European Union and the United States[J]. Energy Policy, 2007, 35(4): 2453 – 2465.
- [9] 唐虎, 陈爱伦, 崔浩, 等. 社区型能源互联网下的虚拟电厂参与电力市场策略分析[J]. 南方能源建设, 2019, 6(3): 40 – 47.
TANG Hu, CHEN Ailun, CUI Hao, et al. Strategy analysis of virtual power plants participation in electric power market with community Energy Internet[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(3): 40 – 47.
- [10] 刘吉臻, 李明扬, 房方, 等. 虚拟发电厂研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5103 – 5111.
LIU Jizhen, LI Mingyang, FANG Fang, et al. Review on virtual power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5103 – 5111.
- [11] 陈春武, 钟朋园, 曾鸣, 等. 虚拟电厂内部资源调度算法的对比分析及应用[J]. 水电能源学, 2014, 32(5): 197 – 201.
CHEN Chunwu, ZHONG Pengyuan, ZENG Ming, et al. Comparative analysis of dispatching algorithms for distributed energy resources in virtual power plant [J]. Water Resources and Power, 2014, 32(5): 197 – 201.
- [12] 杨甲甲, 赵俊华, 文福拴, 等. 含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(13): 92 – 102.
YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug in electric vehicles and wind generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 92 – 102.
- [13] ZAMANI A G, ZAKARIAZADEH A, JADID S. Day-ahead resource scheduling of a renewable energy based virtual power plant[J]. Applied Energy, 2016(169): 324 – 340.
- [14] JU L, ZHAO R, TAN Q, et al. A multi-objective robust scheduling model and solution algorithm for a novel virtual power plant connected with power-to-gas and gas storage tank considering uncertainty and demand response [J]. Applied Energy, 2019(250): 1336 – 1355.
- [15] RAHBARI-ASR N, OJHA U, ZHANG Z, et al. Incremental welfare consensus algorithm for cooperative distributed generation/demand response in smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(6): 2836 – 2845.
- [16] 杨珺, 侯俊浩, 刘亚威, 等. 分布式协同控制方法及在电力系统中的应用综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19): 4035 – 4049.
YANG Jun, HOU Junhao, LIU Yawei, et al. Distributed cooperative control method and application in power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(19): 4035 – 4049.
- [17] WILLE-HAUSSMANN B, ERGE T, WITTWER C. Decentralised optimisation of cogeneration in virtual power plants[J]. Solar Energy, 2010, 84(4): 604 – 611.
- [18] LAZAROIU G C, DUMBRAVA V, LEVA S, et al. Virtual power plant with energy storage optimized in an electricity market approach [C]// International Conference on Clean Electrical Power, June 20 – 13, 2015, Taormina, Italy. New York: IEEE, 2015: 333 – 338.
- [19] MASHHOUR E, MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets-Part I: Problem formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 26(2): 949 – 956.
- [20] 葛鑫鑫, 付志扬, 徐飞, 等. 面向新型电力系统的虚拟电厂商业模式与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 129 – 146.
GE Xinxin, FU Zhiyang, XU Fei, et al. Business model and key technologies of virtual power plant for new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 129 – 146.
- [21] ROUZBAHANI H M, KARIMIPOUR H, LEI L. A review on virtual power plant for energy management [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021(47): 101370.
- [22] 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. Risk-constrained energy management modeling of virtual power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8334 – 8349.
- [23] ALAHYARI A, EHSAN M, MOUSAVIZADEH M S. A hybrid storage-wind virtual power plant (VPP) participation in the electricity markets: a self-scheduling optimization considering price, renewable generation, and electric vehicles uncertainties [J]. Journal of Energy Storage, 2019 (25): 100812.
- [24] RAHIMIYAN M, BARINGO L. Real-time energy management of a smart virtual power plant [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(11): 2015 – 2023.
- [25] 魏震波, 孙舟倍, 梁政. 基于多目标两阶段规划的虚拟电厂优化调度[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 109 – 118..
WEI Zhenbo, SUN Zhoubei, LIANG Zheng. Virtual power plant optimal dispatching based on multi-objective and two-stage programming [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 109 – 118..
- [26] 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 Qinkun, QIU Yu, WANG Fei, et al. Stochastic optimal scheduling of virtual power plants considering multiple uncertainties [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 8 – 16.
- [27] 袁桂丽, 刘骅骐, 禹建芳, 等. 含碳捕集热电厂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.
- [28] YUAN Guili, LIU Huaqi, YU Jianfang. 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.
- [28] 仲悟之, 黄思宇, 崔杨, 等. 考虑源荷不确定性的风电-光热-碳捕集虚拟电厂协调优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3424 – 3432.
ZHONG Wuzhi, HUANG Siyu, CUI Yang, et al. W-S-C capture coordination in virtual power plant considering source-

- load uncertain[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3424 – 3432.
- [29] 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]. 电网技术, 2023, 47(11): 4458 – 4466.
- YUAN Guili, ZHONG Fei, ZHANG Rui, et al. Combined heat and power scheduling optimization for virtual power plants considering carbon capture and demand response[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4458 – 4466.
- [30] 刘丽军, 罗宁, 吴桐, 等. 基于混合整数二阶锥规划的考虑需求侧响应虚拟电厂优化调度[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 96 – 104.
- LIU Lijun, LUO Ning, WU Tong, et al. Optimal scheduling of virtual power plant considering demand side response based on mixed integer second-order cone programming[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(8): 96 – 104.
- [31] 孙惠娟, 刘昀, 彭春华, 等. 计及电转气协同的含碳捕集与垃圾焚烧虚拟电厂优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(9): 3534 – 3545.
- SUN Huijuan, LIU Yun, PENG Chunhua, et al. Optimization scheduling of virtual power plant with carbon capture and waste incineration considering power-to-gas coordination[J]. Power System Technology, 2021, 45(9): 3534 – 3545.
- [32] 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 Yingliang, ZHOU Liwen, WANG Deming, et al. Virtual power plant economic dispatching considering user classification[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 121 – 130.
- [33] 刘鑫, 吴红斌, 王鲸杰, 等. 市场环境下考虑需求响应的虚拟电厂经济调度[J]. 中国电力, 2020, 53(9): 172 – 180.
- LIU Xin, WU Hongbin, WANG Jingjie, et al. Economic dispatch of a virtual power plant considering demand response in electricity market environment[J]. Electric Power, 2020, 53(9): 172 – 180.
- [34] 张涛, 王成, 王凌云, 等. 考虑虚拟电厂参与的售电公司双层优化调度模型[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 952 – 961.
- ZHANG Tao, WANG Cheng, WANG Lingyun, et al. A bi-level optimal dispatching model of electricity retailers integrated with VPPs[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 952 – 961.
- [35] 王冠, 李鹏, 焦扬, 等. 计及风光不确定性的虚拟电厂多目标随机调度优化模型[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 107 – 113.
- WANG Guan, LI Peng, JIAO Yang, et al. Economic dispatch of a virtual power plant considering demand response in electricity market environment[J]. Electric Power, 2017, 50(5): 107 – 113.
- [36] 袁桂丽, 贾新潮, 陈少梁, 等. 虚拟电厂源-荷协调多目标优化调度[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 105 – 112.
- YUAN Guili, JIA Xinchao, CHEN Shaoliang, et al. Multiobjective optimal dispatch considering source-load coordination for virtual power plant[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(5): 105 – 112.
- [37] 林毓军, 苗世洪, 杨炜晨, 等. 面向多重不确定性环境的虚拟电厂日前优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(12): 143 – 150.
- LIN Yujun, MIAO Shihong, YANG Weichen, et al. Day-ahead optimal scheduling strategy of virtual power plant for environment with multiple uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 143 – 150.
- [38] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245 – 6259.
- LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245 – 6259.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] ALAHYARI A, POZO D. Performance-based virtual power plant offering strategy incorporating hybrid uncertainty modeling and risk viewpoint[J]. Electric Power Systems Research, 2022(203): 107632.
- [42] 范松丽, 艾芊, 贺兴. 基于机会约束规划的虚拟电厂调度风险分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4025 – 4034.
- FAN Songli, AI Qian, HE Xing. Risk analysis on dispatch of virtual power plant based on chance constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4025 – 4034.
- [43] 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 Siyuan, AI Qian, ZHENG Jianping, 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.
- [44] SHAYEGAN-RAD A, BADRI A, ZANGENEH A. Day-ahead scheduling of virtual power plant in joint energy and regulation reserve markets under uncertainties[J]. Energy, 2017(121): 114 – 125.
- [45] 杜刚, 赵冬梅, 刘鑫. 计及风电不确定性优化调度研究综述[J]. 中国电机工程报, 2023, 43(7): 2608 – 2627.
- DU Gang, ZHAO Dongmei, LIU Xin. Research review on optimal scheduling considering wind power uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2608 – 2627.
- [46] ZENG B, ZHAO L. Solving Two-stage robust optimization problems by a constraint-and-column generation method[J]. Operations Research Letters, 2013, 41(5): 457 – 461.
- [47] 余爽, 卫志农, 孙国强, 等. 考虑不确定性因素的虚拟电厂竞标模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 43 – 49.
- ZHAO Wanfang, WANG Huifang, QIU Jian, et al. A bidding model for a virtual power plant considering uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 43 – 49.
- [48] 仇梦林, 胡志坚, 李燕, 等. 基于可行性检测的考虑风电和需求响应的机组组合鲁棒优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3184 – 3194.
- ZHANG Menglin, HU Zhijian, LI Yan, et al. A robust

- optimization method for unit commitment considering wind power and demand response based on feasibility testing [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3184 – 3194.
- [49] 徐康轩, 郭超, 包铭磊, 等. 市场环境下考虑多元不确定性的热电联合虚拟电厂竞标策略[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3354 – 3365.
- XU Kangxuan, GUO Chao, BAO Minglei, et al. Bidding strategy for combined heat and power virtual power plant in electricity market considering multiple uncertainties [J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3354 – 3365.
- [50] 李红霞, 樊伟, 李楠, 等. 考虑风光不确定性的电气互联虚拟电厂近零碳调度优化模型[J]. 电力建设, 2020, 41(9): 10 – 19.
- LI Hongxia, FAN Wei, LI Nan, et al. Near-zero carbon dispatching optimization model of virtual power plant connected with power-to-gas considering uncertainties of wind and photovoltaic power [J]. Electric Power Construction, 2020, 41(9): 10 – 19.
- [51] 王金明, 张卫国, 朱庆, 等. 含风电及电动汽车虚拟电厂参与电力市场的优化调度策略[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(1): 28 – 34, 47.
- WANG Jinming, ZHANG Weiguo, ZHU Qing, et al. Optimal scheduling strategy for VPP participating in the power market including wind power and EV [J]. Power DSM, 2020, 22(1): 28 – 34, 47.
- [52] MOHAMMADI J, RAHIMI-KIAN A, GHAZIZADEH M S. Joint operation of wind power and flexible load as virtual power plant [C]//2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, May 5, 2011, Rome, Italy. New York: IEEE, 2011: 1 – 4.
- [53] 伊书鑫, 胡健, 路尧, 等. 电力现货市场中多虚拟电厂交易策略[J]. 控制工程, 2022, 29(9): 1587 – 1592.
- YI Shuxin, HU Jian, LU Yao, et al. Trading strategy of multiple virtual power plants in the electricity spot market [J]. Control Engineering of China, 2022, 29(9): 1587 – 1592.
- [54] 钟永洁, 李玉平, 胡兵, 等. 基于合作博弈的能源互联网经济能效分层协同优化调度[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 55 – 64.
- ZHONG Yongjie, LI Yuping, HU Bing, et al. Hierarchical collaborative optimal scheduling of economy energy efficiency in Energy Internet based on cooperative game [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 55 – 64.
- [55] 常琨. 计及不确定性因素和偏差电量互补的虚拟电厂群优化调度研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2019.
- [56] CHIS A, KOIVUNEN V. Coalitional game-based cost optimization of energy portfolio in smart grid communities [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 10(2): 1960 – 1970.
- [57] 解玄弘, 谢敬东. 基于纳什谈判的多能VPP群协同优化运行策略[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(12): 3937 – 3949.
- XIE Xuanhong, XIE Jingdong. Coordinative optimal operation of multi-energy virtual power plants clusters based on nash bargaining [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(12): 3937 – 3949.
- [58] 李学平, 王健民, 卢志刚, 等. 基于非合作博弈与收益共享契约的能源服务商定价策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(3): 1 – 8.
- LI Xueping, WANG Jianmin, LU Zhigang, et al. Pricing strategy of energy service provider based on non-cooperative game and revenue sharing contract [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(3): 1 – 8.
- [59] 邱革非, 余欣蓉, 金乐婷, 等. 多虚拟电厂博弈的区域电网经济调度[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(6): 75 – 83.
- QIU Gefei, YU Xinrong, JIN Yueting, et al. Economic dispatch of regional power grid based on multi-virtual power plant game [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(6): 75 – 83.
- [60] 匡熠, 王秀丽, 王建学, 等. 基于stackelberg博弈的虚拟电厂能源共享机制[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4556 – 4564.
- KUANG Yi, WANG Xiuli, WANG Jianxue, et al. Virtual power plant energy sharing mechanism based on Stackelberg game [J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4556 – 4564.
- [61] 吴陈硕. 基于贝叶斯博弈的虚拟电厂多主体协同优化方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [62] 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 Dong, FAN Qiang, YOU Hongliang, et al. Research status and trends of virtual power plants under electrical Internet of Things [J]. Advanced Engineering Sciences, 2020, 52(4): 3 – 12.
- [63] MORAIS H, PINTO T, VALE Z, et al. Multilevel negotiation in smart grids for VPP management of distributed resources [J]. IEEE Intelligent Systems, 2012, 27(6): 8 – 16.
- [64] 何奇琳, 艾芊. 售电侧放开环境下含需求响应虚拟电厂的电力市场竞价策略[J]. 电力建设, 2019, 40(2): 1 – 10.
- HE Qilin, AI Qian. Bidding strategy of electricity market including virtual power plant considering demand response under retail power market deregulation [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(2): 1 – 10.
- [65] 殷爽睿, 艾芊, 宋平, 等. 虚拟电厂分层互动模式与可信交易框架研究与展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 118 – 128.
- YIN Shuangrui, AI Qian, SONG Ping, et al. Research and prospect of hierarchical interaction mode and trusted transaction framework for virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 118 – 128.
- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] 周洪益, 余爽, 柏晶晶, 等. 基于区块链技术的虚拟电厂交易管理模式研究[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(1): 72 – 76.
- ZHOU Hongyi, YU Shuang, BAI Jingjing, et al. Research on trading pattern of virtual power plant based on blockchain technology [J]. Power DSM, 2021, 23(1): 72 – 76.
- [69] 王卓瑜, 陆婷. 基于区块链的抽水蓄能电站安全监测数据管理系统设计[J]. 科学技术创新, 2022(8): 55 – 58.
- WANG Zhuoyu, LU Ting. Design of safety monitoring data management system for pumped storage power station based on

- blockchain [J]. Scientific and Technological Innovation, 2022 (8): 55 – 58.
- [70] 张巍, 卢骧. 点对点交易下储能聚合商共享自营多模式交易模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 15 – 23.
ZHANG Wei, LU Xiang. Sharing and self-operating multi-mode trading model of energy storage aggregators with peer-to-peer trade [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 15 – 23.
- [71] 李达, 郭庆雷, 王栋, 等. 基于区块链的能源电力数据验证与溯源模型[J]. 中国电力, 2023, 56(5): 203 – 208.
LI Da, GUO Qinglei, WANG Dong, et al. Research on electric power data verification and traceability method based on blockchain technology [J]. Electric Power, 2023, 56(5): 203 – 208.
- [72] 周群星, 张容福, 贾昆, 等. 区块链技术在电力共享经济中的应用研究[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(2): 25 – 33.
ZHOU Qunxing, ZHANG Rongfu, JIA Kun, et al. Application of blockchain technology in power sharing economy [J]. Electric Power ICT, 2022, 20(2): 25 – 33.
- [73] 张显, 冯景丽, 常新, 等. 基于区块链技术的绿色电力交易系统设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9): 1 – 10.
ZHANG Xian, FENG Jingli, CHANG Xin, et al. Design and application of green power trading system based on blockchain technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 1 – 10.
- [74] 杨明通, 周步祥, 董申, 等. 区块链支持下的微网电力市场设计及调度优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 155 – 161.
YANG Mingtong, ZHOU Buxiang, DONG Shen, et al. Design and dispatch optimization of microgrid electricity market supported by blockchain [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 155 – 161.
- [75] 单俊嘉, 胡俊杰, 吴界辰. 面向虚拟电厂能量管理的点对点市场交易机制与模型[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3401 – 3408.
SHAN Junjia, HU Junjie, WU Jiechen. Peer-to-peer market trading mechanism and model for virtual power plant energy management [J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3401 – 3408.
- [76] 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 Buxiang, ZHANG Yue, ZANG Tianlei, et al. Blockchain-based Stackelberg game optimal operation of multiple virtual power plants [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 155 – 163.
- [77] MENGELKAMP E, NOTHEISEN B, BEER C, et al. A blockchain-based smart grid: towards sustainable local energy markets [J]. Computer Science-Research and Development, 2018(33): 207 – 214.
- [78] 裴凤雀, 崔锦瑞, 董晨景, 等. 区块链在分布式电力交易中的研究领域及现状分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(5): 1752 – 1771.
PEI Fengque, CUI Jinrui, DONG Chenjing, et al. The research field and current state-of-art of blockchain in distributed power trading [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1752 – 1771.
- [79] 王健, 周念成, 王强钢, 等. 基于区块链和连续双向拍卖机制的微电网直接交易模式及策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5072 – 5084.
WANG Jian, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Electricity direct transaction mode and strategy in microgridbased on blockchain and continuous double auction mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5072 – 5084.

收稿日期: 2023-05-29; 网络首发日期: 2024-03-21

作者简介:

陶伟健(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为区块链、虚拟电厂, 2439956381@qq.com;

艾芊(1969), 男, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为虚拟电厂调度及市场运行、能源互联网、区块链技术, aiquan@sjtu.edu.cn;

李晓露(1971), 女, 教授, 博士, 研究方向为电力企业信息集成、电力调度自动化、配电自动化、综合能源系统, lixiaolu_sh@163.com。