



市场环境下灵活性资源虚拟电厂聚合 调控关键技术综述

仪忠凯¹, 侯朗博¹, 徐英¹, 吴永峰¹, 李志民¹, 吴俊飞², 冯腾³, 韩柳³

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 国网浙江省电力有限公司 衢州供电公司, 浙江 衢州 324000; 3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 灵活性资源技术快速发展、数量与日俱增, 为提升电力系统灵活性和经济效益提供了巨大潜力。虚拟电厂通过对海量异构灵活性资源协调管理和聚合调控, 为支撑海量异构分散式资源参与电力市场交易提供了有效手段。针对电力市场环境下虚拟电厂中多元海量异构灵活性资源的难以高效管控、不同运营主体之间存在效益冲突、能量和辅助服务之间具有耦合关系等问题, 对电力市场环境下灵活性资源虚拟电厂全链路运营过程中面临的技术挑战、当前研究进展和未来攻关方向进行了分析和总结。从灵活性资源虚拟电厂的聚合建模、竞标报价、运行控制 3 方面展开分析, 对相关主流技术方法的模型特征、关联关系和适用场景进行了系统性归纳, 以此全面认识电力市场环境下灵活性资源虚拟电厂涉及的关键科学问题、核心理论方法和主流技术方案等, 为灵活性资源虚拟电厂的未来研究方向和技术发展提供建议。

关键词: 电力市场; 虚拟电厂; 灵活性资源; 聚合建模; 竞标报价; 运行控制

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202409025

0 引言

分散式储能、充电桩、暖通负荷等种类多样、位置分散、形式泛在的灵活性资源规模与日俱增。以充电桩为例, 截至 2023 年底, 中国充电基础设施累计数量为 859.6 万台, 同比增加 65%^[1]。伴随着中国终端用能电气化进程稳步推进和智能终端的发展, 海量分散式灵活性资源逐渐能被电力系统实时感知和柔性控制, 蕴含巨大调节潜力^[2], 具备了提高电力系统柔性、参与电力系统调度和实现从“源随荷动”到“源荷互动”的客观条件^[3]。

为有效挖掘海量分散式灵活性资源的调控潜力, 虚拟电厂 (virtual power plant, VPP) 技术应运而生^[4-5]。相比传统电厂, 虚拟电厂是连接灵活性资源与电力系统的中间纽带, 通过对厂内灵活性资源的协调管理, 利用不同种类设备的各自优

势, 整体对外提供诸如能量平衡、电压支撑、调频备用、阻塞管理等多类服务^[6]。大量研究结果表明, 虚拟电厂技术一方面能促进灵活性资源降本增效, 另一方面能有效提升电力系统运行灵活性和经济性^[7-8]。因此, 随着中国电力体制改革深度推进和电力市场快速发展, 灵活性资源虚拟电厂展现出巨大的应用潜力, 为激活海量分散式小容量灵活性资源提供了技术手段和有效支撑。

近年来, 国家发展改革委、能源局等陆续发布多条重要指导意见, 提出健全适应新型电力系统的市场机制和完善电力需求响应机制, 推动能源领域碳减排, 做好碳达峰碳中和工作。在《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》中, 明确鼓励支持虚拟电厂运营商参与电力市场交易和系统运行调节。

针对如何利用虚拟电厂技术激活和利用电力系统中多元化灵活性资源的潜力, 国内外已展开大量研究。现有虚拟电厂领域的综述从技术实施框架^[9]、市场运营模式^[10]、优化调度方法^[11]、运营管理策略^[12]、信息互通机制^[13]、云边协同模式^[14]等多个方面进行了梳理和总结。然而, 针对含大规模、小容量、分散式灵活性资源的虚拟电

收稿日期: 2024-09-09; **修回日期:** 2024-10-23。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目 (适应虚拟电厂聚合的配电网二次系统规划设计技术研究, 5400-202419183A-1-1-ZN)。



厂，目前尚缺乏其在电力市场环境全链路运营调控方法的系统性综述。

通过对国内外典型示范工程和先驱案例的分析和总结可知，海量分散式灵活性资源虽然蕴含巨大灵活性调控潜力，但是难以直接参与电力系统调控和电力市场交易，具体有以下原因。首先，若数量巨大、种类繁杂的灵活性资源直接参与上级电力系统调控和电力市场交易，电力系统将面临高维复杂的计算难题、故障频发的通讯问题和纷乱繁琐的管理任务，这将给电力系统运营管理者带来巨大风险和负担^[15-16]；其次，灵活性资源的价格激励和补偿机制不成熟，虚拟电厂、电力市场交易中心和灵活性资源等多主体之间存在利益冲突、难以协调匹配^[17-22]；此外，国内外主流电力市场运营商均对市场参与者设置了市场准入条件和设备容量门槛值，小规模灵活性资源往往无法达到参与电力市场交易的条件^[23]。因此，如何有效释放灵活性资源的调控潜力，统筹优化多种能源形式的供应和消费，并通过与电力市场互动创造更大价值，亟须研究与之匹配的技术方法。

鉴于此，为助力学术界研究人员和产业界工程设计人员对灵活性资源虚拟电厂领域进行整体宏观把握，本文将对电力市场环境下灵活性资源虚拟电厂全链路运营过程中面临的技术挑战、当前研究进展和未来攻关方向进行分析和总结，对灵活性资源虚拟电厂的聚合建模、竞标报价、运行控制 3 个领域的技术进展开展综述，将相关主流技术方法的模型特征、关联关系和适用场景进行了系统性归纳，以期全面认识电力市场环境下灵活性资源虚拟电厂涉及的关键科学问题、核心理论方法和主流技术方案。

1 市场环境下灵活性资源虚拟电厂的技术体系和技术挑战

1.1 市场环境下灵活性资源虚拟电厂技术体系

针对电力市场环境下的虚拟电厂技术已经开展了大量研究和综述工作，涉及虚拟电厂聚合建模、竞标报价、运行控制等多个方面。文献^[9]提出了数字孪生虚拟电厂的概念，深入阐述数字孪生虚拟电厂的内涵、架构和特征。文献^[10]围

绕虚拟电厂与需求响应互动的商业机制与市场运营模式，介绍了需求响应参与虚拟电厂运营的参与方式、组织框架、市场竞价策略以及博弈方法的研究进展。文献^[18]系统梳理了规模化灵活性资源虚拟电厂的理论框架，从资源运行特性、分层互动机理和虚拟电厂动态聚合等方面分析了分布式资源聚合互动调控的技术瓶颈。文献^[19]从区块链的角度分析了虚拟电厂参与电力系统优化调度的关键技术，阐述了不同链下的虚拟电厂运营策略。文献^[20]分析了博弈论在协调虚拟电厂和分布式能源方面的优势，从合作博弈和非合作博弈 2 方面综述当前研究进展。文献^[21]探讨了虚拟电厂参与电力市场的收益分配问题，详细对比了主从博弈、Shapley 值、竞价机制等对虚拟电厂中各主体运营效益的影响。然而，针对含大规模、小容量、分散式灵活性资源的虚拟电厂，目前尚缺乏对其在电力市场环境中技术方法的系统性综述。现有灵活性资源虚拟电厂示范项目初步实现了理论方法向实践应用的跨越，验证了虚拟电厂技术在实现降本增效、削峰填谷、缓解阻塞、降低电价等方面的优势，为虚拟电厂从起步阶段向推广阶段的过渡提供了先导性参考案例。在一系列示范工程和专题研究的牵引下，虚拟电厂与电力市场的基本互动模式已初步形成，其代表性虚拟电厂示范项目的建设和分布情况详见文献^[24-27]。

值得注意的是，虚拟电厂技术发展趋势在国内外存在差异，这些差异主要受国内外能源结构、市场环境、法规政策等因素的影响，具体差别如下。

1) 国外虚拟电厂项目的发展相对较早，已经有一些商业化的示范项目，且聚焦于市场化运营和商业模式创新。相比之下，国内虚拟电厂项目目前处于快速发展阶段，现有示范项目为虚拟电厂从起步阶段向推广阶段的过渡提供了先导性参考案例。

2) 国内针对调峰市场的虚拟电厂示范项目较多，调峰市场是中国特色且发展成熟，目前正逐步利用先进算法和数据分析工具挖掘调峰潜力；国外调峰市场与电能量市场未作区分，因此没有针对调峰服务的虚拟电厂项目。

3) 国外大部分虚拟电厂项目呈现分布式、小



规模、服务特色场景的特点，着重面向实际的调节需求。相比而言，国内虚拟电厂朝向源网荷储一体化趋势发展，近年来中国鼓励源网荷储一体化方面的政策日益增多，国家能源局《2023 年能源监管工作要点》明确鼓励支持虚拟电厂运营商参与系统调节，鼓励发展电力源网荷储一体化^[24]。山西、深圳、广东等地发布了大量虚拟电厂政策机制和统一运营平台，引导虚拟电厂规范运行、统一发展^[25-27]。

通过对现有研究成果和示范项目归纳可知，目前国内外专家学者对市场环境下灵活性资源虚拟电厂的运营模式和技术体系已经达成了基本共识，形成了“4 个阶段、3 类主体、2 层管理、1 套闭环”的运营管控模式^[28]，具体如图 1 所示。其中，第 1 个层面是虚拟电厂与灵活性资源之间的能量管理和运行控制层；第 2 个层面是电力市场与虚拟电厂之间的市场运营和交易决策层。通过各主体和各阶段的方案配合和协同管理，最终形成一整套技术闭环链路。

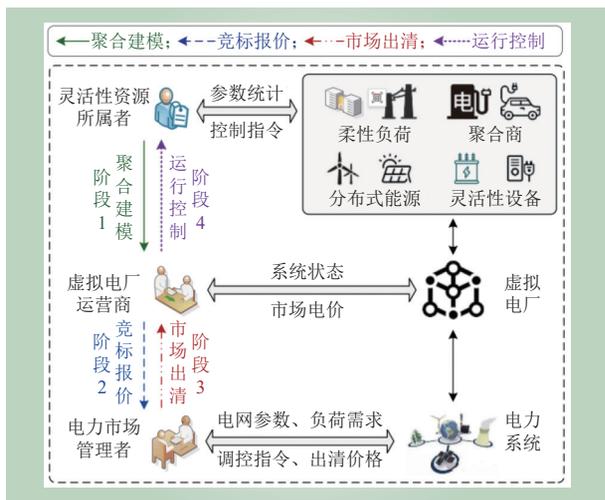


图 1 市场环境下灵活性资源虚拟电厂实施流程
Fig. 1 Implementation procedure of the virtual power plant with flexible resources in the power market environment

为实现海量异构分散式灵活性资源在电力市场环境下高效统筹管理，虚拟电厂技术应聚焦灵活性资源运营调控的关键挑战，在灵活性资源聚合建模、竞标报价和运行控制 3 个技术领域进行重点突破，实现各类技术方法全链路协调配合，从而有效释放灵活性资源的调控潜力。因此，本文结合 3 个技术领域的问题挑战、研究进展和攻

关方向进行重点总结和讨论。

1.2 市场环境下灵活性资源虚拟电厂技术挑战

本节对市场环境下灵活性资源虚拟电厂关键挑战总结如下。

1) 灵活性资源虚拟电厂聚合建模技术挑战。

随着分散式储能、充电桩、暖通负荷等种类多样、位置分散、形式泛在的灵活性资源规模与日俱增，虚拟电厂中灵活性资源设备往往数量巨大、种类繁多，若对各设备逐个单独建模，虚拟电厂管理者将面临高维复杂的优化计算难题^[29]。因此，有必要对灵活性资源的聚合等值模型进行研究，助力虚拟电厂管理者对大规模的小容量灵活性资源进行统一管理和聚合调控^[30-31]。灵活性资源虚拟电厂聚合建模技术主要分为 2 个层面，其一是海量异构设备的节点级灵活性资源聚合；其二是考虑电网安全约束的网络级虚拟电厂聚合。相关技术问题面临的核心挑战总结如下。

针对海量异构设备的节点级灵活性资源聚合问题，其挑战在于如何对多元异构、参数异质、规模庞大的海量分布式灵活性资源的调控潜力进行聚合、等值和建模。从数学模型层面来说，每个可调设备的灵活性都可以表示为以多面体为边界的可行域，一簇灵活性资源的聚合可行域等于所有单个设备可行域的闵可夫斯基和（Minkowski Sum）。然而，多面体闵可夫斯基和的计算是一个复杂的 NP-hard 难题，目前尚缺少通用的高效率求解方法，在灵活性资源数量庞大的场景中，该问题将变得愈加复杂和难以计算^[32]。

针对考虑电网安全约束的网络级虚拟电厂聚合问题，其挑战在于如何针对虚拟电厂内部潮流、电压等网络约束对并网接口功率的影响进行建模，进而刻画虚拟电厂并网接口的调控潜力，评估考虑网络拓扑和潮流约束情况下虚拟电厂的整体灵活性。由于海量异构分散式灵活性资源的模型和参数存在显著差异，难以统筹表征和统一建模，且灵活性资源的功率响应和调控指令之间往往存在不可避免的偏差，该场景下各灵活性资源对虚拟电厂并网接口的影响难以量化表征，如何刻画出一个安全、可信、经济的虚拟电厂并网接口等值模型是当前研究面临的核心问题。

相比传统电厂，虚拟电厂聚合建模综合考虑了多种资源的协同效应，其模型须适应异构资源



的需求。这与传统电厂主要聚焦于单一能源资源的稳定出力和调控不同。此外，虚拟电厂聚合建模须应对多源不确定性和模型参数难以准确获取问题，在建模时不仅要考虑系统的整体优化，还要动态调整以应对市场规则和电力系统需求的变化。而传统电厂模型则更多关注于维护单一电厂的稳定运行，调度较为简单，灵活性和市场适应性要求较低。

2) 灵活性资源虚拟电厂竞标报价技术挑战。

在全国统一大市场的建设推进下，无论虚拟电厂，亦或是传统市场主体，均要通过电力市场交易中心的统一组织和协调参与市场运营，其市场交易实施流程都应包括参与者投标、市场出清、经济调度、收益结算等过程，市场主体都需要考虑和管理相关风险，如能源价格波动风险、供需不平衡风险等，都追求经济效益和盈利，通过优化能源运营和交易决策来实现利润最大化。然而，考虑到虚拟电厂的特殊性，其市场竞标策略相比传统市场主体之间还存在一定差异。虚拟电厂通过智能控制系统实现多种能源资源的协同运营和管理，具有高度灵活性和可调度性，可以根据市场需求和能源供需情况进行优化调整。而传统市场主体通常采取一种或少数几种能源资源进行运营，运营模式相对固定。相比传统市场主体，虚拟电厂在市场交易中更多扮演中间载体的功能，更多是负责一种多级协同配合的市场架构，既要负责向上参与市场交易，又要负责权衡底层灵活性资源设备的运营效益^[33]。

相比传统电厂，灵活性资源虚拟电厂将面对更加多元的电力市场环境，可以同时参与多类辅助服务市场，能够做到调峰、调频、备用、调压多服务协同供给。此外，虚拟电厂需要为电力市场交易中心、灵活性资源所属者等多类主体提供服务，不同运营主体之间存在利益冲突，如何设计合理的市场竞标策略，以实现电力市场、虚拟电厂、灵活性资源之间协调配合和利益均衡是当前研究的重要挑战。

3) 灵活性资源虚拟电厂运行控制技术挑战。

无论是虚拟电厂还是传统发电厂，其能量管理与运行控制方法都应和电力系统的多时间尺度调度相互配合。因此，在电力市场环境下，灵活性资源虚拟电厂的能量管理与运行控制方法同样

应包括日前调度-日内滚动-实时校正等环节，且应与传统电厂一样为电网提供柔性调节能力，满足电力系统的供能需求。

相比传统电厂，虚拟电厂内部资源种类更多，参与主体数量更大，不同主体之间存在效益分配和利益冲突问题。因此，虚拟电厂的能量管理和运行控制面临着系统整体优化和各主体利益诉求之间协调和均衡的挑战^[18]。此外，虚拟电厂实际运行中面对多源不确定性问题，虚拟电厂的运行控制需要考虑分布式电源出力和负荷预测的不确定性。

2 灵活性资源虚拟电厂聚合建模方法

灵活性资源虚拟电厂的聚合建模方法主要分为面向海量异构设备的节点级灵活性资源聚合方法和考虑电网安全约束的网络级虚拟电厂聚合方法 2 类，其聚合架构形式如图 2 所示。

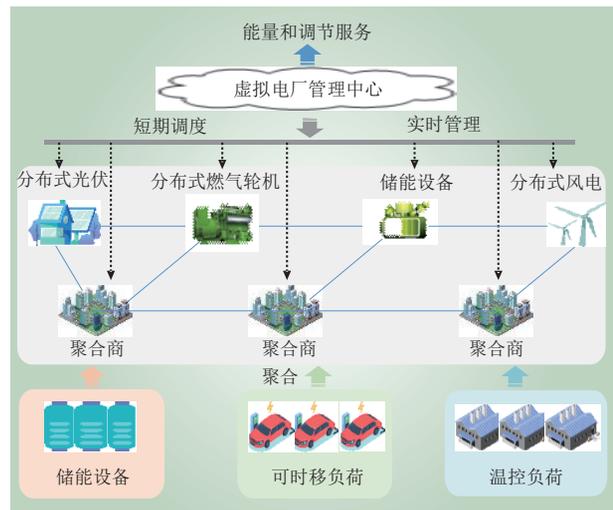


图 2 灵活性资源虚拟电厂聚合架构

Fig. 2 Aggregated architecture of flexible resource virtual power plants

2.1 节点级灵活性资源虚拟电厂聚合建模方法

针对海量异构设备的节点级灵活性资源聚合问题，为避免求解海量灵活性资源的精确聚合可行域，专家学者提出了一系列低复杂度算法对灵活性资源聚合模型进行近似，具体可以细分为 3 类。

1) 外包近似法。

文献 [34-35] 通过对设备容量参数求和，近似求解灵活性资源的群体可调范围。文献 [36-37] 求



解了灵活性资源可行域的最小外包多面体,使得近似后的灵活性资源灵活性完全不受损失。然而,外包近似法会扩大灵活性资源的原始可行域,存在分解后的指令不可行风险。因此,这类方法往往需要设计额外的校正策略对设备分解指令进行修正,从而保障下发的调控指令不违背设备的物理模型约束,这必然会增加系统的通信负担和计算复杂度^[38]。

2) 内接近似法。

目前,主流的内接近似方法可以分为调节范围评估和多面体内接近似2类。其中,多面体内接近似方法又可以分为盒状近似方法^[39]、对称多面体近似方法^[32,40-41]和虚拟储能模型近似方法^[42-43]。文献^[44]提出了一种基于分布鲁棒机会约束的可行域内接近似理论,将无序分布式能源转换成有序灵活性资源,显著提升调控中心建模和计算效率。内接近似方法虽然会在一定程度上牺牲设备的调控灵活性,但其可以确保分解指令严格满足各设备物理模型的可行域约束。因此,如何兼顾不同种类资源的模型特征,扩大内接近似模型的可行域,挖掘和释放海量灵活性资源的调控潜力亟需进一步解决。

3) 参数近似法。

参数近似法针对灵活性资源集群的聚合问题构建一个物理意义更加明确的聚合参考模型,并提出了评估灵活性资源集群可调节能力的量化指标体系,从而能够在特定的应用场景下快速计算得到相应的聚合集群灵活性量化指标。文献^[45]提出了评估灵活性资源集群可调节能力的量化指标体系。文献^[46]基于参数辨识评估温控负荷集群的响应能力,评估算法考虑了响应功率和响应时长2个能力指标。参数近似法基于物理意义明确的等效模型,通过参数估计和数据拟合等研究手段,获得规模化灵活性资源的等效近似参数,其缺陷在于各类灵活性资源的物理模型存在一定差异,参数近似法难以实现对海量、异构、多元化可调资源的灵活性进行统一建模和表征。

2.2 网络级灵活性资源虚拟电厂聚合建模方法

针对考虑电网安全约束的网络级虚拟电厂聚合问题,如何刻画虚拟电厂并网端口的调控潜力,是学术界的热点。具体可以分为以下3类。

1) 抽样仿真法。

结合灵活性资源和分布式能源的出力特征和功率分布,采用蒙特卡洛等抽样方法,生成大量虚拟电厂运行场景,辅以虚拟电厂内部生产模拟和运行仿真技术,可以评估和拟合得到虚拟电厂并网接口的有功功率与无功功率关联关系和分布范围^[47-48]。

2) 优化评估法。

考虑虚拟电厂内部潮流安全和电压范围约束,以最大化有功功率调节范围为目标,通过优化计算可以给出不同无功功率或不同功率因数下有功功率的最大/最小调节范围,辅以描点计算和曲线拟合方法,从而评估出虚拟电厂并网接口的功率调节范围^[49-50]。

3) 边界收缩法。

首先构建符合规范化形状的外接多面体,然后通过对该外接多面体进行形体放缩或边界搜索,获得并网点处等效发电机设备或等效储能设备的调节范围。常见的计算方法包括高维立方体法^[51]、内切高维椭球法^[52]、高维多面体投影及边界收缩算法^[53-54]。

值得注意的是,抽样仿真和优化评估方法的优势在于,当抽样和仿真场景充足的情况下,可以无限逼近精确的虚拟电厂聚合可行域,缺陷在于计算负担较大。相比之下,边界收缩的优势在于计算负担相比前2类方法更小,缺点是会造成一定程度的灵活性损失。

3 灵活性资源虚拟电厂竞标报价策略

根据虚拟电厂的竞标报价方案是否会对电力市场的出清电价产生影响,虚拟电厂的市场竞标方法可以分为2类。第1类方法将虚拟电厂建模为价格接受者,常用于虚拟电厂体量较小的场景;第2类方法将虚拟电厂建模为定价参与者,常用于虚拟电厂体量相对较大,足以影响市场价格的场景。虚拟电厂参与市场运营模式如图3所示。

3.1 虚拟电厂作为价格接受者的竞标报价方法

当虚拟电厂体量较小,不足以影响电力市场的出清电价时,虚拟电厂通常被建模为价格接受者参与电力市场交易。在这种场景下,由于虚拟

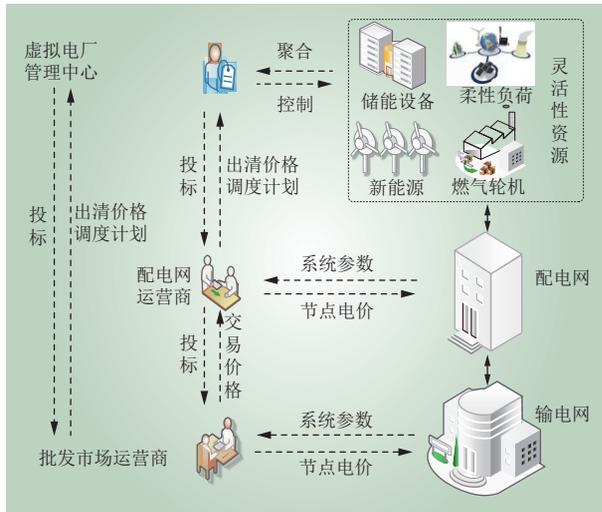


图 3 虚拟电厂参与市场运营模式

Fig. 3 Market operation model of the virtual power plants

电厂对电力市场出清价格的影响较小，虚拟电厂运营者往往采用“只报量”竞标方法策略，向上级市场提交分时电量曲线。在该模式下，通过对不同类别的灵活性资源协调调度，结合电价和灵活性资源的预测结果，虚拟电厂向上级电力市场递交的竞标方案，以达到市场套利的目的^[55]。文献^[56]考虑可调设备和网络拓扑安全约束，以最大化运营利润或最小化运营成本为目标，通过多时段联合优化获得虚拟电厂向上级电力市场的申报功率曲线。文献^[57-58]建立了虚拟电厂产消者模型，利用遗传算法对非线性混合整数规划问题进行了求解，通过调节内部分布式发电机组和储能装置的发电和用电功率，向上级电力市场提供能量和备用服务。边际成本定价理论是虚拟电厂运用经济学中的一种边际分析原理，决策基于每增加单位产出所带来的额外收益与成本。文献^[59]基于边际成本函数的解析表征方法，计算了多参数与成本的分段映射关系，进而参与市场交易。需求响应也是虚拟电厂调节内部资源的有效途径，文献^[60-61]将虚拟电厂作为价格接受者时的柔性负荷进行需求响应，获取调峰收益。

3.2 虚拟电厂作为定价参与者的竞标报价方法

当虚拟电厂体量较大，足够影响电力市场的出清电价时，虚拟电厂可以被建模为定价参与者参与电力市场交易。在这种场景下，虚拟电厂运营者可以采用更加灵活性的“报量报价”竞标策

略，同时向上级市场提交分时电量申报范围和分段报价曲线。“报量报价”常用竞标方法有以下 3 种。

1) 基于成本函数分段线性化的竞标方法。

通过将虚拟电厂的聚合成本函数分段线性化，可以获得与虚拟电厂边际运行成本一致的分段成本曲线^[62]。基于真实的分段成本曲线进行竞标报价可以保障虚拟电厂收益的稳定，确保市场参与者不亏损。在实际成本曲线基础上进行报价调整，可以一定程度上影响市场出清结果，进一步增加虚拟电厂竞标收益。此外，这种竞标方法对于电力市场运营者而言是最佳的，若所有市场参与者都根据其真实的发电成本进行报价，整个电力市场的运营效益可以达到最佳。

2) 基于分层优化的竞标方法。

分层优化方法常用于制定虚拟电厂“报量报价”竞标方案，以提高虚拟电厂在电力市场中的收益为目标，上层模型用于优化虚拟电厂竞标策略，下层模型用于评估虚拟电厂不同竞标方案下的运营效益。基于分层优化方法对配网公司^[63]、储能设备^[64]、工业大用户^[65]和多能聚合商^[66-67]参与电力市场的竞标方案进行优化，能明显提高市场参与者的决策灵活性和运营效益。文献^[68]在零售市场下对聚合商的报量报价策略进行建模，提出了基于双层优化的电力聚合商竞标模型。文献^[65]针对由需求侧响应和可再生能源机组组成的虚拟电厂，提出了一种考虑市场结算过程的多参与者竞标策略，对不同场景中的风险收益和应用效果进行了分析。文献^[69]提出了考虑购售风险的虚拟电厂内层资源与外层市场的双层竞标策略。这些方法的应用进一步提升了分层优化的效果，使得虚拟电厂能够根据实时市场信号、负荷预测和市场价格进行高效的调整，从而提高了电力系统的经济性和可靠性。在大规模的电力系统调控中，分层优化的竞标方法使虚拟电厂在面对电力需求波动、市场价格变化及系统的不确定性时，能够灵活调整竞标策略和资源配置。

3) 基于价格配额曲线的竞标方法。

价格配额曲线反映了电量与电价之间的关联关系，已被用于柔性负荷聚合商^[70]、可再生能源发电商^[71]、储能装置^[72]和电池设备^[73]等多类灵活性资源的竞标模型中。通过引入整数变量和分段



线性化方法，可以将价格配额曲线转换成竞标优化问题中的混合整数线性约束，进而模拟市场参与者在不同竞标行为下的市场出清结果，极大地简化了对电力市场出清过程的建模^[74]。此外，这种方法对市场中竞争对手信息的依赖程度低，适合在参与者众多、竞争激烈的大规模电力市场环境中应用^[75]。

4 灵活性资源虚拟电厂运行控制方法

根据虚拟电厂运营者与灵活性资源所属者的从属关系，虚拟电厂能量管理和运行控制方法可以分为 2 类。第 1 类是当二者归属同一主体情况下的经济调度方法，第 2 类是当二者分属不同主体情况下的协同运营方法。虚拟电厂项目通过集成多种分布式能源资源，如太阳能、风能、储能等，利用智能控制系统进行协同运营和管理。无论虚拟电厂还是传统发电厂，其能量管理与运行调控方法都应与电力系统的多时间尺度调度相互配合，都采用时序递进的调控模式，虚拟电厂时序递进调控模式如图 4 所示。

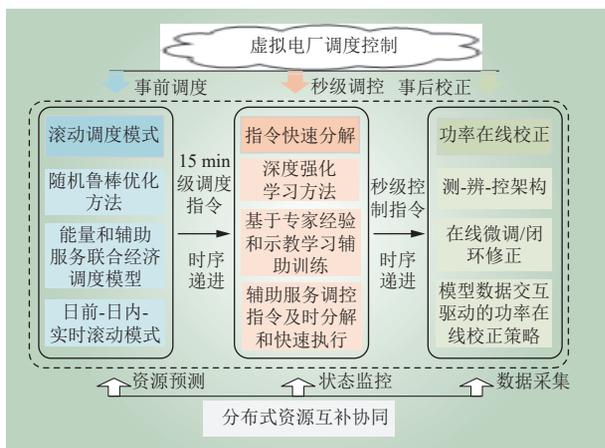


图 4 虚拟电厂时序递进调控模式

Fig. 4 Progressive control mode of virtual power plants in time series

4.1 同主体场景下虚拟电厂运行控制方法

当灵活性资源设备归虚拟电厂运营者统一管理时，虚拟电厂运营者与灵活性资源所属者具有相同的利益诉求，虚拟电厂可以直接向各灵活性资源设备下发调度指令^[40]。文献^[76]提出了一种考虑建筑物室内温度需求约束的日前负荷调度方法，为商业建筑带来更多利润。文献^[34-35]分别

基于数据驱动方法提出了面向需求侧资源聚合商的定价策略和竞标策略，实现负荷聚合商灵活性运行。文献^[57-58]分别建立了虚拟电厂和配电网的优化调度模型，通过对可中断负荷、储能装置和分布式电源协调调度，实现在能量市场和旋转备用市场中套利。对需求侧响应^[77,61]和插拔式电动汽车充电负荷^[78-80]的能量管理结果表明，虚拟电厂是实现规模化灵活性资源的协调高效运营，提升系统经济效益的有效手段。

此外，由于灵活性资源种类繁多且能为电力系统提供多类服务，虚拟电厂的能量和辅助服务联合调度方法成为近年来的研究热点。文献^[81-82]考虑了能量市场、旋转备用市场和调频市场的耦合关系，赋能储能装置为电力系统提供多类服务。文献^[63]以最小化配电系统运营成本为目标，设计配电网内部多种设备协同调度方案，为上级电网提供功率平衡和旋转备用服务。文献^[83]提出了包含聚合、调控、分解、校正全链路实施流程的虚拟电厂多时间尺度调度模式，在保障虚拟电厂运营收益的同时显著降低了系统计算负担。考虑能量市场与辅助服务市场的耦合约束，兼顾辅助服务调频指令不确定性对虚拟电厂内部潮流安全的影响，文献^[84]提出了计及潮流安全约束的虚拟电厂能量和辅助服务联合鲁棒经济调度模型，降低支路潮流/节点电压越限概率。此外，虚拟电厂参与电-碳市场、电-绿证市场联合交易与调度方面的研究同样是近年来的热点。文献^[85]引入绿证-碳排等价抵消机制以实现绿证交易和碳交易的衔接，提出一种考虑电-碳-绿证市场耦合的园区综合能源系统日前优化调度模型。文献^[86]将绿证-碳交易引入电转气设备和含碳捕集电厂的综合能源系统调度。文献^[87]量化新能源供能碳减排大小，利用绿证联动绿证和碳市场，引入历史配额完成度及预测精确度以衡量配额分配和绿证获取。

虚拟电厂参与电-碳市场、电-绿证市场联合交易与调度会带来 3 方面的影响。在目标函数方面，电-碳联合调度会在原电调度的基础增加与碳排放相关的目标函数，增加多目标优化问题的复杂度，目标函数还须考虑对碳交易、碳排放补偿和碳排放损失的增量建模；在约束条件方面，优化调度模型在约束条件方面还须增加对碳排放约



束和收益约束的建模；在求解方法方面，虚拟电厂参与电-碳市场、电-绿证市场联合交易与调度增大模型复杂度，引入更多混合整数变量，对模型及算法的求解效率提出了更高要求，文献[88]建立的阶梯制碳交易机制引入了3个新的参数包括碳交易基价、价格增长率和区间长度，引入了更多整数变量将原始优化问题变为更大规模的混合整数规划问题。亟需研究混合整数规划的分支定界法、启发式方法等更高效的方法进行求解。

考虑到虚拟电厂中聚纳了不同种类的源、荷资源，其不确定性来源包括电源和负荷2个层面。因此，应结合源荷资源的各自特征和不确定性特点，分别提出应对方法。现有研究针对虚拟电厂中源、荷不确定性的应对方法主要如下。

1) 针对虚拟电厂中风电、光伏等新能源出力随机波动带来的电源侧不确定性问题，现有虚拟电厂运行控制方法主要采用鲁棒优化^[89-90]、随机优化^[91]、机会约束^[92-93]等方法。在鲁棒优化方面，传统的单阶段鲁棒优化调度结果无法保证极端情况下的经济性，因此学术界产生了两阶段鲁棒优化调度模型^[89]。文献[90]将两阶段鲁棒优化调度方法应用于虚拟电厂的实际调度，使得虚拟电厂调度决策更能适应风光出力的不确定性；在随机优化方面，文献[91]采用随机优化处理多源不确定性问题，用拉丁超立方方法生成海量随机场景，构建考虑多种随机因素的虚拟电厂经济调度模型。在机会约束方面，文献[92]建立了基于双层模糊机会约束规划的虚拟电厂优化调度模型。文献[93]采用机会约束规划建模来描述由随机变量带来的不确定性，针对机会约束规划处理中所伴随的失负荷风险，并建立风险量化指标。

2) 针对虚拟电厂中柔性负荷模型参数不准确、响应与指令之间存在偏差的问题，现有虚拟电厂运行控制方法主要采用鲁棒优化、滚动更新、反馈校正等方法。鲁棒优化方法主要是保证一定置信水平下模型的可靠性，通过稳健的调度方案来应对负荷侧不确定性。为应对充电站储能能量管理策略中充电负荷不确定造成的影响，文献[94]提出了考虑负荷预测不确定性的储能鲁棒实时控制策略，滚动更新主要是用多时间尺度调度的方法来应对负荷侧的不确定性，此种方法不以牺牲经济性为代价来保证鲁棒性。文献[95]中

虚拟电厂滚动修正其聚合模型，每15 min更新一次超短期预测数据用于计算下一个周期的负荷侧设备灵活性，反馈校正方法则根据虚拟电厂设备的实时运行状态动态更新模型，从而应对负荷侧响应与指令之间存在偏差的问题。文献[96]中反馈校正模型的目标函数为日前及日内优化结果和实时AGC控制指令之间优化误差惩罚最小，进而实时跟踪负荷需求的波动。

4.2 多主体场景下虚拟电厂运行控制方法

当灵活性资源设备和虚拟电厂分属不同的所有者时，二者之间存在利益冲突，为尊重不同运营主体的利益诉求，须分别构建虚拟电厂和灵活性资源设备的效益模型，利用合理的价格激励策略和利益分配机制实现二者的协同优化。

将虚拟电厂运营优化模型和各灵活性资源控制优化模型分别置于不同的优化层，构建分层优化问题，是实现不同利益主体之间协同运营的常用方法。现有分层优化问题可以分为以下2类。

1) 若将虚拟电厂优化模型置于下层，各灵活性资源控制优化模型置于上层，获得多领导者-单追随者的多阶段博弈模型，通过上下层之间的交替迭代，搜索令所有参与者均满意的纳什均衡点，常用于解决多参与者之间的协同交易和竞标报价问题^[97-98]。

2) 若将虚拟电厂优化模型置于上层，各灵活性资源控制优化模型置于下层，获得单领导者-多追随者的主从博弈模型，通过设计动态的交易价格，实现上下层决策方案在最优价格点达到均衡，激励下层的灵活性资源自发主动地追踪上层虚拟电厂的调度计划^[99]。在文献[66-67]中，聚合商通过制定时变的能源价格，调整多类分布式发电设备的能源供给曲线，实现供需匹配。

随着社会各类资本逐步涌入电力市场，未来不同虚拟电厂将分属于不同的市场利益方，各自追求自身利益的最大化，传统的优化调度方法可能面临缺乏协调领导的问题，将很难适用未来多虚拟电厂的市场场景。如何协调多个虚拟电厂的利益，实现多虚拟电厂的联合调控运行，是一个值得研究的问题。多虚拟电厂联合管理与调控具有多主体效益冲突及利益协调、多主体之间信息隐私保护、求解方法主要基于分布式优化和博弈论方法等特点。涉及到的分层调控与多阶段博弈



问题，须注意以下 2 个问题。

1) 分层调控应充分考虑虚拟电厂内部柔性资源的物理特性，不仅从经济角度，还应从技术角度考虑虚拟电厂对配电网的影响，经济最优的最优化策略可能会对本地配电网安全运行造成危害^[100]。

2) 多阶段博弈应将配电网运营商加入多虚拟电厂的博弈之中，通过调整电价引导虚拟电厂调整出力，多虚拟电厂之间的博弈也会影响配电网运营商电价的制定。

5 现有研究不足和未来攻坚方向

现有理论方法和技术手段仍然存在以下局限性和研究难点，亟待进一步解决。

1) 目前灵活性资源聚合方式以加装具备采集和控制功能的硬件连接设备为主，考虑电力系统海量异构灵活性资源的设备种类多元、数量规模庞大、接入方式多样，设备改造和聚合接入成本较高，给灵活性资源聚合管理模式的推广带来了巨大成本。为突破此窘境，一方面可以考虑引入适当的补偿机制，激励设备生产商的积极性，打通与运营商设备管理云平台的资源对接，从而降低资源聚合接入的改造和运营成本；另一方面可以推进与即时通讯和智能感知技术的融合，提高灵活性资源设备和智能可调终端的可接入范围和可观可控能力。对于存在大量模型和参数不准确的可调资源和异构终端，在聚合建模层面，应攻克基于实况状态即时反馈和机器学习方法的海量异构资源群体动态规律认知技术，对虚拟电厂可调能力和可行域的动态建模和精准评估，获得上级市场或调控中心可信的安全调节空间，提高模型与现实物理环境的贴合度。

2) 随着电力市场全面开放和辅助服务市场类别的日益增加，有必要对计及能量-辅助服务市场耦合关系和不同主体利益诉求的虚拟电厂竞标策略、定价方法和分配机制进行统筹考虑，结合灵活性资源虚拟电厂在多元电力市场环境的盈利诉求，构建虚拟电厂全链路多周期协调运营模式，引导虚拟电厂向多元协同和多功能互补的趋势发展。此外，由于虚拟电厂中海量分散式灵活性资源主要来源于配电网，如何实现电力市场、配电网管控中心、虚拟电厂运营商和灵活性资源设备

所属者各自效益的统筹考虑和多层级协调优化亟需进一步开展。

3) 虚拟电厂在实际运行中，可调资源的实际出力和控制指令之间往往存在不可避免的偏差。在运行控制层面，应侧重于虚拟电厂多时间尺度调度配合，进一步提出模型数据交互驱动的虚拟电厂能量管理和运行控制方法，结合可调资源的生产规律和实测状态对灵活性资源的调控模型滚动更新和在线校正，提出统筹虚拟电厂多元资源模型差异、功率响应偏差和复杂运行环境的灵活性资源协调控制方法。现有灵活性资源虚拟电厂示范项目为虚拟电厂从起步阶段向推广阶段的过渡提供了先导性参考案例。然而，现有示范工程中海量小容量的灵活性终端设备（分散式异构储能装置和电池、小型充电桩、温控设备、智能家居设备等）调控潜力仍未被完全激活，有必要结合即时通讯技术，进一步打造挖掘大规模小容量异构资源灵活性的虚拟电厂软件系统、实践平台和样板案例，助力虚拟电厂技术朝向普及应用发展。

6 结语

市场环境下灵活性资源虚拟电厂的聚合调控问题近年来成为学术研究和工程实践的热点，本文对灵活性资源虚拟电厂的聚合建模、竞标报价、运行控制 3 个技术领域的最新进展进行了系统性分类、体系化综述和总结性梳理，详细论述了各类理论方法的技术特点和适配场景。最后，总结了灵活性资源虚拟电厂仍然面临的一些技术问题，给出了灵活性资源虚拟电厂未来理论研究和突破方向。通过本文对灵活性资源虚拟电厂相关技术方法的梳理，可帮助相关研究领域的学术界研究人员和产业界工程设计人员全面了解虚拟电厂领域的各类技术方法，为未来研究方向和技术方案的选择提供参考。

参考文献：

- [1] 国家能源局. 进一步构建高质量充电基础设施体系, 更好满足人民群众购置和使用新能源汽车需要 [EB/OL]. (2024-01-25) [2024-05-15]. https://www.nea.gov.cn/2024-01/25/c_1310762007.



- htm.
- [2] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2023[EB/OL]. (2023-08-07) [2024-05-15]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-322624>.
- [3] HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, *et al.* Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 7(5): 2359–2367.
- [4] 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 Huilai, ZHANG Haibo, WANG Zhaolin. 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.
- [5] CAMAL S, MICHIORRI A, KARINIOTAKIS G. Optimal offer of automatic frequency restoration reserve from a combined PV/wind virtual power plant[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(6): 6155–6170.
- [6] PONOČKO J, MILANOVIĆ J V. Forecasting demand flexibility of aggregated residential load using smart meter data[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(5): 5446–5455.
- [7] 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 Xuanyuan, LIU Zhen. 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.
- [8] 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.
- [9] 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 Xingyu, GAO Ciwei, CHEN Tao, *et al.* Framework design and application prospect for digital twin virtual power plant system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 604–619.
- [10] 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.
- [11] SONG J J, LI X. Review of research on optimal scheduling method of virtual power plant[C]//2023 7th International Conference on Smart Grid and Smart Cities (ICSGSC). Lanzhou, China. IEEE, 2023: 647–652.
- [12] 田立亭, 程林, 郭剑波, 等. 虚拟电厂对分布式能源的管理和互动机制研究综述 [J]. *电网技术*, 2020, 44(6): 2097–2108. TIAN Liting, CHENG Lin, GUO Jianbo, *et al.* A review on the study of management and interaction mechanism for distributed energy in virtual power plants[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(6): 2097–2108.
- [13] 李彬, 郝一浩, 祁兵, 等. 支撑虚拟电厂互动的信息通信关键技术研究展望 [J]. *电网技术*, 2022, 46(5): 1761–1770. LI Bin, HAO Yihao, QI Bing, *et al.* Key information communication technologies supporting virtual power plant interaction[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(5): 1761–1770.
- [14] 卫璇, 潘昭光, 王彬, 等. 云管边端架构下虚拟电厂资源集群与协同调控研究综述及展望 [J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(6): 539–551. WEI Xuan, PAN Zhaoguang, WANG Bin, *et al.* Review on virtual power plant resource aggregation and collaborative regulation using cloud-tube-edge-end architecture[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(6): 539–551.
- [15] ŠIKŠNYS L, VALSOMATZIS E, HOSE K, *et al.* Aggregating and disaggregating flexibility objects[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2015, 27(11): 2893–2906.
- [16] YI Z K, XU Y L, WANG X, *et al.* An improved two-stage deep reinforcement learning approach for regulation service disaggregation in a virtual power plant[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2022, 13(4): 2844–2858.
- [17] 李晓舟, 秦文萍, 景祥, 等. 计及不确定风险和多主体协同的虚拟电厂参与主辅市场联合优化策略 [J/OL]. *电网技术*, 1–16 [2024-09-15]. LI Xiaozhou, QIN Wenping, JING Xiang, *et al.* Joint optimization strategy for virtual power plant participation in primary and ancillary markets considering uncertain risks and multi-agent collaboration[J/OL]. *Power System Technology*, 1–16 [2024-09-15].
- [18] 康重庆, 陈启鑫, 苏剑, 等. 新型电力系统规模化灵活性资源虚拟电厂科学问题与研究框架 [J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(18): 3–14. KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, *et al.* Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power



- system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(18): 3–14.
- [19] 刘淳, 王仕俊, 赵燕玲, 等. 区块链技术在虚拟电厂交易中的应用综述 [J]. *电力建设*, 2023, 44(4): 130–144.
LIU Chun, WANG Shijun, ZHAO Yanling, *et al.* Review of the application of blockchain technology in virtual power plant transactions[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(4): 130–144.
- [20] HU Y, LIU D N, JIA H P, *et al.* Review of game theories applied to virtual power plants[C]//2021 International Conference on Power System Technology (POWERCON). Haikou, China. IEEE, 2021: 887–891.
- [21] ZHANG J, LI W. Review of revenue allocation method for virtual power plants[C]//2022 IEEE International Conference on Power Systems and Electrical Technology (PSET). Aalborg, Denmark. IEEE, 2022: 430–433.
- [22] 郁海彬, 张煜晨, 刘扬洋, 等. 碳交易机制下多主体虚拟电厂参与电力市场的优化调度竞标策略 [J]. *发电技术*, 2023, 44(5): 634–644.
YU Haibin, ZHANG Yuchen, LIU Yangyang, *et al.* Optimal dispatching bidding strategy of multi-agent virtual power plant participating in electricity market under carbon trading mechanism[J]. *Power Generation Technology*, 2023, 44(5): 634–644.
- [23] VRETTOS E, ANDERSSON G. Scheduling and provision of secondary frequency reserves by aggregations of commercial buildings[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 7(2): 850–864.
- [24] 国家能源局. 国家能源局关于印发《2023 年能源监管工作要点》的通知 [EB/OL]. (2023.01.04) [2023.11.23]. http://zfxgk.nea.gov.cn/2023-01/04/c_1310691552.htm.
- [25] 山西省能源局. 关于印发《虚拟电厂建设与运营管理实施方案》的通知 [EB/OL]. (2022.06.23) [2023.11.23]. http://www.shanxi.gov.cn/zfxgk/zfxgkzkl/zc/xzgfxwj/bmgfxwj1/szfszjg_76500/snyj_76509/202301/t20230128_7876895.shtml.
- [26] 深圳特区报. 深圳市虚拟电厂运行指导文件发布 [EB/OL]. (2023.07.17) [2023.11.23]. http://www.sz.gov.cn/cn/xxgk/zfxxgj/zwdt/content/post_10716888.html.
- [27] 广州市工业和信息化局. 关于印发《广州市虚拟电厂实施细则》通知 [EB/OL]. (2021.07.08) [2023.11.23]. https://www.gz.gov.cn/gfxwj/sbmgfxwj/gzsgyhxxhj/content/post_7364052.html.
- [28] 仪忠凯, 许银亮, 吴文传. 考虑虚拟电厂多类电力产品的配电侧市场出清策略 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(22): 143–151.
YI Zhongkai, XU Yinliang, WU Wenchuan. Market clearing strategy for distribution system considering multiple power commodities offered by virtual power plant[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(22): 143–151.
- [29] NGUYEN D T, LE L B. Joint optimization of electric vehicle and home energy scheduling considering user comfort preference[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 5(1): 188–199.
- [30] ALI SAJJAD I, CHICCO G, NAPOLI R. Definitions of demand flexibility for aggregate residential loads[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(6): 2633–2643.
- [31] ZHANG H C, HU Z C, XU Z W, *et al.* Evaluation of achievable vehicle-to-grid capacity using aggregate PEV model[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 32(1): 784–794.
- [32] 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*, 2017, 10(2): 1205–1214.
- [33] YI Z K, XU Y L, WANG H Z, *et al.* Coordinated operation strategy for a virtual power plant with multiple DER aggregators[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(4): 2445–2458.
- [34] 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*, 2016, 9(1): 57–66.
- [35] 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*, 2015, 8(1): 96–105.
- [36] BAROT S, TAYLOR J A. A concise, approximate representation of a collection of loads described by polytopes[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2017, 84: 55–63.
- [37] ALTHOFF M, STURTSBERG O, BUSS M. Computing reachable sets of hybrid systems using a combination of zonotopes and polytopes[J]. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 2010, 4(2): 233–249.
- [38] YI Z K, XU Y L, 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*, 2019, 11(3): 1332–1346.
- [39] CHEN X, DALL'ANESE E, ZHAO C H, *et al.* Aggregate power flexibility in unbalanced distribution systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 11(1): 258–269.
- [40] MUELLER F L, WOERNER S, LYGEROS J. Unlocking the



- potential of flexible energy resources to help balance the power grid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 10(5): 5212–5222.
- [41] ZHAO L, ZHANG W, HAO H, *et al.* A geometric approach to aggregate flexibility modeling of thermostatically controlled loads[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6): 4721–4731.
- [42] 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*, 2017, 33(4): 3573–3586.
- [43] 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.
- [44] YI Z K, XU Y L, GU W, *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.
- [45] 孙东磊, 王宪, 孙毅, 等. 基于多面体不确定集合的电力系统灵活性量化评估方法 [J]. *中国电力*, 2024, 57(9): 146–155.
SUN Donglei, WANG Xian, SUN Yi, *et al.* Polyhedral uncertainty set based power system flexibility quantitative assessment[J]. *Electric Power*, 2024, 57(9): 146–155.
- [46] 崔屹峰, 李珍国, 贾清泉, 等. 基于参数辨识与状态估计的温控负荷响应能力动态评估 [J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(1): 150–158.
CUI Yifeng, LI Zhenguo, JIA Qingquan, *et al.* Dynamic evaluation of response potential of thermostatically controlled load based on parameter identification and state estimation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(1): 150–158.
- [47] CONTRERAS D A, RUDION K. Computing the feasible operating region of active distribution networks: comparison and validation of random sampling and optimal power flow based methods[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2021, 15(10): 1600–1612.
- [48] AGEEVA L, MAJIDI M, POZO D. Analysis of feasibility region of active distribution networks[C]//2019 International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). Moscow, Russia. IEEE, 2019: 1–5.
- [49] TAN Z F, ZHONG H W, XIA Q, *et al.* Estimating the robust P-Q capability of a technical virtual power plant under uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(6): 4285–4296.
- [50] CHEN L, TANG Z Y, HE S J, *et al.* Feasible operation region estimation of virtual power plant considering heterogeneity and uncertainty of distributed energy resources[J]. *Applied Energy*, 2024, 362: 123000.
- [51] CHEN X, LI N. Leveraging two-stage adaptive robust optimization for power flexibility aggregation[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2021, 12(5): 3954–3965.
- [52] CUI B, ZAMZAM A, BERNSTEIN A. Network-cognizant time-coupled aggregate flexibility of distribution systems under uncertainties[J]. *IEEE Control Systems Letters*, 2020, 5(5): 1723–1728.
- [53] 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.
- [54] WANG S, WU W, CHEN Q, *et al.* Stochastic flexibility evaluation for virtual power plant by aggregating distributed energy resources[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2024, 10(3): 988–999.
- [55] KARIMYAN P, ABEDI M, HOSSEINIAN S H, *et al.* Stochastic approach to represent distributed energy resources in the form of a virtual power plant in energy and reserve markets[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10(8): 1792–1804.
- [56] SONG M, AMELIN M. Purchase bidding strategy for a retailer with flexible demands in day-ahead electricity market[C]//2017 IEEE Manchester PowerTech. Manchester, UK. IEEE, 2017: 1.
- [57] 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.
- [58] NEZAMABADI H, SETAYESH NAZAR M. Arbitrage strategy of virtual power plants in energy, spinning reserve and reactive power markets[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10(3): 750–763.
- [59] 宋懿洋, 申萌均, 王剑晓, 等. 基于多参数规划的虚拟电厂边际成本函数解析表征方法 [J/OL]. *电网技术*: 1–11 [2024-09-16]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0892>.
SONG Yiyang, SHEN Mengjun, WANG Jianxiao, *et al.* Analytical characterization of marginal cost function for virtual power plants based on multi-parametric programming [J/OL]. *Power System Technology*: 1–11 [2024-09-16]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0892>.
- [60] 周挺, 谭玉东, 孙晋, 等. 虚拟电厂参与能量与辅助服务市场的协同优化策略 [J]. *中国电力*, 2024, 57(1): 61–70.
ZHOU Ting, TAN Yudong, SUN Jin, *et al.* Collaborative optimization strategy for virtual power plant participating in energy



- and ancillary service market[J]. *Electric Power*, 2024, 57(1): 61–70.
- [61] 关轶文, 张宸, 张正, 等. 计及多维源荷相关性和调峰能力的虚拟电厂规划 [J/OL]. *电网技术*: 1–13[2024-09-17]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0140>.
- GUAN Yiwen, ZHANG Chen, ZHANG Zheng, *et al.* Virtual power plant planning considering multi-dimensional generation-load correlation and peak shaving ability [J/OL]. *Power System Technology*: 1–13[2024-09-17]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0140>.
- [62] LI T, SHAHIDEHPOUR M. Strategic bidding of transmission-constrained GENCOs with incomplete information[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2005, 20(1): 437–447.
- [63] BAHRAMARA S, YAZDANI-DAMAVANDI M, CONTRERAS J, *et al.* Modeling the strategic behavior of a distribution company in wholesale energy and reserve markets[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 9(4): 3857–3870.
- [64] CUI H T, LI F X, FANG X, *et al.* Bilevel arbitrage potential evaluation for grid-scale energy storage considering wind power and LMP smoothing effect[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 9(2): 707–718.
- [65] KAZEMPOUR S J, CONEJO A J, RUIZ C. Strategic bidding for a large consumer[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 30(2): 848–856.
- [66] YAZDANI-DAMAVANDI M, NEYESTANI N, CHICCO G, *et al.* Aggregation of distributed energy resources under the concept of multienergy players in local energy systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(4): 1679–1693.
- [67] YAZDANI-DAMAVANDI M, NEYESTANI N, SHAFIE-KHAH M, *et al.* Strategic behavior of multi-energy players in electricity markets as aggregators of demand side resources using a bi-level approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 33(1): 397–411.
- [68] 孙勇, 仪忠凯, 李宝聚, 等. 多元零售市场环境下电力聚合商有功-无功协同优化竞标策略 [J]. *电力建设*, 2024, 45(10): 146–157.
- SUN Yong, YI Zhongkai, LI Baoju, *et al.* Active and reactive power collaborative bidding strategy for the power aggregator in multiple categories of retail markets[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(10): 146–157.
- [69] 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 Fei, SHAO Ping, WANG Xuanyuan, *et al.* Bi-level bidding strategies for virtual power plants considering purchase and sale risks[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(6): 28–35.
- [70] SONG M, AMELIN M. Price-maker bidding in day-ahead electricity market for a retailer with flexible demands[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 33(2): 1948–1958.
- [71] DING H J, PINSON P, HU Z C, *et al.* Optimal offering and operating strategy for a large wind-storage system as a price maker[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(6): 4904–4913.
- [72] SHAFIEE S, ZAMANI-DEHKORDI P, ZAREIPOUR H, *et al.* Economic assessment of a price-maker energy storage facility in the Alberta electricity market[J]. *Energy*, 2016, 111: 537–547.
- [73] ARTEAGA J, ZAREIPOUR H. A price-maker/price-taker model for the operation of battery storage systems in electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(6): 6912–6920.
- [74] 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*, 2015, 31(1): 695–705.
- [75] 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*, 2017, 10(1): 650–660.
- [76] AYÓN X, GRUBER J K, HAYES B P, *et al.* An optimal day-ahead load scheduling approach based on the flexibility of aggregate demands[J]. *Applied Energy*, 2017, 198: 1–11.
- [77] NGUYEN D T, LE L B. Risk-constrained profit maximization for microgrid aggregators with demand response[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2014, 6(1): 135–146.
- [78] VAGROPOULOS S I, KYRIAZIDIS D K, BAKIRTZIS A G. Real-time charging management framework for electric vehicle aggregators in a market environment[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 7(2): 948–957.
- [79] SARKER M R, DVORKIN Y, ORTEGA-VAZQUEZ M A. Optimal participation of an electric vehicle aggregator in day-ahead energy and reserve markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 31(5): 3506–3515.
- [80] VAGROPOULOS S I, BAKIRTZIS A G. Optimal bidding strategy for electric vehicle aggregators in electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(4): 4031–4041.
- [81] ZHANG T, CHEN S X, GOOI H B, *et al.* A hierarchical EMS for aggregated BESSs in energy and performance-based regulation markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 32(3):



- 1751–1760.
- [82] HE G N, CHEN Q X, KANG C Q, *et al.* Cooperation of wind power and battery storage to provide frequency regulation in power markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 32(5): 3559–3568.
- [83] YI Z K, XU Y L, 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*, 2019, 11(3): 1332–1346.
- [84] YI Z K, XU Y L, WEI X, *et al.* Robust security constrained energy and regulation service bidding strategy for a virtual power plant[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, PP(99): 1–11.
- [85] 梁泽琪, 周云, 冯冬涵, 等. 考虑电碳绿证市场耦合的园区综合能源系统日前优化调度 [J]. *电力建设*, 2023, 44(12): 43–53.
- LIANG Zeqi, ZHOU Yun, FENG Donghan, *et al.* Day-ahead optimal scheduling of park-integrated energy system considering electricity-carbon-green certificate market[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(12): 43–53.
- [86] 刘晓军, 聂凡杰, 杨冬锋, 等. 碳捕集电厂-电转气联合运行模式下考虑绿证-碳交易机制的综合能源系统低碳经济调度 [J]. *电网技术*, 2023, 47(6): 2207–2222.
- LIU Xiaojun, NIE Fanjie, YANG Dongfeng, *et al.* Low carbon economic dispatch of integrated energy systems considering green certificates-carbon trading mechanism under CCP-P2G joint operation model[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(6): 2207–2222.
- [87] 崔杨, 沈卓, 王铮, 等. 考虑绿证-碳排等价交互机制的区域综合能源系统绿色调度 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(12): 4508–4517.
- CUI Yang, SHEN Zhuo, WANG Zheng, *et al.* Green dispatch of regional integrated energy system considering green certificate-carbon emission equivalent interaction mechanism[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(12): 4508–4517.
- [88] 周伟, 孙永辉, 谢东亮, 等. 计及改进阶梯型碳交易和热电联产机组灵活输出的园区综合能源系统低碳调度 [J]. *电网技术*, 2024, 48(1): 61–73.
- ZHOU Wei, SUN Yonghui, XIE Dongliang, *et al.* Low-carbon dispatch of park-level integrated energy system considering improved ladder-type carbon trading and flexible output of combined heat and power unit[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(1): 61–73.
- [89] AN Y, ZENG B. Exploring the modeling capacity of two-stage robust optimization: variants of robust unit commitment model[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 30(1): 109–122.
- [90] NING C, YOU F Q. Data-driven adaptive robust unit commitment under wind power uncertainty: a Bayesian nonparametric approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2019, 34(3): 2409–2418.
- [91] 朱誉, 仪忠凯, 陆秋瑜, 等. 基于典型场景集的虚拟电厂与配电网协同定价策略 [J]. *电力建设*, 2019, 40(6): 74–85.
- ZHU Yu, YI Zhongkai, LU Qiuyu, *et al.* Collaborative pricing strategy of virtual power plant and distribution network considering typical scenes[J]. *Electric Power Construction*, 2019, 40(6): 74–85.
- [92] 段翩, 朱健全, 刘明波. 基于双层模糊机会约束规划的虚拟电厂优化调度 [J]. *电工技术学报*, 2016, 31(9): 58–67.
- DUAN Pian, ZHU Jianquan, LIU Mingbo. Optimal dispatch of virtual power plant based on bi-level fuzzy chance constrained programming[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(9): 58–67.
- [93] 范松丽, 艾苒, 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.
- [94] 鲍彦, 石锦凯, 陈世豪. 考虑负荷预测不确定性的快充站储能鲁棒实时控制策略 [J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(10): 107–116.
- BAO Yan, SHI Jinkai, CHEN Shihao. Robust real-time control strategy for energy storage in fast charging station considering load forecasting uncertainty[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(10): 107–116.
- [95] ZHAO H T, WANG X Y, WANG B, *et al.* A multi time-scale robust aggregation model for virtual power plant based on rolling correction[C]//2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Chengdu, China. IEEE, 2022: 2574–2579.
- [96] 闫鹏, 曾四鸣, 李铁成, 等. 基于改进量子遗传算法的虚拟电厂在多时间尺度下参与 AGC 优化调度 [J]. *电网与清洁能源*, 2023, 39(3): 23–32.
- YAN Peng, ZENG Siming, LI Tiecheng, *et al.* Optimal scheduling of virtual power plant participating in AGC based on improved quantum genetic algorithm on multi-time scale[J]. *Power System and Clean Energy*, 2023, 39(3): 23–32.
- [97] KHAVARI F, BADRI A, ZANGENEH A. Energy management in



- multi-microgrids via an aggregator to override point of common coupling congestion[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2019, 13(5): 634–642.
- [98] ASIMAKOPOULOU G E, DIMEAS A L, HATZIARGYRIOU N D. Leader-follower strategies for energy management of multi-microgrids[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2013, 4(4): 1909–1916.
- [99] DU Y, LI F X. A hierarchical real-time balancing market considering multi-microgrids with distributed sustainable resources[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2018, 11(1): 72–83.
- [100] 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.
- 作者简介:**
仪忠凯 (1995—), 男, 博士, 副教授, 从事虚拟电厂聚合调控及其运营模式、运筹优化和机器学习方法在电力系统中的应用研究, E-mail: yzk_article@163.com;
侯朗博 (1999—), 男, 博士研究生, 从事灵活性资源虚拟电厂建模与控制方法研究, E-mail: houlangbo1@163.com;
徐英 (1980—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 从事电力系统运行控制的研究, E-mail: ying.xu@hit.edu.cn。
(责任编辑 于静茹)

Aggregation and Operation Key Technology of Virtual Power Plant with Flexible Resources in Electricity Market Environment: Review

YI Zhongkai¹, HOU Langbo¹, XU Ying¹, WU Yongfeng¹, LI Zhimin¹, WU Junfei², FENG Teng³, HAN Liu³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. Quzhou Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Quzhou 324000, China; 3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The rapid development and increasing number of flexible resource technologies offer immense potential for enhancing the flexibility and economic efficiency of power systems. Virtual power plants (VPPs) provide an effective means for supporting the participation of massive, heterogeneous, and decentralized resources in power market transactions through coordinated management and aggregated control of these resources. Addressing issues such as the difficulty in efficiently managing diverse and massive heterogeneous flexible resources within VPPs in the power market environment, benefit conflicts among different operating entities, and the coupling relationship between energy and ancillary services, this paper analyzes and summarizes the technical challenges, current research progress, and future research directions in the end-to-end operation of flexible resource VPPs in the power market environment. The analysis focuses on three aspects of flexible resource VPPs: aggregated modeling, bidding strategies, and operational control. It systematically summarizes the model characteristics, correlations, and applicable scenarios of relevant mainstream technological approaches. This comprehensive understanding of the key scientific issues, core theoretical methods, and mainstream technical solutions involved in flexible resource VPPs in the power market environment provides suggestions for future research directions and technological development of flexible resource VPPs.

This work is supported by the Science and Technology Project of SGCC (Review of the Aggregation and Operation Key Technology of Virtual Power Plant with Flexible Resources in Electricity Market Environment, No.5400-202419183A-1-1-ZN).

Keywords: electricity market; virtual power plant; distributed energy resource; aggregation; bidding strategy; operation control