

从虚拟电厂到真实电量:虚拟电厂研究综述与展望

孙秋野¹, 姚葭², 王一帆²

(1. 沈阳工业大学, 辽宁省 沈阳市 110870;

2. 东北大学信息科学与工程学院, 辽宁省 沈阳市 110819)

From Virtual Power Plant to Real Electricity: Summary and Prospect of Virtual Power Plant Research

SUN Qiuye¹, YAO Jia², WANG Yifan²

(1. Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning Province, China; 2. College of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning Province, China)

摘要: 随着大量分布式能源接入电网, 虚拟电厂作为一种分布式能源管理技术, 因其灵活性、高效性和可持续性而受到了广泛关注。首先简述了虚拟电厂的产生背景, 分析了虚拟电厂中的研究热点和新兴方向, 介绍了虚拟电厂的组成与结构。并进一步根据虚拟电厂调节目标和功能的不同, 将其分为任务驱动型虚拟电厂、经济驱动型虚拟电厂和混合驱动型虚拟电厂。在此基础上, 进一步论述了不同类型虚拟电厂的不同运行模式及其相应的关键技术。最后, 展望了虚拟电厂未来的发展前景。

关键词: 虚拟电厂; 能源市场; 灵活资源; 分布式能源

ABSTRACT: With a large number of distributed energy resources connected to the grid, virtual power plants as a distributed energy management technology have received a lot of attention because of their flexibility, efficiency and sustainability. This paper briefly discussed the background of virtual power plants, analyzed the hot directions and emerging directions in virtual power plants, and introduced the composition and structure of virtual power plants. According to the different goals and functions of virtual power plants, virtual power plants can be divided into mission-driven virtual power plants, economy-driven virtual power plants and hybrid driven virtual power plants. On this basis, the different operation modes and different solution methods of different types of virtual power plants were further discussed. Finally, the future development prospects of virtual power plants were prospected.

KEY WORDS: virtual power plant; energy market; flexible

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20A20190, 62073065)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (U20A20190, 62073065).

resources; distributed energy resources

0 引言

近几年, 在“双碳”目标的指引下, 我国越来越多的分布式能源并入电网, 这些分布式能源地理位置分散, 且独立运行、难以协调, 使电网转变为新型“双高”电力系统, 这给电网整体安全性带来了隐患^[1-4]。如何高效调配这些灵活的分布式能源, 实现对电网的有效支持是亟待解决的问题。

随着分布式能源的开发并网, 电网运行压力也持续增大。不同类型的分布式能源运行特性存在较大差异, 且需要满足诸多非线性约束。如果对系统内所有的分布式能源进行建模, 并向上级电网上报详细物理模型, 将会给电网带来较大的通信量与计算量。虚拟公共设施指相互独立的市场参与实体之间的一种灵活的合作关系, 通过合作实现各实体间的虚拟共享, 从而为消费者提供高质量的电能服务。在此过程中, 所有参与合作的实体便形成了一个虚拟的总体, 以这个虚拟模型参与市场。因此, 有学者提出将分布式能源聚合在一起, 形成一个虚拟电厂(virtual power plant, VPP), 以传统电厂的角色参与电网的运行调度^[5-7]。本文采用《配电网数字化相关概念分析及定义》中虚拟电厂的定义: 虚拟电厂是一种将多个分散且独立的电源(风电、光伏等分布式发电)、

储能、可控负荷、电动汽车等资源进行集成和协调而形成的可控虚拟系统。简而言之，虚拟电厂是一种分布式能源管理技术，是分布式能源聚合并参与电网运行的一种形式。根据上述虚拟电厂定义可知，其虽然名为“虚拟”电厂，但其内部分布式能源所蕴含的电能及其可对电网提供的调峰调频等辅助服务的能力是真实存在的。

对中国知网和 Web of Science 核心合集进行检索，截至 2023 年 7 月，共检索到虚拟电厂中文文献 904 篇，英文文献 1 412 篇。虚拟电厂发文数呈现稳步上升的趋势，并从 2013 年开始增长趋势加快。为了深入了解虚拟电厂领域的研究热点，本文进行了关键词共现可视化分析^[8-9]。同时，根据文献平均发表时间，将其总结为新兴关键词和热点关键词。其中新兴关键词的文献平均发表时间在 2021 年之后，主要包括能源互联网、新型电力系统、动态聚合、碳中和、碳捕集和柔性负荷等。热点关键词主要包括分布式电源、电动汽车、储能、能源管理、需求响应、不确定性、能源互联网、优化调度和电力市场等。将上述相关文献归纳为以下 6 个研究方向：

1) 可再生能源集成。这个方向探讨如何更好地聚合可再生能源，以及与电力系统的互操作性。研究人员致力于解决可再生能源的波动性和时空不匹配问题，以实现清洁能源的大规模应用^[10]。

2) 储能技术和灵活性。这个方向关注储能技术的应用，以平衡电力系统中的波动和不确定性^[11-12]，包括能量平衡、负荷调节、储能系统的设计和优化等方面的研究。储能系统对于提高电力系统的灵活性和可靠性至关重要。

3) 能源管理与优化。这个方向关注如何有效管理和优化多种分布式能源资源，包括可再生能源、储能系统、分布式发电和可控负荷。研究集中在如何最大化实现能源的有效利用，提高电力系统的稳定性和可靠性，以及降低能源成本^[13-15]。

4) 需求响应和用户参与。这个方向关注如何鼓励用户参与和响应能源需求，以实现能源效率和环境可持续性，包括适应可再生能源波动、能源市场变化、节能和环保等方面的研究^[16]。

5) 电力市场和经济分析。这个方向侧重于虚

拟电厂在电力市场中的角色和经济效益，包括市场参与、能源定价、供需平衡、政策支持和市场机制等方面的研究。研究人员致力于理解虚拟电厂如何在市场中获得最大的经济回报^[17-18]。

6) 碳捕集和碳中和。这个方向研究虚拟电厂在减少温室气体排放和推动碳中和方面的作用^[19]，包括碳捕集技术的应用以及与碳减排政策的契合。

事实上，有关虚拟电厂的研究成果在国内已有多项典型示范工程^[20-21]，但规模化实践仍缺乏系统的理论支撑，近几年有关虚拟电厂的研究得到了越来越多学者的关注。虚拟电厂将分布在不同地域的分布式电源、柔性负荷、分布式储能等资源，通过信息技术聚合起来，提升电网平衡调节能力、促进新能源消纳，是一种清洁低碳、安全高效的轻资产解决方案。目前已有许多相关研究，文献[22]从技术、运营与管理等多方面详细论述了虚拟电厂聚合构架技术的发展情况。文献[23]和文献[24]则分别介绍了采用云-边协同架构和数字孪生融合这 2 种方法，如何将分布式能源聚合成虚拟电厂。文献[25]采用定区间滚动预测来确定虚拟电厂的响应成本和响应能力，从而有效避免了因非线性、时序耦合性与时变性带来的建模难题。文献[26]采用多级优化控制使虚拟电厂参与需求侧响应，为电网分担压力。文献[27]介绍了虚拟电厂通过调控分布式能源为电网提供调峰调频等辅助服务。本文详细介绍了虚拟电厂的组成与分类，从任务驱动型虚拟电厂、经济驱动型虚拟电厂和混合驱动型虚拟电厂角度详细分析了虚拟电厂的应用场景和优势，可为虚拟电厂相关研究提供参考。

1 虚拟电厂的组成结构与分类

1.1 虚拟电厂的组成结构

虚拟电厂作为一种创新的能源管理系统，以其灵活性、高效性和可持续性而备受关注。虚拟电厂的核心理念是将多种能源组件和参与者整合到一个统一的网络结构中，实现能源生产、转换、存储、消耗和调度的协调运行^[28-30]，其组成结构如图 1 所示。

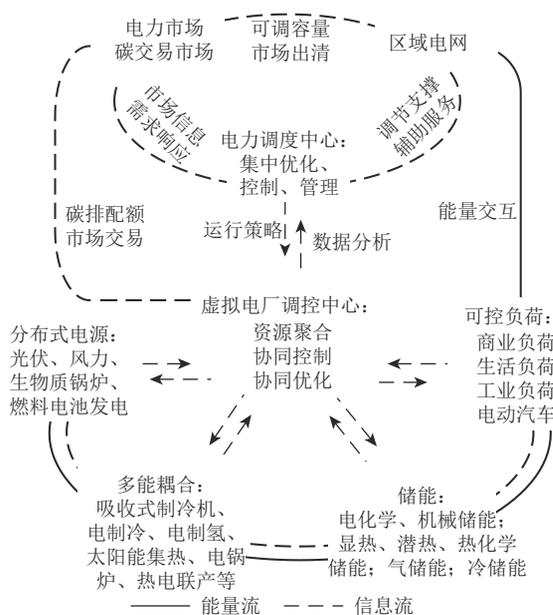


图1 虚拟电厂组成结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of VPP composition

1.2 虚拟电厂的主要组成设备

虚拟电厂的主要组成设备可分为分布式电源设备、多能耦合设备、储能设备和可调负荷设备^[31-34]。

1.2.1 分布式电源设备

分布式发电是指“在用户所在场地或附近建设安装，运行方式以用户端自发自用为主，多余电量上网，且以配电网系统平衡调节为特征的发电设施或有电力输出的能量综合梯级利用多联供设施”^[35]。这些设备通常利用可再生能源或其他可用的能源资源，将能源转换为电能，供应局部区域的用电需求。虚拟电厂中常见能源生产设备^[36]如下：

1) 分布式光伏发电系统。该系统利用太阳能光伏电池板将太阳能转换为直流电能，然后通过逆变器将其转换为交流电能。这些光伏发电系统可以安装在屋顶、墙壁或空地等地方，为建筑物和区域提供可再生能源。

2) 小型风力涡轮机。这是一种利用风能产生电能的设备，它们通常安装在建筑物的屋顶或高处，或者农村地区和郊区的开阔地带。风力涡轮机在风速较高时，风能驱动涡轮旋转产生电力。

3) 微型水力发电机。该设备利用水流的动能产生电能，它们通常安装在水流较为充足的河流

或小溪中，或者与水库、水泵系统相结合，以此产生电力。

4) 生物质发电设备。该设备利用生物质燃料(如木材、农作物残渣等)进行燃烧产生热能，然后通过发电机转化为电能。这些设备通常用于工业厂房或农村地区的小规模发电，具有可再生性和低碳排放的特点^[37]，但现有虚拟电厂文献鲜有考虑聚合生物质能发电^[38]。

5) 光热发电设备。该设备将太阳辐照转化为热能，并将热能储存在储热介质中，根据需要生成电力。光热发电因其通过热能储存实现的可调度性而备受青睐。此外，热能储存还使光热发电能够与电热锅炉合作，以在不确定性环境中帮助平衡负荷和发电^[39]。光热发电技术在电力系统各领域中已得到了广泛应用，然而光热发电特性在虚拟电厂优化调度中的相关研究较少^[40-41]。

6) 其他传统小型发电设备。柴油发电机、燃煤发电设备、天然气发电设备和燃料电池等在虚拟电厂中起着重要作用，可以提供稳定的电力供应和灵活的调度能力。

通过有效管理和协调这些能源生产设备，虚拟电厂可以根据实时需求和能源市场条件，优化分布式电源的调度和分配。这有助于提高能源的利用效率、降低供需不平衡的风险，并推动可再生能源的可持续发展和应用^[42]。

1.2.2 多能耦合设备

多能耦合是虚拟电厂的关键特性之一，它通过整合电、气、冷和热等多种能源形式，实现能源资源的协调和相互补充^[43-44]。这种综合能源管理的方式旨在提高能源利用效率、增强电力系统稳定性，并满足电网需求和用户需求。具体的能源耦合方式和整合策略会因虚拟电厂的规模、技术能力、地理位置、市场条件和能源资源可用性等因素而有所差异。由于多能耦合设备的特性，虚拟电厂中既包括多能生产设备，又包括多能转换设备。

在虚拟电厂中，可能包括电能、燃气、冷能和热能等多种能源生产设备。电能是最常见的能源形式，主要包括分布式电源设备；燃气在虚拟

电厂中也扮演着重要角色，包括天然气、氢气和生物气体等^[45]，它们被用作发电机组的燃料，燃气生产设备包括碳捕集设备、沼气池等；冷能可以来自制冷设备、空调系统，而热能可以来自锅炉、热泵等。虚拟电厂可以根据能源资源的可用性和需求情况，在不同的时间和地点灵活地切换能源生产方式。当某种能源供应不足时，其他能源可以提供额外的能量来弥补缺口，这可以降低对单一能源的依赖，减少供应中断的风险，可提高能源供应的可靠性和稳定性。通过虚拟电厂的能量管理系统，这些多能资源可以被监测、控制和调度，以满足不同用户和系统对多种能源的需求。

虚拟电厂中还包括电热锅炉、电制氢设备、制冷设备和热电联产设备等多能转换设备。多能转换设备允许虚拟电厂根据实际需求和能源市场条件选择最优的能源组合，通过灵活地选择能源

组合，虚拟电厂可以最大程度地提高能源的利用效率，降低成本，增强经济可行性。此外，通过增加可再生能源的比例，虚拟电厂可以降低对化石燃料的依赖，减少温室气体的排放，从而有助于应对气候变化和环境保护。这种多能转换的特性是实现可持续能源系统和推动能源转型的重要手段之一。

1.2.3 储能设备

虚拟电厂作为一个能量整合和优化管理系统，可以整合多种时间尺度和容量的储能设备，以实现能源的高效储存和调度。这种方式可以实现不同能源之间的时间和空间平衡，用于平衡能源供需、提高系统灵活性和稳定性。根据应用场景的不同，虚拟电厂中的储能大致可以分为4类：容量型(≥ 4 h)、能量型(1~2 h)、功率型(≤ 30 min)和备用型(≥ 15 min)^[46]，其具体储能形式和应用场景如表1所示。

表1 虚拟电厂中储能形式及应用场景

Tab. 1 Energy storage forms and application scenarios in VPP

类型	储能时长	应用场景	储能形式
容量型	≥ 4 h	削峰填谷、离网储能等	抽水蓄能、压缩空气、储热蓄冷、储氢储碳、钠硫电池、液流电池、铅炭电池等
能量型	1~2 h	调峰调频和紧急备用等多重功能	0.5 C或1 C型磷酸铁锂电池等
功率型	≤ 30 min	调频、平滑间歇性电源功率波动等	超导储能、飞轮储能、超级电容器、钛酸锂电池、三元锂电池、高电压电池、倍率 ≥ 2 C型磷酸铁锂电池等
备用型	≥ 15 min	作为不间断电源提供紧急电力	铅酸电池、梯级利用电池、飞轮储能等

1.2.4 可调节负荷设备

可调节负荷在虚拟电厂中扮演着关键角色，指的是能够根据电价、激励或者交易信息，实现启停、调整运行状态或调整运行时段的需求侧用电设备、电源设备及储能设备。根据用户自主响应特性，可调节负荷设备通常可分为以下3类：

1) 可转移负荷，即在一个调度周期内总用电量不变，各时段用电量可灵活调节，如电动汽车换电站、冰蓄冷、储能以及工商业用户的部分负荷等^[47]；

2) 可平移负荷^[48]，将用电曲线在不同时段间平移，如工业大用户；

3) 可中断负荷，可根据需要在一定时段内对用电量进行一定削减，如智慧照明、分散式空调等。

虚拟电厂通过与各参与者(如工业厂商、商业

建筑、交通和住宅等)合作，将这些可调节负荷纳入其能源管理系统中，能够实时监测能源的状态和需求，同时对电力市场信号实时监测和响应。通过智能算法和预测模型，在电力市场的高峰期或低谷期对负荷进行调整，既可以根据实时电力需求合理分配和调度多种能源、可调节负荷设备，以实现能源的高效利用和负载平衡，也方便获取负荷响应行为的时序特征，计及消费者心理和用户满意度。

以电动汽车为例，通过与虚拟电厂或能源管理系统连接，多个充电桩可以接受指令和控制信号，根据能源系统的需求和策略以及用户的满意度，在不同地点和时间对电动汽车进行调度和管理。以居民用户为例，由于其用电负荷整体不高，缺乏参与的主动性。然而，虚拟电厂能把一定区域内的居民负荷聚集起来，共同参与需求响应，

以达到超出预期的效果。然而，值得注意的是，由于居民负荷分散分布和单点容量较小，其聚合相对较为困难^[49]。此外，可转移负荷亦能满足灵活供暖或制冷的灵活需求。虚拟电厂可以监测不同地点的温度和能源需求，通过调整可转移负荷的供暖或制冷设备使用情况，以实现能源的最佳分配和负载平衡^[50]。

通过利用这些可调节负荷，虚拟电厂可以呈现多种优势。首先，调整负荷可增强发电机组的运行稳定性，减少其启停频率，从而降低电力系统的能耗；其次，负荷波动会对电力系统的频率和电压产生影响，及时调节负荷可以保持系统频率和电压稳定，避免由于负荷过大或过小导致的电力系统故障，提升系统的可靠性；再次，可调节负荷还能使电能质量更加稳定，保证电力系统安全稳定运行；最后，虚拟电厂聚合可调节设备，并将负荷侧的调节能力纳入电网调度运行和市场交易中，从而增强电力系统的灵活调节能力^[51]。

1.3 虚拟电厂的网络结构

虚拟电厂的网络结构可以采用多种形式，其中一些常见的网络结构包括：集中式结构、分布式结构和混合结构。这些网络结构在虚拟电厂中可以根据具体应用和系统需求进行选择 and 组合。不同的结构具有各自的优势和适用范围，可以根据虚拟电厂的规模、能源资源分布、通信技术和控制策略等因素进行决策，最终的目标是实现能源资源的协调调度和优化管理，以提高能源利用效率、降低能耗成本，并支持可持续能源发展。

1) 集中式结构

在集中式结构中，虚拟电厂的各个能源资源和负荷都直接连接到一个中央控制系统。中央控制系统负责收集和处理来自各个组件的数据，并进行整体的能源管理和调度。这种结构使得能源资源和负荷的监测、控制、优化可以集中进行，如图2所示，图中DER为分布式能源(distributed energy resources)。

2) 分布式结构

在分布式结构中，虚拟电厂的能源资源和负荷分布在不同的地点，通过通信网络进行连接和协调。各个能源资源和负荷之间可以通过本地控

制系统进行局部的能源管理和调度，并与其他分布式控制系统进行协作。这种结构可以提高系统的灵活性和可扩展性，如图3所示。

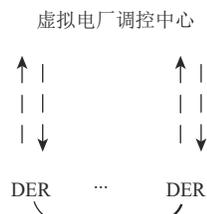


图2 集中式结构虚拟电厂示意图

Fig. 2 Schematic diagram of a centralized structure VPP

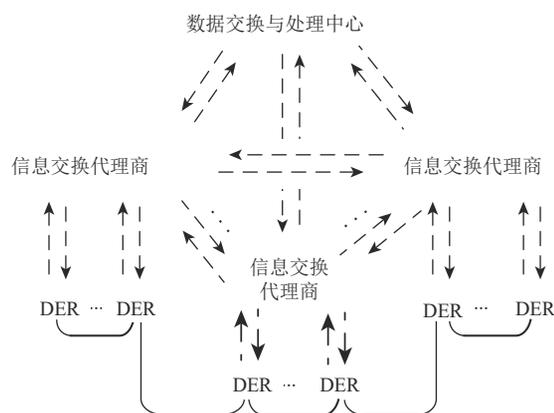


图3 分布式结构虚拟电厂示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a distributed structure VPP

3) 混合结构

混合结构将集中式和分布式结构相结合。将虚拟电厂划分为多个代理子区域或子系统，并在每个子系统内采用集中式结构，而不同子系统之间采用分布式结构。多个代理子系统之间通过通信和协调机制进行联合运行和管理，并共享能源资源、交换能量信息，可进行跨区域的能量调度和协同操作，提高能源的整体利用效率、降低系统风险，并在跨地域或跨国界的能源管理方面发挥作用。混合结构在每个代理子系统内实现较高的集中控制和协调，同时在整体上保持分布式的灵活性，如图4所示。

综上所述，虚拟电厂作为一种具有物理分布的能源系统，通过组成模式的多样化和网络结构的灵活性，将能源的生产、转换、存储、消耗和调度协调在一起，实现了利益主体目标的一致和能源的可持续利用。虚拟电厂提供了一种创新的能源管理方式，旨在实现能源高效、可靠和可持

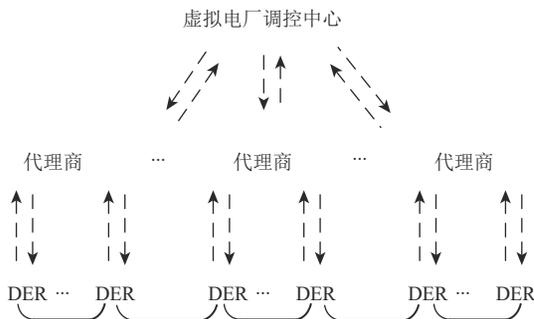


图4 混合结构虚拟电厂示意图

Fig. 4 Schematic diagram of a hybrid structure VPP

续发展的未来。

1.4 虚拟电厂的分类

虚拟电厂内部分布式能源种类繁多，有负荷、储能、可再生能源发电站等，因此，虚拟电厂可实现多种不同的功能，既可以为电网提供调频调压等辅助服务，又可以参与电网调度，帮助其削峰填谷，也可以提高可再生能源消纳水平，保护环境，还可以参与电力市场，为内部分布式能源实现利益最大化。上述虚拟电厂的功能可大致分为公益性和经济性2类。本文根据虚拟电厂的运行目标，将虚拟电厂分为任务驱动型虚拟电厂、经济驱动型虚拟电厂和混合驱动型虚拟电厂，如图5所示。

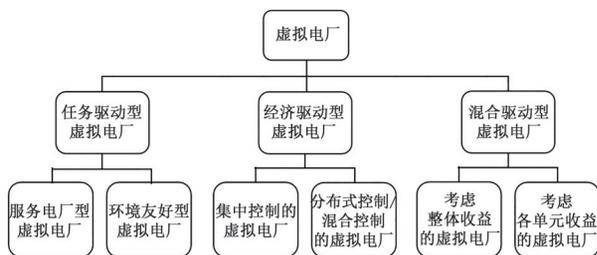


图5 虚拟电厂的分类

Fig. 5 Classification of VPP

2 任务驱动型虚拟电厂

任务驱动型虚拟电厂不优先考虑自身利益，而是为其他主体提供服务。现有的研究表明，任务驱动型虚拟电厂大致分为两大类：服务电网型虚拟电厂和环境友好型虚拟电厂。

2.1 服务电网型虚拟电厂

虚拟电厂内部不仅存在大量分布式可再生能

源发电，还有部分可控分布式能源，所以虚拟电厂可作为一个整体参与电网的调度，为电网提供电压控制、调峰调频、阻塞管理等辅助服务。综合考虑功率可调节灵活性资源的运行状态、运行参数、边际成本等信息，以及调度中心提供的网络信息，以辅助服务成本最小为目标，以可调节功率域和调节功率成本为性能指标，参与电网调度^[52-55]。虽然目标函数为成本最小，但此处的成本最小实则为电网调度成本最小，并不是以虚拟电厂自身收益为目标，所以此种情况下的虚拟电厂为任务驱动型。

2.1.1 调节功率成本

虚拟电厂的调节功率成本往往与调节功率之间存在非线性关系，一般采用基于数据驱动/基于曲线拟合的封装方法求取，为保证虚拟电厂在市场竞争中的绝对优势，其表达式不能包含任何分布式能源调节成本和调节功率之间的相关性。

1) 基于数据驱动的封装方法

采用神经网络模型，用典型场景下的虚拟电厂数据训练神经网络，得到满足精度要求的模型来表征虚拟电厂调节成本和调节功率之间的非线性关系。

2) 基于曲线拟合的封装方法

需根据虚拟电厂内部包含的分布式能源种类，预估虚拟电厂调节成本和调节功率之间的关系，建立含有未知系数的函数，再根据已知的数据求取未知系数，得到虚拟电厂调节成本和调节功率之间的非线性关系^[56]。

2.1.2 可调节功率域

由于虚拟电厂中分布式能源种类较多，不同种类的分布式能源可调节功率域求取方法不尽相同，不等式约束也存在较大差异，且各个时刻功率变量之间具有耦合关系，所以不能简单通过求和的方式求取虚拟电厂的可调节功率域。目前已有的研究表明，基于分布式能源近似线性求和与基于虚拟电厂整体近似求解方法可用来求取虚拟电厂的可调节功率域。

1) 基于分布式能源近似线性求和

其基本思路为：先将各个分布式能源可调节功率域变换为具有相同结构但参数不同的统一表

达形式，再对其进行线性求和。基于分布式能源近似线性求和有以下4种方法：

① 顶点法：将调节功率域映射到几何空间，采用闵可夫斯基和的基本原理，用顶点集来表述可调节功率域，此方法未对分布式能源可调节功率域表达式进行处理，精确度很高，但各个高维凸多面体的顶点集获取难度较大，所以此方法难以得到广泛应用^[57]。

② 半平面法：将分布式能源的功率约束重新表述为功率矩阵不等式形式，增加了冗余的半平面约束，导致虚拟电厂可调节功率域的最终计算结果比实际偏大，存在调度指令无法实现的风险^[58-59]。

③ “Zonotope”法：采用内部近似求解算法，导致虚拟电厂可调节功率域的最终计算结果比实际偏小，具有一定的保守性^[60]。

④ 初始化功率集合的缩放和位移变换法：通过对初始化功率集合进行内、外共同缩放和位移变换的方式来表征，为简化求解过程，所有分布式能源可调节功率域均须采用相同的初始化功率集合求解，降低了计算精度，且需要逐个变换，求解效率较低。所以此类方法仅适用于包含分布式能源种类较少、容量较小的场景^[61-63]。

以上4种方法各有优缺点，如表2所示。

表2 4种方法优缺点对比

Tab. 2 Comparison of advantages and disadvantages of the four methods

方法	优点	缺点
顶点法	精度高	顶点集获取难度大
半平面法	计算难度低	结果偏大
“Zonotope”法	计算难度低	结果偏小
初始化功率集合的缩放和位移变换法	精度较高	计算量较大

2) 基于虚拟电厂整体近似求解

其基本思路为将虚拟电厂作为一个整体来进行近似求解，则需根据虚拟电厂内部所有分布式

能源的功率约束，采用高位凸面体近似逼近求解。为进一步确认虚拟电厂可调节功率域的表达式，可根据内部分布式能源的种类，先选定高维凸多面体对应的数学模型。虽然求解精度较低，但是求解效率较高。所以此类方法仅适用于包含分布式能源种类较多、容量较大的场景。基于虚拟电厂整体近似求解有以下3种模型。

① 虚拟电池模型：若虚拟电厂中分布式能源多为储能装置或柔性负荷，则可采用虚拟电池模型进行描述。此方法在空间几何方面可近似等效于在虚拟电厂可调节功率域对应高维凸多面体中寻找边长最长的内接直角棱锥，该方法求解的虚拟电厂可调节功率域与实际相比偏大，但很好地表述了可调控功率域随储能变化而变化的关系^[64-68]。

② 虚拟发电机模型：若虚拟电厂中分布式能源多为风力发电、光伏发电或常规可控机组，则可采用虚拟发电机模型进行描述。此方法在空间几何方面可近似等效于在虚拟电厂可调节功率域对应高维凸多面体中寻找边长最长的内接方形多面体，该方法求解的虚拟电厂可调节功率域与实际相比偏小^[69]。

③ 虚拟电池模型和虚拟发电机模型相结合：往往虚拟电厂都会既包含储能装置或柔性负荷，又包含风力发电、光伏发电或常规可控机组，所以采用虚拟电池模型和虚拟发电机模型相结合的方式，可以更精确地描述虚拟电厂可调节功率域^[70-71]。

可根据虚拟电厂内部包含的可再生能源种类不同，来决定采用哪种模型进行求解，3种模型适用场景对比如表3所示。

2.1.3 双层优化

辅助电网型虚拟电厂作为一个整体参加电网的经济调度，往往采用集中控制的方式，通过设

表3 3种模型适用场景对比

Tab. 3 Applicable scenarios of the three models

模型	适用场景
虚拟电池模型	内部多为储能装置或柔性负荷的情况
虚拟发电机模型	内部多为风力发电、光伏发电或常规可控机组的情况
虚拟电池模型和虚拟发电机模型结合	既包含储能装置或柔性负荷，又包含风力发电、光伏发电或常规可控机组的情况

立集中调度控制中心来确保对内部分布式能源的最高控制权限，负责调度与信息整合，响应电力系统独立运行商 (independent system operator, ISO) 的调度指令，实现电力系统的最优运行方案。而虚拟电厂内部分布式能源接受调度控制中心的统一调度，并按照要求提交真实的技术信息与经济信息，实现虚拟电厂内部的最优运行方案。综上所述，可构建一个双层优化调度模型。

由于 ISO 无法直接调度虚拟电厂内部的分布式能源，只能调控虚拟电厂的发电总量并校核虚拟电厂发电计划的安全性。所以 ISO 往往会对虚拟电厂内部风光资源的利用率进行考核，并通过分配备用容量来平抑风电、光伏等可再生能源对系统供需平衡的影响。虚拟电厂以 ISO 的集中优化调度方案为基础形成内部分布式能源的经济调度方案并更新发电计划与发电成本信息，ISO 接受信息更新后重新进行集中优化调度，直至两层模型间的虚拟电厂发电计划与发电成本耦合且通过 ISO 安全校核后形成最终发电计划。

上述双层优化调度模型通常采用数学算法或智能启发式算法求解。其中，数学算法求解中由于包含机组的启停变量，因而通常可以转化为含混合整数的线性规划问题进行求解和分析，部分问题模型中由于包含不可线性化的约束条件，则只能定义为含混合整数的非线性规划问题。启发式智能算法主要包括遗传算法^[72]、粒子群算法、退火算法等多种变异算法。

2.2 环境友好型虚拟电厂

虚拟电厂内部包含大量风电机组和光伏电站，是实现电力系统低碳绿色转型的关键。与为电网管理提供辅助服务的虚拟电厂相同，此类虚拟电厂也优先考虑电网的效益，降低电网碳排放量的同时，在一定程度上提高可再生能源的消纳，提高电网运行经济性。现有研究表明，目前国内学者往往采用碳交易模型或碳捕集技术来减少系统的碳排放量。

2.2.1 碳交易模型

碳交易机制被认为是减少碳排放最有效的措施之一，它通过碳交易市场来控制地区的碳排放量，将碳排放造成的环境成本加入到目标函数中，

以达到减排的目的。我国当前电力行业的碳交易机制往往采用基于基准线法的无偿分配模式，根据系统的发电量来决定初始碳排放配额。若需要高于无偿配额的碳排放量，则需要在碳交易市场中购买；反之，若分配到的无偿配额高于实际所需的碳排放量，则可在碳交易市场中出售，并根据当时的碳交易价格获得相应收益。碳交易模型包括以下 2 种模型。

1) 传统碳交易模型：碳价是一个恒定值，不会随碳量的变化而变化，用户参与市场的活力比较低^[73]。

2) 阶梯碳交易模型：采用阶梯碳价，根据实际碳排放量与碳配额差值大小设置不同的碳排放区间，每个区间对应不同的单位碳交易价格，当实际碳排放量与碳配额的差值超过设定的区间时，超出部分的碳排放量的碳交易价格也会增加，差值越大的区间，对应的碳交易价格越高^[74]。

2.2.2 碳捕集技术

通过碳交易市场虽然实现了碳排放在时间上的转移，降低了碳排放成本，但实际碳排放的总量并没有改变。通过改造火电厂，实现碳捕集与封存(carbon capture and storage, CCS)，可以切实减少实际碳排放量，是实现低碳的重要途径。且碳捕集设备可作为虚拟电厂内部的可控负荷，增加了虚拟电厂内部可控设备的比例，提高了虚拟电厂调度的灵活性。

碳捕集流程主要包括吸收、再生和压缩 3 个主要环节^[75-77]。在吸收环节，将烟气通入吸收塔，溶液吸收烟气中的 CO₂ 形成含有大量 CO₂ 的富液；在再生环节，将富液流入再生塔加热，使 CO₂ 和吸收剂受热分离；在压缩环节，将分离后的 CO₂ 经压缩后运输和封存。

再生阶段的热能主要从发电侧抽取一定比例的蒸汽来获取，而吸收环节产生的富液也可通过压缩 CO₂ 后变为贫液，回到吸收塔等待下一轮捕集^[78]。

CCS 技术虽然可吸收火电机组碳排放，但 CCS 技术投资成本高，且传统分流式 CCS 技术由于其 CO₂ 脱附和吸收再生过程需要消耗大量的能源，导致火电机组的实际输出功率显著降低，因此难

以同时兼顾系统低碳和经济性。

3 经济驱动型虚拟电厂

经济驱动型虚拟电厂优先考虑自身利益，与电网存在一定的竞争关系^[79]。由于经济驱动型虚拟电厂无须牺牲自身利益服务其他主体，所以内部分布式能源之间也可以根据自身利益进行竞争^[80-82]。经济驱动型虚拟电厂可分为2类：一类采用集中控制模式，以虚拟电厂作为唯一利益主体，内部分布式能源之间不存在竞争；另一类采用分布式、混合控制模式，内部分布式能源之间存在竞争关系，存在多个利益主体。

3.1 集中控制模式下经济驱动型虚拟电厂

任务驱动型虚拟电厂发电计划是由上级电网调控指令决定，而集中控制模式下经济驱动型虚拟电厂以售电收益最大化或购电成本最小化为目标，独立自主地确定自身的竞标电价或竞标电量。现有电力市场的研究表明，虚拟电厂参与电力市场可根据其容量的大小分为2类：容量较小时，对电力市场出清结果影响较小，是价格接受型虚拟电厂^[83-85]；容量较大时，对电力市场出清结果影响较大，是价格制定型虚拟电厂^[86]。

3.1.1 价格接受型虚拟电厂

价格接受型虚拟电厂会根据事前估计的电力市场出清价格来决定自身购电或售电策略^[87-89]。为保证全部中标，往往会制定售电价低于市场价格或者购电价高于市场价格的策略，以此来实现收益最大或成本最小的目的。经典竞标流程^[90-94]如下。

1) 预测市场电价：高比例可再生能源市场电价波动较大，且存在一定的不确定性，往往采用机器学习来预测电价。

2) 预测可再生能源功率：为减少可再生能源不确定性带来的功率偏差惩罚，采用不确定性区间来表示其变化范围。

3) 建立优化模型：由于虚拟电厂内部和外部都存在不确定性因素，往往采用鲁棒随机优化模型来求解其最大期望净收益。

根据上述竞标流程可知，价格接受型虚拟电厂忽略了其竞标策略对市场出清的影响，存在一

定的偏差。

3.1.2 价格制定型虚拟电厂

价格制定型虚拟电厂与价格接受型虚拟电厂的竞标流程类似，只是在第一步预测市场出清时考虑了自身竞标策略产生的影响^[93]。由于竞标策略与市场出清之间具有非线性相关性，因此竞标决策模型往往比较复杂，根据现有研究表明，可根据竞标方法的不同大致分为以下4类。

1) 基于虚拟电厂自身成本分析的竞标方法

此方法借鉴早期火电厂的竞标策略，在实际边际成本曲线上加上一定的利润率，从而获取虚拟电厂的报价曲线^[94]。首先，尽量让分布式电源在额定状态附近运行，再根据优化目标确定申报电价；其次，以虚拟电厂整体成本最小为目标，确定内部各个分布式能源的功率和成本；最后，在发电成本的基础上，上调一定比例或直接加上利润，作为实际申报价格。

2) 基于虚拟电厂价格配额曲线的竞标方法

此方法先根据历史数据预测电力市场的价格配额曲线，再决定自身的竞标策略^[95-98]。首先，根据市场模拟技术或已有的数据，得到中标电量与出清电价之间的关系曲线，即价格配额曲线；其次，综合考虑不同场景，得到出清电价的概率分布，并建立其期望净收益模型；最后，比较上述不同场景的期望净收益，选取期望净收益最大的竞标策略。

3) 基于模拟竞争对手投标曲线的竞标方法

此方法先根据历史数据预测竞争对手的竞标策略，再决定自身的竞标策略^[99]。首先，初始化虚拟电厂竞标策略；其次，基于历史数据分析竞争对手竞争策略的概率分布；再次，模拟市场出清，建模求解此场景下虚拟电厂的最大期望净收益；最后，不断更新迭代自身竞标策略，直至得到最大期望净收益。由于此方法需要对每一个竞争对手逐个建模，工作量巨大，且存在较大误差，所以没有得到广泛应用。

4) 基于博弈论的竞标方法

此方法采用博弈论，根据电力市场规则与虚拟电厂需求构建博弈模型，求解博弈模型的均衡点，以此作为最佳报价策略^[100-101]。集中控制模式

下的虚拟电厂内部各个分布式能源之间不存在竞争关系，而配电网与虚拟电厂之间属于领导者和跟随者的关系，所以往往会采用 Stackelberg 主从博弈模型来模拟虚拟电厂参与电力市场的情况。

此方法仅适用于完全信息下的电力市场，由于无法保证电力市场中所有的参与者都同意参与博弈，所以存在一定的局限性。

以上4种模型的适用场景对比如表4所示。

表4 4种模型适用场景对比

Tab. 4 Applicable scenarios of the four models

方法	优点	缺点
基于虚拟电厂自身成本分析的竞标方法	算法简单	无法根据市场情况调整报价
基于虚拟电厂价格配额曲线的竞标方法	算法简单	根据历史数据估计,精度较低
基于模拟竞争对手投标曲线的竞标方法	市场竞争力较大	误差较大
基于博弈论的竞标方法	兼顾所有参与者利益	算法复杂,且需其他参与者同意,存在局限性

3.2 分布式/混合控制下经济驱动型虚拟电厂

分布式控制下的虚拟电厂不再设立调度控制中心，各个分布式能源与主动负荷间处于相互独立的松散合作联盟关系。此时，各个分布式能源通过虚拟电厂进行关键数据参数的通信与协调，并基于虚拟电厂提供的数据共享服务来制定运行策略。为了有效提高分布式控制模式下虚拟电厂的竞争力，并同时赋予分布式能源部分自主控制权，虚拟电厂引入了混合控制模式。此模式下，调度控制中心与分布式能源间通过多代理技术进行信息交互，赋予了分布式能源一定的自主性，同时也保证了整体的竞争力和协调性。

与集中控制下虚拟电厂相比，这2种控制模式下虚拟电厂最大的特点就是内部分布式能源之间也存在一定的竞争关系。再结合虚拟电厂外部参与电力市场的竞争关系，可构建一个双层模型，往往采取双层优化或双层博弈的算法来求得虚拟电厂最佳运行方案。双层优化与任务驱动型虚拟电厂相似，所以不再赘述。而虚拟电厂的双层博弈有2种较为常见的情况：一种为电动汽车参与的构建代理聚合商的动态博弈；另一种为主从 Stackelberg 博弈。

3.2.1 构建代理聚合商的动态博弈

由于虚拟电厂内部包含大量具有不确定性的可再生能源，所以虚拟电厂无法实现实时供需平衡，这大大增加了虚拟电厂的运行成本。为尽可能降低虚拟电厂参与电力市场投标竞争的运行成本，上层博弈可在虚拟电厂外部引入代理聚合商 (agent gather business, AGB)^[102]。AGB 由众多代

理商组成，当虚拟电厂缺电时，在 AGB 处购电；当虚拟电厂富电时，在 AGB 处售电。AGB 先基于自身效益动态制定实时电价；虚拟电厂则根据实时电价与内部供需情况动态调整购售电量，优化系统内部出力；最后，AGB 根据虚拟电厂购售电量情况，在电力市场作出购售电策略选择。在此过程中，AGB 与虚拟电厂存在部分利益冲突，且存在先后顺序，虚拟电厂能得知 AGB 制定的动态电价，所以上层博弈采用完全信息动态博弈，虚拟电厂的博弈目标为运行成本最小化，AGB 的博弈目标为收益最大化。

下层博弈为虚拟电厂内部各个分布式能源之间的博弈，为方便协调调度，可将虚拟电厂内部的电动汽车构建成电动汽车聚合商，与虚拟电厂内部其他设备之间构成合作博弈。基于上层博弈均衡解得到的虚拟电厂外购售电量，其作为下层博弈的已知参数，为电动汽车聚合商制定实时充放电电价，电动汽车聚合商根据实时充放电价调整充放电电量，并最终进行利润分配。

Shapley 值法^[103]与核仁法是合作博弈中较为常见的2种利益分配方式。电动汽车聚合商与虚拟电厂之间存在跟随关系，所以两者承担的风险不同，Shapley 值法不考虑成员之间风险分担情况，所以并不适用。而核仁法虽然考虑风险分担，但其以所有人均不反对为目标，很容易造成平均主义的“公平性”，所以也不适用。为中和这2种方法的优缺点，可采用核仁法改进传统 Shapley 值，将2种方法的方案进行加权平均，得到最终的分配方案。

3.2.2 Stackelberg 博弈

根据虚拟电厂的运行原理,可将虚拟电厂看作领导者,而其中包含的各个分布式能源看作跟随者,为保证两者收益均衡,可构建 Stackelberg 博弈模型^[104-106]。

其中,上层虚拟电厂不仅与内部各个分布式能源进行互动,还作为一个整体参与电力市场交易,在双向交互中以自身利润最大化作为目标。而下层各个分布式能源根据虚拟电厂发布的实时电价,追求效用与成本的平衡。

4 混合驱动型虚拟电厂

混合驱动型虚拟电厂既考虑个体利益又考虑群体利益,最常见的即为以碳排放量最小和运行成本最低为目标的虚拟电厂^[107-108],也有少量虚拟电厂以辅助电网调峰和运行成本最低为目标^[109]。求解混合驱动虚拟电厂的最佳运行方案是一个多目标优化问题,根据现有研究可知,往往引入碳排放惩罚、调峰惩罚来解决多目标问题,有些研究忽略虚拟电厂内部各单元的收益,主要考虑整体收益的最大化^[110-111],也有些研究着重考虑虚拟电厂内部各单元的收益均衡^[112]。

4.1 考虑整体收益的虚拟电厂

考虑整体利益的虚拟电厂往往采用优化算法求解,忽略虚拟电厂内部各单元的利益,求得虚拟电厂整体的最佳运行方案。目前此类研究中,较多是模型创新,主要针对不同背景下的特定情况建模,再根据所建模型,采用合适的算法进行求解。

随着综合能源系统的发展,包含耦合设备的虚拟电厂受到了越来越多的关注,且综合能源系统模型较为复杂且多变,所以有很多学者针对不同情况下的虚拟电厂进行研究^[109]。对于综合能源系统来说,可在引入碳捕集技术的同时引入风电供热设备,两者联合运行,可实现热发电机组的“热电解耦”,不但可以降低系统运行成本,还可以促进可再生能源消纳,降低系统碳排放量。还有些研究将碳捕集技术与电转气技术相结合,增加了模型的复杂度,建立阶梯碳交易模型,以碳交易成本、购气和煤耗成本、碳封存成本、机组

启停成本和弃风成本之和最低为目标函数,采用 MATLAB 调用 CPLEX 和粒子群算法进行求解。

除了以上模型创新的研究外,还有少数研究是针对算法创新的。文献[111]在碳捕集技术与电转气技术相结合的基础上,引入垃圾焚烧电厂、风电机组和光伏电站,利用不同电源的能量资源在能量/功率上的时空互补性,平抑可再生能源出力波动和提升可再生能源消纳能力。但这些能源的引入使模型变得更加复杂,具有高维非线性特点,采用常规优化算法求解难以满足在寻优深度和精度上的需求,因此便将复合微分进化算法与反余切函数特性相结合,形成新型反余切复合微分进化算法。

4.2 考虑各单元收益的虚拟电厂

考虑各单元收益的虚拟电厂往往采用博弈论求均衡解,针对虚拟电厂整体利益和内部各单元利益之间的冲突进行研究。此类虚拟电厂部分经济驱动型虚拟电厂都采用了博弈论的相关知识,其间最大的差别为,此类虚拟电厂将“减少碳排放”与“调峰调频”等公益性目标以经济惩罚的方式引入目标函数,在为电厂提供辅助服务的同时达到经济利益的最大化。

根据虚拟电厂的结构,可构建一个以虚拟电厂为领导者、其内部各个单元为跟随者的 Stackelberg 博弈模型,参与电-碳联合市场交易。其中,虚拟电厂以其整体的综合收益最大为目标,而内部各个单元可分为供能侧和用户侧,供能侧以其自身收益最大为目标,用户侧以消费者剩余最大为目标。由此便构成存在信息互不透明的竞争关系,采用二次规划嵌入差分进化算法进行求解,并将结果反馈给虚拟电厂,虚拟电厂根据反馈计算自身收益,再重新定价,以此循环迭代,直至达到均衡。还有些文献针对多个虚拟电厂进行研究,文献[112]采用联盟博弈,构建多个虚拟电厂联盟,考虑用户不满意度,引入阶梯式碳价,采用合并-分裂规则的博弈算法进行求解。

5 结论

虚拟电厂在能源系统中的应用已取得显著进展,并为实现能源转型和低碳融合作出了重要贡

献。然而，对虚拟电厂的研究仍然具有许多值得深入探索的方面。

1) 人工智能技术在虚拟电厂领域有广阔的应用前景。从 Alpha Go 到大模型 ChatGPT，人工智能技术对各行各业产生了深远影响，尤其在数据分析处理方面日益强大。将人工智能技术与虚拟电厂结合，可实现更智能、便捷的运维管理，提升虚拟电厂运行效率和管理水平，促进电网安全稳定运行。然而，人工智能的应用也面临挑战和风险。数据隐私和安全需妥善解决，确保虚拟电厂信息不被非法获取和滥用。同时，应克服技术复杂性和高成本，确保虚拟电厂的应用具有良好的经济效益和可持续性。

2) 在虚拟电厂中平衡调峰调频任务与自身收益之间的矛盾至关重要。通过一些引导、激励或惩罚等间接手段确定虚拟电厂运行策略，可以充分考虑用户偏好满意度，更好地平衡这两者的关系。具体而言，可以利用实时电价，引导虚拟电厂中的柔性负荷进行调节，激励发电和储能设备代理商招标竞价参与电力市场，从而增强虚拟电厂的市场竞争力，并提高调峰调频的可行性。

3) 虚拟电厂对“双碳”目标的贡献令人期待。尽管虚拟电厂在减少碳排放方面已经取得了一定成效，但目前采用的碳捕集技术和碳交易模型算法还不够贴合实际情况，大多数仍采用碳惩罚机制，这在社会公平、产业竞争力、治理监督等方面存在较大难题，因此在实际执行方面仍需要进一步研究。

综上所述，虚拟电厂是推动能源系统融合和实现低碳目标的关键，在未来有着广阔的应用前景。虚拟电厂在提高可再生能源消纳水平方面的贡献，其结合人工智能为电网提供调峰调频等辅助服务，以及其参与电力市场在集中市场、P2P 市场和分布式交易市场下的价值体现等，都将会成为未来的研究热点。进一步深入研究虚拟电厂的建模、优化和市场参与策略，将有助于推动虚拟电厂技术的快速发展和广泛应用，实现能源系统向低碳融合的转型目标。在未来的能源转型中，虚拟电厂必将扮演日益重要的角色，为实现可持续发展作出积极贡献。

参考文献

- [1] 肖白, 周文凯, 姜卓, 等. 泛在电力物联网研究现状分析[J]. 发电技术, 2020, 41(1): 88-93.
XIAO B, ZHOU W K, JIANG Z, et al. Analysis of research status for ubiquitous power Internet of things[J]. Power Generation Technology, 2020, 41(1): 88-93.
- [2] 谭忠富, 李云峰. 碳中和目标下以新能源为主体的新型电力系统体系构建[J]. 中国电力企业管理, 2021(34): 52-53.
TAN Z F, LI Y F. Construction of a new power system system with new energy as the main body under the goal of carbon neutralization[J]. China Power Enterprise Management, 2021(34): 52-53.
- [3] 宋永华, 包铭磊, 丁一, 等. 新电改下我国电力现货市场建设关键要点综述及相关建议[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10): 3172-3186.
SONG Y H, BAO M L, DING Y, et al. Review of Chinese electricity spot market key issues and its suggestions under the new round of Chinese power system reform[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3172-3186.
- [4] 印欣, 张锋, 阿地利·巴拉提, 等. 新型电力系统背景下电热负荷参与实时调度研究[J]. 发电技术, 2023, 44(1): 115-124.
YIN X, ZHANG F, ADILI B, et al. Study on participation of electricity-driven thermal load in real-time scheduling of new power system[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(1): 115-124.
- [5] 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.
- [6] 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 Z N, YU S, SUN G Q, et al. Concept and development of virtual power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [7] MASHHOUR E, MOGHADDAS-TAFRESHI S M. Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets: part i: problem formulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 949-956.
- [8] 李杰, 刘家豪, 汪金辉, 等. 基于FSJ的火灾安全学术地图研究[J]. 消防科学与技术, 2019, 38(12): 1760-1765.
LI J, LIU J H, WANG J H, et al. Academic map of fire safety science based on the fire safety journal[J]. Fire

- Science and Technology, 2019, 38(12): 1760-1765.
- [9] 孙秋野, 王一帆, 杨凌霄, 等. 比特驱动的瓦特变革: 信息能源系统研究综述[J]. 自动化学报, 2021, 47(1): 50-63.
- SUN Q Y, WANG Y F, YANG L X, et al. Bit-driven watt revolution: a review of cyber energy system [J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(1): 50-63.
- [10] 白雪岩, 樊艳芳, 王天生, 等. 计及可再生能源可靠性的虚拟电厂动态聚合方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 102-110.
- BAI X Y, FAN Y F, WANG T S, et al. Dynamic aggregation method of virtual power plants considering reliability of renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 102-110.
- [11] 林固静, 高赐威, 宋梦, 等. 含通信基站备用储能的虚拟电厂构建及调度方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 99-107.
- LIN G J, GAO C W, SONG M, et al. Construction and dispatch method of virtual power plant with backup energy storage in communication base stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 99-107.
- [12] 赵婷婷, 吴刚勇, 夏祥武, 等. 基于共享储能容量分配机制的配电网双层优化策略[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(7): 50-63.
- ZHAO T T, WU G Y, XIA X W, et al. The two-layer optimization strategy of distribution network based on the capacity allocation mechanism of shared energy storage[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(7): 50-63.
- [13] 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.
- [14] 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 J Q, WANG Y, GUO X H, 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.
- [15] 张涛, 李逸鸿, 郭玥彤, 等. 考虑虚拟电厂调度方式的售电公司多时间尺度滚动优化[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 79-87.
- ZHANG T, LI Y H, GUO Y T, et al. Multi-time scale rolling optimization of electricity retailers considering virtual power plant scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 79-87.
- [16] LIANG H, MA J. Data-driven resource planning for virtual power plant integrating demand response customer selection and storage[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(3): 1833-1844.
- [17] WANG Y, AI X, TAN Z, 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.
- [18] HUANG H. Blockchain-enabled carbon and energy trading for network-constrained coal mines with uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(3): 1634-1647.
- [19] YANG D C, HE S W, CHEN Q Y, et al. Bidding strategy of a virtual power plant considering carbon-electricity trading[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(3): 306-314.
- [20] 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.
- [21] 屠盛春, 刘晓春, 张皓. 上海市黄浦区商业建筑虚拟电厂典型应用[J]. 电力需求侧管理, 2020, 22(1): 52-57.
- TU S C, LIU X C, ZHANG H. Typical implementation of commercial building virtual power plant in Huangpu district of Shanghai[J]. Power Demand Side Management, 2020, 22(1): 52-57.
- [22] 王宣元, 高洪超, 张浩, 等. 面向新型电力系统的灵活资源聚合技术应用场景分析及建设启示[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(1): 73-80.
- WANG X Y, GAO H C, ZHANG H, et al. Analysis and enlightenment of aggregation technology application scenarios of flexible distributed energy resources oriented to new power system[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(1): 73-80.
- [23] 洪媛, 黄亮, 谢长君, 等. 基于边缘计算的虚拟电厂架构及光伏出力预测算法研究[J]. 湖北电力, 2020, 44(1): 26-34.
- HONG Y, HUANG L, XIE C J, et al. Research on virtual power plant architecture and photovoltaic output

- prediction algorithm based on edge computing[J]. Hubei Electric Power, 2020, 44(1): 26-34.
- [24] 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): 604-618.
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): 604-618.
- [25] 陈新和, 裴玮, 邓卫, 等. 数据驱动的虚拟电厂调度特性封装方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4816-4828.
CHEN X H, PEI W, DENG W, et al. Data-driven virtual power plant dispatching characteristic packing method[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4816-4828.
- [26] 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 L T, CHENG L, GUO J B, 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.
- [27] 王泉, 何怡刚, 马恒瑞, 等. 面向电网辅助服务的虚拟储能电厂分布式优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 181-188.
WANG X, HE Y G, MA H R, et al. Distributed optimization control method of virtual energy storage plants for power grid ancillary services[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 181-188.
- [28] MÜLLER F L, SZABÓ J, SUNDSTRÖM O, et al. Aggregation and disaggregation of energetic flexibility from distributed energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 2(10): 1205-1214.
- [29] 王芬, 李志勇, 邵洁, 等. 虚拟电厂自组织聚合运行调度方法[J]. 电力建设, 2021, 42(4): 79-88.
WANG F, LI Z Y, SHAO J, et al. Self-organizing aggregation operation scheduling method for virtual power plant[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(4): 79-88.
- [30] 汪洋叶, 赵力航, 常伟光, 等. 基于模型预测控制的虚拟电厂储能系统能量协同优化调控方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(7): 16-22.
WANG Y Y, ZHAO L H, CHANG W G, et al. Model predictive control based energy collaborative optimization control method for energy storage system of virtual power plant[J]. Smart Power, 2021, 49(7): 16-22.
- [31] 吴静. 分布式资源聚合虚拟电厂多维交易优化模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
WU J. Research on multi-dimensional transaction optimization model of distributed resource aggregation virtual power plant[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [32] 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 X X, FU Z Y, XU F, 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.
- [33] 康凯, 史振宇, 鲍忠伟, 等. 计及碳排放配限额的虚拟电厂多目标风险规避优化模型[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(3): 14.
KANG K, SHI Z Y, BAO Z W, et al. Multi-objective risk avoidance optimization model for virtual power plants considering the carbon emission allowance [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(3): 14.
- [34] 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): 15-27.
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): 15-27.
- [35] 王永真, 康利改, 张靖, 等. 综合能源系统的发展历史、典型形态及未来趋势[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 84-95.
WANG Y Z, KANG L G, ZHANG J, et al. Development history, typical form and future trend of integrated energy system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(8): 84-95.
- [36] 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 W G, SONG J, GUO M X, 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.
- [37] 李鹏, 余晓鹏, 张艺涵, 等. 计及碳捕集和电转气的农村虚拟电厂多目标随机调度优化模型[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 24-36.
LI P, YU X P, ZHANG Y H, et al. Multi-objective

- stochastic scheduling optimization model for rural virtual power plant considering carbon capture and power-to-gas[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(7): 24-36.
- [38] 张文煜, 徐晓川, 沈宇, 等. 考虑可聚合资源的虚拟电厂低碳联合交易优化策略研究[J/OL]. *现代电力*: 1-14[2023-06-23]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0326>.
- ZHANG W Y, XU X C, SHEN Y, et al. Research on optimization strategy of low-carbon joint transaction in virtual power plant considering aggregable resources [J/OL]. *Modern Electric Power*: 1-14[2023-06-23]. <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0326>.
- [39] DU E S, ZHANG N, HODGE B M, et al. Operation of a high renewable penetrated power system with CSP plants: a look-ahead stochastic unit commitment model [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(1): 140-151.
- [40] 彭院院, 周任军, 李斌, 等. 计及光热发电特性的光-风-火虚拟电厂双阶段优化调度[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(4): 21-28.
- PENG Y Y, ZHOU R J, LI B, et al. Two-stage optimal dispatching for solar-wind-thermal virtual power plant considering characteristic of concentrating solar power[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(4): 21-28.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 孙秋野, 胡杰, 胡旌伟, 等. 中国特色能源互联网三网融合及其“自-互-群”协同管控技术框架[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 40-51.
- SUN Q Y, HU J, HU J W, et al. Triple play of energy Internet with Chinese characteristics and its self-mutual-group collaboration control technology framework[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 40-51.
- [44] YANG L, SUN Q Y, ZHANG N, et al. Indirect multi-energy transactions of energy internet with deep reinforcement learning approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(5): 4067-4077.
- [45] HUANG Y, SUN Q Y, ZHANG N, et al. A multi-slack bus model for bi-directional energy flow analysis of integrated power-gas systems[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2021, 4: 1-10.
- [46] 何颖源, 陈永翀, 刘勇, 等. 储能的度电成本和里程成本分析[J]. *电工电能新技术*, 2019, 38(9): 1-10.
- HE Y Y, CHEN Y C, LIU Y, et al. Analysis of cost per kilowatt-hour and cost per mileage for energy storage technologies[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2019, 38(9): 1-10.
- [47] 王珂, 姚建国, 姚良忠, 等. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(20): 127-135.
- WANG K, YAO J G, YAO L Z, et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(20): 127-135.
- [48] 夏叶, 康重庆, 宁波, 等. 用户侧互动模式下发用电一体化调度计划[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(1): 17-23.
- XIA Y, KANG C Q, NING B, et al. A generation and load integrated scheduling on interaction mode on customer side[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(1): 17-23.
- [49] 乔奕炜, 王冬容. 我国虚拟电厂的建设发展与展望[J]. *中国电力企业管理*, 2020(22): 58-61.
- QIAO Y W, WANG D R. Construction, development and prospect of virtual power plant in China[J]. *China Power Enterprise Management*, 2020(22): 58-61.
- [50] 赵昊天, 王彬, 潘昭光, 等. 支撑云-群-端协同调度的多能园区虚拟电厂: 研发与应用[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(5): 111-121.
- ZHAO H T, WANG B, PAN Z G, et al. Research and application of park-level multi-energy virtual power plants supporting cloud-cluster-end multi-level synergetic dispatch[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(5): 111-121.
- [51] 王宣元, 刘蓁. 虚拟电厂参与电网调控与市场运营的发展与实践[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(18): 158-168.
- WANG X Y, LIU Z. Development and practice of virtual power plant participating in power grid regulation and market operation[J]. *Automation of Electric Power*

- Systems, 2022, 46(18): 158-168.
- [52] 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): 933-943.
GUAN S F, WANG X, JIANG C W, 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): 933-943.
- [53] 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 G L, SU W F. Virtual power plants providing AGC FM service considering uncertainty of electric vehicles[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2538-2548.
- [54] KORAKI D, STRUNZ K. Wind and solar power integration in electricity markets and distribution networks through service-centric virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 473-485.
- [55] 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): 37-55.
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): 37-55.
- [56] BABAEI S, ZHAO C, FAN L. A data-driven model of virtual power plants in day-ahead unit commitment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5125-5135.
- [57] QU M, DING T, WEI W, et al. An analytical method for generation unit aggregation in virtual power plants[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 5466-5469.
- [58] TRANGBAEK K, PETERSEN M, BENDTSEN J, et al. Exact power constraints in smart grid control[C]// 2011 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference. Orlando, FL, USA: IEEE, 2011: 1250-1262.
- [59] BAROT S, TAYLOR J A. A concise, approximate representation of a collection of loads described by polytopes[EB/OL]. (2014-11-29)[2023-06-23]. <https://arxiv.org/abs/1412.0939>.
- [60] MÜLLER F L, SUNDSTRÖM O, SZABÓ J, et al. Aggregation of energetic flexibility using zonotopes[C]// 2015 54th IEEE Conference on Decision and Control. Osaka, Japan: IEEE, 2015: 15787936.
- [61] ZHAO L, ZHANG W, HAO H, et al. A geometric approach to aggregate flexibility modeling of thermostatically controlled loads[EB/OL]. (2016-08-25) [2023-06-23]. <https://arxiv.org/abs/1608.04422>.
- [62] YI Z, XU Y, GU W, YANG L, et al. Aggregate operation model for numerous small-capacity distributed energy resources considering uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5): 4208-4224.
- [63] YI Z, XU Y, GU W, et al. A multi-time-scale economic scheduling strategy for virtual power plant based on deferrable loads aggregation and disaggregation [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(3): 1332-1346.
- [64] MADJIDIAN D, ROOZBEHANI M, DAHLEH M A. Energy storage from aggregate deferrable demand : fundamental trade-offs and scheduling policies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3573-3586.
- [65] XU Z W, DENG T H, HU Z C, et al. Data-driven pricing strategy for demand-side resource aggregators[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(1): 57-66.
- [66] XU Z W, HU Z C, SONG Y H, et al. Risk-averse optimal bidding strategy for demand-side resource aggregators in day-ahead electricity markets under uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 96-105.
- [67] HUGHES J T, DOMÍNGUEZ-GARCÍA A D, Poolla K. Identification of virtual battery models for flexible loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 4660-4669.
- [68] HAO H, SANANDAJI B M, POOLLA K, et al. Aggregate flexibility of thermostatically controlled loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1): 189-198.
- [69] CHEN X, DALL'ANESE E, ZHAO C, et al. Aggregate power flexibility in unbalanced distribution systems[EB/OL]. (2018-12-14) [2023-06-23]. <https://arxiv.org/abs/1812.05990>.
- [70] ZHAO H T, WANG B, WANG X Y, et al. Active dynamic aggregation model for distributed integrated energy system as virtual power plant[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020, 8(5): 831-840.
- [71] WANG S Y, WU W C. Aggregate flexibility of virtual power plants with temporal coupling constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5043-5051.

- [72] 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): 2295-2301.
ZHANG G, WANG X, JIANG C W, et al. Economic analysis of virtual power plants based on bi-level optimization dispatch[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2295-2301.
- [73] 刘祚宇, 齐峰, 文福拴, 等. 含电动汽车虚拟电厂参与碳交易时的经济与环境调度[J]. 电力建设, 2017, 38(9): 45-52.
LIU Z Y, QI F, WEN F S, et al. Economic and environmental dispatching in electric vehicles embedded virtual power plants with participation in carbon trading [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(9): 45-52.
- [74] 潘崇超, 侯孝旺, 金泰, 等. 计及阶梯碳交易和可再生能源不确定性的综合能源系统低碳研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-12[2023-06-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220704.0923.002.html>.
PAN C C, HOU X W, JIN T, et al. Combined heat and power optimization for virtual power plants considering carbon capture technologies[J/OL]. Electrical Measurement and Instrumentation. Distributed Energy: 1-12[2023-06-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220704.0923.002.html>.
- [75] 赵泽明, 刘敏. 考虑碳捕集技术的虚拟电厂热电联合优化[J]. 分布式能源, 2023, 8(1): 30-38.
ZHAO Z M, LIU M. Combined heat and power optimization for virtual power plants considering carbon capture technologies[J]. Distributed Energy, 2023, 8(1): 30-38.
- [76] 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): 4441-4448.
YUAN G L, LIU H Q, YU J F, 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): 4441-4448.
- [77] GUO X S, LOU S H, YAO W, et al. Low-carbon operation of combined heat and power integrated plants based on solar-assisted carbon capture[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(5): 1138-1151.
- [78] 刘文毅, 唐宝强, 徐钢, 等. 大规模碳捕集电站贫液CO₂负载率优化研究[J]. 动力工程学报, 2015, 35(1): 76-82.
LIU W Y, TANG B Q, XU G, et al. Optimization on lean solvent CO₂ loading in coal-fired power plants with large-scale CO₂ capture[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(1): 76-82.
- [79] AL-AWAMI A T, AMLEH N A, MUQBEL A M. Optimal demand response bidding and pricing mechanism with fuzzy optimization: application for a virtual power plant[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(5): 5051-5061.
- [80] 申洪涛, 陶鹏, 高玲玲, 等. 多能互补下虚拟电厂参与电力市场的思考[J]. 电测与仪表, 2022, 59(8): 66-72.
SHEN H T, TAO P, GAO L L, et al. Consideration of virtual power plant in the electricity market with multi-energy complement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(8): 66-72.
- [81] 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.
- [82] CHEN W, QIU J, ZHAO J, et al. Bargaining game-based profit allocation of virtual power plant in frequency regulation market considering battery cycle life[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 2913-2928.
- [83] 李杨, 刘伟佳, 文福拴, 等. 电转气设备与燃气机组的联合竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 9-17.
LI Y, LIU W J, WEN F S, et al. Combined bidding strategies between power-to-gas facilities and natural gas generating units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 9-17.
- [84] 闫园, 林鸿基, 文福拴, 等. 考虑电价和碳价间Copula风险依赖的虚拟电厂竞标策略[J]. 电力建设, 2019, 40(11): 106-115.
YAN Y, LIN H J, WEN F S, et al. Bidding strategy of a virtual power plant considering copula risk dependence of electricity and carbon prices[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(11): 106-115.
- [85] 韩志永, 张宇华, 李兵. 基于多场景技术的冷热电虚拟电厂两阶段优化调度[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 174-180.
HAN Z Y, ZHANG Y H, LI B. Two-stage optimal dispatching of CCHP virtual power plant based on multi-scenario technology[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 174-180.
- [86] 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.
- [87] VASIRANI M, KOTA R, CAVALCANTE R L G, et al. An agent-based approach to virtual power plants of wind power generators and electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1314-1322.
- [88] NGUYEN H T, LE L B, WANG Z. A bidding strategy for virtual power plants with the intraday demand response exchange market using the stochastic programming[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3044-3055.
- [89] ZHAO Q, SHEN Y, LI M. Control and bidding strategy for virtual power plants with renewable generation and inelastic demand in electricity markets [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(2): 562-575.
- [90] 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.
- YU S, WEI Z N, SUN G Q, et al. A bidding model for a virtual power plant considering uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(22): 43-49.
- [91] 孙国强, 袁智, 许晓慧, 等. 碳排放约束下虚拟电厂鲁棒优化竞标模型[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 97-103.
- SUN G Q, YUAN Z, XU X H, et al. Bidding model based on robust optimization for virtual power plant under carbon emission constraint[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 97-103.
- [92] RAHIMIYAN M, BARINGO L. Strategic bidding for a virtual power plant in the day-ahead and real-time markets: a price-taker robust optimization approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2676-2687.
- [93] GAZIJAHANI F S, SALEHI J. IGDT-based complementarity approach for dealing with strategic decision making of price-maker VPP considering demand flexibility[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(4): 2212-2220.
- [94] 何莉, 廖家平, 王淑青, 等. 发电企业基于成本分析的现货市场报价策略[J]. 中国水运, 2011, 11(2): 49-50.
- HE L, LIAO J P, WANG S Q, et al. Spot market quotation strategy of power generation enterprises based on cost analysis[J]. China Water Transport, 2011(2): 49-50.
- [95] SONG M, AMELIN M. Price-maker bidding in day-ahead electricity market for a retailer with flexible demand[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1948-1958.
- [96] 王德昊, 王颖, 曹荣章, 等. 基于价格配额曲线的售电商投标策略优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(17): 108-116.
- WANG D H, WANG Y, CAO R Z, et al. Price quota curve based optimization of bidding strategy for electricity retailers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(17): 108-116.
- [97] SHAFIEE S, ZAREIPOUR H, KNIGHT A M. Developing bidding and offering curves of a price-maker energy storage facility based on robust optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 650-660.
- [98] KOHANSAL M, MOHSENIAN-RAD H. Price-maker economic bidding in two-settlement pool-based markets: the case of time-shiftable loads[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 695-705.
- [99] 艾欣, 周树鹏, 赵阅群. 含虚拟发电厂的电力系统优化运行与竞价策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23): 6351-6362.
- AI X, ZHOU S P, ZHAO Y Q. Research on optimal operation and bidding strategy of power system with virtual power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6351-6362.
- [100] 周博, 吕林, 高红均, 等. 多虚拟电厂日前鲁棒交易策略研究[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2694-2703.
- ZHOU B, LÜ L, GAO H J, et al. Robust day-ahead trading strategy for multiple virtual power plants[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2694-2703.
- [101] 刘一欣, 郭力, 王成山. 多微电网参与下的配电侧电力市场竞价博弈方法[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2469-2476.
- LIU Y X, GUO L, WANG C S. Optimal bidding strategy for microgrids in electricity distribution market [J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2469-2476.
- [102] 谭忠富, 谭彩霞, 蒲雷, 等. 基于协同免疫量子粒子群优化算法的虚拟电厂双层博弈模型[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 9-17.
- TAN Z F, TAN C X, PU L, et al. Two-layer game model of virtual power plant applying CIQPSO algorithm[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 9-17.

- [103] 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(S2): 585-595.
MA X F, YU S Y, ZHU S J, et al. Profit allocation to virtual power plant members based on improved multifactor shapley value method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(S2): 585-595.
- [104] 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 Y, WANG X L, WANG J X, et al. Virtual power plant energy sharing mechanism based on stackelberg game[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4556-4564.
- [105] 董雷, 涂淑琴, 李焯, 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 L, TU S Q, LI Y, 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.
- [106] 方燕琼, 甘霖, 艾芊, 等. 基于主从博弈的虚拟电厂双层竞标策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 61-69.
FANG Y Q, GAN L, AI Q, et al. Stackelberg game based bi-level bidding strategy for virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 61-69.
- [107] 周任军, 孙洪, 唐夏菲, 等. 双碳量约束下风电-碳捕集虚拟电厂低碳经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(6): 1675-1683.
ZHOU R J, SUN H, TANG X F, et al. Low-carbon economic dispatch based on virtual power plant made up of carbon capture unit and wind power under double carbon constraint[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(6): 1675-1683.
- [108] 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 W Z, HUANG S Y, CUI Y, et al. W-S-C capture coordination in virtual power plant considering source-load uncertainty[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3424-3432.
- [109] 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): 1-7.
LI J M, AI Q. Operation mode of virtual power plant considering peak regulation auxiliary service[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 1-7.
- [110] GIUNTOLI M, POLI D. Optimized thermal and electrical scheduling of a large scale virtual power plant in the presence of energy storages[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(2): 942-955.
- [111] 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): 3534-3544.
SUN H J, LIU Y, PENG C H, 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): 3534-3544.
- [112] 侯昊宇, 葛晓琳, 曹旭丹. 考虑碳交易的多虚拟电厂联盟博弈优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(3): 77-85.
HOU H Y, GE X L, CAO X D. Coalition game optimization method for multiple virtual power plants considering carbon trading[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(3): 77-85.

收稿日期: 2023-08-25。

作者简介:



孙秋野

孙秋野(1977), 男, 博士, 教授, 研究方向为能源互联网的建模与优化运行、多能源综合互补优化、分布式发电系统网络控制等, sunqiuye@sut.edu.cn;



姚葭

姚葭(1997), 女, 博士研究生, 研究方向为综合能源系统稳定性等, yaojia_neu@foxmail.com;



王一帆

王一帆(1994), 男, 博士研究生, 研究方向为综合能源系统建模与优化控制、多智能体强化学习等, effortking@163.com。

(责任编辑 辛培裕)