

兼顾公平与效率的聚合多元灵活资源的虚拟电厂协同规划

梁博森¹, 杨甲甲², 文福拴³, 王力成⁴, 董朝阳⁵, 侯北平¹

(1. 浙江科技大学自动化与电气工程学院, 浙江省杭州市 310023; 2. 詹姆斯库克大学科学与工程学院, 澳大利亚汤斯维尔市 4811; 3. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310007; 4. 浙江工业大学信息工程学院, 浙江省杭州市 310023; 5. 香港城市大学电机工程学系, 香港 999077)

摘要:“碳达峰·碳中和”目标下,虚拟电厂(VPP)在聚合海量、多元的分布式灵活资源方面的功能日渐凸显,厘清VPP的商业模型、关键问题、目标诉求有助于灵活资源和VPP的潜力挖掘和新型电力系统的低碳、零碳构建。与此同时,社会层面对于公平的关切也在加强,能源公平关系到基础生产生活,且由于灵活资源的运营可能涉及不同的参与主体,VPP规划调度中对公平性的诉求相较于传统场景尤甚。因此,文章在VPP规划中引入公平性衡量标准,提出兼顾公平与效率的聚合、调用、利益分配方案。首先,综合考虑VPP市场互动、分布式资源(DER)签约调度,建立DER和VPP的中长期调度收益模型。然后,进行不确定风险下的VPP组合优化和具有公平关切的DER决策的协同优化,并基于先签约后调度的思路借助两阶段优化模型进行求解。接着,探究了DER续约率的优化和区域容量载量限制的影响。最后,从具体的算例和数据结果分析得出,公平关切对VPP的收益空间压缩其实较为有限,但需要确立合理的储能、可中断负荷等灵活性资源的市场化定价,以避免造成恶性竞争和投资浪费。

关键词:虚拟电厂; 灵活资源; 需求侧响应; 公平关切; 双层优化

0 引言

在“碳达峰·碳中和”目标和新型电力系统构建背景下,海量、多元、异构的分布式资源(distributed energy resource, DER)持续涌现,针对多元DER的灵活、有效的聚合、调控,对其潜力挖掘利用具有十分关键的意义。近几年,虚拟电厂(virtual power plant, VPP)技术已在小规模的示范应用中得到了初步验证,形成了VPP的基本互动模式,并开始在不同系统调度体系和不同电力市场环境下开始探索运行^[1],以实现对于DER的灵活、有效聚合。VPP具有多业态、多场景、多结构、多主体等特质,其健康持续发展有赖于建立和健全相应的交易体系和市场机制;有赖于VPP与灵活资源间风险和价值的有效传导;有赖于资源价值的合理评估和分配。VPP可以通过聚合海量DER形成较大规模的响应容量并参与电力市场交易,促进多元灵活资源的优化配置。针对VPP的资源聚合、竞价调度、市场交易和

利益分配等运营策略进行优化,有益于降低VPP的准入门槛和经营风险,构建健康、活跃的需求侧响应生态。本文立足对VPP及其管理的DER的精细化建模,探求兼顾公平与效率的聚合多元、灵活的DER的VPP协同规划问题。

近年来,针对规划阶段VPP的资源配置开展了广泛研究。文献[2]研究了基于Gale-Shapley算法的VPP与DER匹配机制。针对调峰型VPP聚合用户的选取和优化,文献[3]提出了基于云模型和改进证据理论的方案。针对不同DER资源的特点,文献[4-7]对其响应策略、潜力评估、容量量化、交易模型开展了研究和探索。文献[8]中提出了一种适应重要性的抽样方法,用于评估发电系统在面对短期随机单元故障和VPP功率波动时备用旋转不足事件的可能性和严重程度,进而提高传统发电单元与VPP协同应对需求波动的分析工具的效率。文献[9]研究了在双层电力市场中,如何在VPP之间有效分配由于实际功率与预先计划之间偏差而产生的后期成本,并提出了一种基于合作博弈理论的成本分配算法。除此之外,还有针对特定场景的研究方案,如风光联动的频率恢复^[10-11]、基于信息物理社会系统(cyber-physical-social system, CPSSE)框架的

收稿日期: 2024-07-29; 修回日期: 2024-11-22。

上网日期: 2025-02-08。

浙江科技大学基本科研业务费资助项目(2023QN043); 国家自然科学基金资助项目(52007170)。

电动汽车聚合^[6]、电碳联动^[7]、小水电富集^[12]等。此外,还涉及多种技术手段,如区块链^[13]、分布式动态聚类算法^[14]、数据驱动的鲁棒优化^[15]等。

随着大量不稳定新能源装机接入电力系统,电力系统愈发呈现出“双高”和“双峰”的特征^[16],VPP这一可聚合调控大量分散负荷资源的概念受到热捧。各层级政府、电网企业、发电企业、负荷侧资源聚合商纷纷开展VPP建设,助力实现新型电力系统转型和双碳目标。国务院印发的《2024~2025年节能降碳行动方案》中提出“大力发展微电网、虚拟电厂、车网互动等新技术新模式”^[17],结合已经启动和建设中的项目进展和反馈,对VPP的研究学习和建设实践提出更深入具体的指导。显然,现实中的VPP的发展将伴随着不断改进和变动,需要结合现有的DER聚合特点,并针对其所面临的成分来源复杂、不确定性因素富集的特点就其规划、经营策略展开建模、优化、求解。因此,本文通过对多元灵活资源VPP的日常调度进行建模分析,探究计及多主体、高不确定性的VPP中长期规划策略,进而寻求最合适的DER聚合和管理方案,以提振潜在VPP经营者的信心和积极性,并协助政策法规制定者对VPP生态进行有效预判。

此外,社会层面上对于公平的关注也在不断增强^[18-19],能源公平关系到基础生产生活,其所受到的关切和重视正日益提升^[20]。传统的电力规划仅仅考虑效率、安全和环保,但在未来的电力规划中,对公平性的重视也会日渐加强^[21-22]。公平的维度包括但不限于程序公平、认知公平、分配公平,其中,关于分配公平的研究可以量化,研究相对较丰富^[23]。尽管形式和评价方式可能大不相同,但公平既体现在紧急时刻(对应电力系统面临的极端条件和故障等),也体现在日常规划调度中^[24-25]。目前,在电力领域中,对于公平的重视方兴未艾,大都局限在机制设计^[21]和指标设计^[22],尚未见到与具体实例相结合的计及分配公平,兼顾效率的调度优化方案研究。对于有多个DER参与的VPP规划,其涉及到的不同调度方式、定价方案等,都可能引发公平性的问题。由于DER可能涉及不同的参与主体,对公平性的诉求可能较一些传统规划调度场景出现的更早。

因此,结合本文研究对象和问题的特点,本文在VPP规划中引入公平性衡量标准,提出兼顾公平与效率的聚合、调用、利益分配方案。首先,介绍背景和研究现状,引出研究意义。然后,针对VPP和灵活DER进行建模。接着,在个体建模的基础上建立

多DER和VPP的协同优化模型,对于多个DER和多个VPP间的互动、博弈行为进行建模和优化,进而提出基于先签约后调度思路的两阶段优化模型求解方法,对协同优化问题进行求解和分析。然后,借助算例展现不同DER和VPP间的互动机理和优化求解过程。最后,总结全文。

1 多元灵活资源VPP建模

1.1 VPP的市场互动和调度收益模型

VPP可以结合其整合的DER特性,对外部在日前市场上申报出力曲线,作为价格接受者参与现货市场获得收益。以小时为单位,其外部经营目标以在电力现货市场中运行收益最大化为目标,即

$$\max \pi_t = p_t \theta_t - C_t \quad (1)$$

式中: π_t 为第 t 小时VPP的收益; p_t 为第 t 小时现货市场电价; θ_t 和 C_t 分别为第 t 小时VPP申报的相应出力和聚合成本。

考虑各种可再生能源发电出力的波动性,VPP的实际出力与出清电量之间可能存在偏差,这部分偏差所产生的成本也计入 C_t 中(实际可以内部消纳,也可以外部购买或者缴纳罚金,若在容许偏差的范围内则不需要缴纳罚金)。

1.2 已签约的DER的调度模型

外部经营申报的出力 θ_t 主要依赖内部DER的特性估测,即电力平衡约束取得。为不失一般性,这里选取3类不同特性的典型DER作为VPP的组成,即间歇性发电出力(intermittent generation, IG)、储能系统(battery energy storage system, BESS)、可中断负荷(interruptible load, IL),则 θ_t 可以通过式(2)确定。

$$\theta_t \approx \theta_{t,IG} + \theta_{t,BESS} + \theta_{t,IL} \quad (2)$$

式中: $\theta_{t,IG}$ 、 $\theta_{t,BESS}$ 、 $\theta_{t,IL}$ 分别为第 t 小时IG、BESS、IL对总出力的贡献。

IG的出力特性、BESS和IL的运行、容量约束如式(3)~式(7)所示。

$$\theta_t^{IG} = \theta_t^{IG0} + \epsilon_t \quad (3)$$

$$\eta_t = \eta_{t-1} - \theta_{t,BESS} \quad (4)$$

$$\eta_{\min} \leq \eta_t \leq \eta_{\max} \quad (5)$$

$$-\theta_{\max} \leq \theta_{t,BESS} \leq \theta_{\max} \quad (6)$$

$$0 \leq \theta_t^{IL} \leq \theta_{\max}^{IL} \quad (7)$$

式中: $\theta_{t,IG0}$ 和 ϵ_t 分别为第 t 小时IG的预测值和偏差值; η_t 为第 t 小时BESS的容量; $\eta_{\min}$ 、 $\eta_{\max}$ 分别为BESS容量的下、上限; $\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\max,IL}$ 分别为BESS单位时间内的充/放电容量最大值和最大IL容量。

1.3 DER和VPP的中长期(合同期)收益模型

大型DER可以采用专员独立参与市场交易,并入VPP中的DER大多规模中等或者偏小,独立经营和核算能力较差,故本文中VPP聚合利益分配拟采用定价包干管理的方式(类似于租赁合同)。这样的方式也有助于降低DER选取VPP对象和日常运营的门槛(只需要比较租赁/合约价格,签订合同即可)。

设该VPP中聚合IG、BESS和IL的个数分别为 N_{IG} 、 N_{BESS} 、 N_{IL} ,相应的聚合价格分别为 $\{\phi_{k,IG}\}, k=1, 2, \dots, N_{IG}$ 、 $\{\phi_{k,BESS}\}, k=1, 2, \dots, N_{BESS}$ 、 $\{\phi_{k,IL}\}, k=1, 2, \dots, N_{IL}$;相应的聚合容量(小时化后的时价,可以参考年化的折算方法进行计算)分别为 $\{q_{k,IG}\}, k=1, 2, \dots, N_{IG}$ 、 $\{q_{k,BESS}\}, k=1, 2, \dots, N_{BESS}$ 、 $\{q_{k,IL}\}, k=1, 2, \dots, N_{IL}$ 。所以,VPP单位时段内的聚合成本 C_t 为:

$$C_t = \sum_{M=\{IG, BESS, IL\}} \sum_{k=1}^{N_M} \phi_{k,M} q_{k,M} + \Delta\delta_t \quad (8)$$

式中: $\Delta\delta_t$ 为第 t 小时出力偏差的惩罚成本。

本文设置 $\Phi(\phi) = \sum_{M=\{IG, BESS, IL\}} \sum_{k=1}^{N_M} \phi_{k,M} q_{k,M}$ 。后续 k 和 M 的取值范围与此相同,将不再重述。对于每个DER,签订中长期合约后整体收益就已经确定,对其后参与意愿产生影响的主要是与VPP日常运行对其自本身的影响有关,例如,IG的损耗、BESS的充/放电深度等产生的电池损耗、IL的中断频次和时长。设DER具有公平关切行为,其决策目标为自身效用最大化,参考文献[26],假设第 M 类第 k 个DER在公平关切下的效用函数 $U_{r,k,M}$ 为:

$$U_{r,k,M} = \Pi_{k,M} - \lambda(\Pi_{VPP} - \Pi_{k,M}) \quad (9)$$

式中: $\Pi_{k,M}$ 和 Π_{VPP} 分别为评估周期(中长期合同周期)内第 M 类第 k 个DER和整个VPP的利润; λ 为DER的公平关切系数。

$$\Pi_{VPP} = \sum_{t=1}^T \pi_t = \sum_{t=1}^T (p_t \theta_t - \Phi(\phi) - \Delta\delta_t) \quad (10)$$

$$\Pi_{k,M} = \phi_{k,M} q_{k,M} \quad (11)$$

式(9)右边第1部分是实际经济收益,第2部分可以理解为获得感亏损,其为VPP的收益与该DER收益的差乘以公平关切系数。不同的市场设定下的 λ 差异较大,显然,DER数量增加会导致个体DER在总收益分成中占比更小,地位也更为被动。本文研究的是DER与VPP的匹配问题,DER间和VPP间都存在竞争,本文也是在这样的竞争背景下展开的。因为是长期签约,所以DER更关注的是签约期

间的收益,而不是某个价格。以包含获得感亏损修正的效用函数为凭据来指导DER决策,可以综合反映价格、公平性等因素的影响。

2 多元灵活资源及VPP的协同优化

VPP的规划,其实是多种DER的聚合方式。如上文所述,VPP的优化目标是使得VPP的预期收益最大,该目标函数是聚合价格 ϕ_{IG} 、 ϕ_{BESS} 、 ϕ_{IL} 的函数,当聚合价格确定后,DER通过被动地根据这一价格进行决策,影响实际的聚合容量,进而反过来对VPP的预期收益产生影响。对VPP收益产生影响的不确定性因素主要有2个来源:不确定性出力 ϵ_t 和未来电价 p_t 。出于篇幅限制,本文仅考虑VPP的聚合价格决策和DER对VPP整体的公平关切行为对VPP和DER规划的实际期望收益的影响,DER之间的同类竞争心理和VPP的增量行为将在后续的研究中再详细展开。

2.1 不确定风险下的VPP组合优化

VPP需要结合内部的DER组成和对不确定性风险的预期,给出某DER的聚合价格,其中,长期(合同期内)的预期利润就由预期风险收益减除这部分固定支出组成。对于VPP的优化目标如式(12)所示,值得注意的是,需同时满足式(1)一式(11)中关于相关变量的运行约束限制。

$$\max E(\Pi_{VPP}) = \sum_{t=1}^T E(p_t \theta_t - \Phi(\phi) - \Delta\delta_t) \quad (12)$$

式中: $E(\cdot)$ 为期望函数。

对于某个DER来说,由于其公平关切属性,其选择VPP的标准并不是期望收益最大,而是自身效用函数最大,即收益分配的公平和合理性。由于其可能仅有有限的VPP可选,他的决策行为较为有限,即如果期望效用为正,选择加入如式(9)中定义的效用函数的期望值最大的一个;如果期望效用为0或者负值,则不参与聚合。

本文考虑VPP的成立模型,即没有已经长期签约的或者自有的DER资源。增量模型,即考虑已有签约和自有DER的VPP规划将在后续研究中展开。由于是成立之初,且没有自有DER,每个VPP不会表现出特殊偏好。这里依照上述建模,将DER分为3类:IG、BESS和IL。不失一般性,本文建模中的DER聚合价格为一DER一价。即本文下述互动机理的分析基于同一个VPP内同类DER初始聚合价格相同展开。设该聚合价格为 $\phi_M, M=\{IG, BESS, IL\}$ 。聚合价格关系到每个DER的聚合

能否确立,也关系到VPP的成本回收,受到未来的实际出力、电价等多个不确定因素影响,有必要进行合理优化,管控运营风险。结合上述简化流程,VPP的聚合成本可以表示为

$$\Phi(\phi) = \phi_{IG} Q_{IG} + \phi_{BESS} Q_{BESS} + \phi_{IL} Q_{IL} \quad (13)$$

式中: Q_M 为 VPP 内第 M 类 DER 的总聚合量, $M = \{IG, BESS, IL\}$ 。

设 $u_{k,M}$ 为表示第 M 类第 k 个 DER 的聚合决策的 0-1 变量,取值为 1 表示决定加入该 VPP,否则取 0。则有:

$$Q_M = u_{k,M} q_{k,M} \quad (14)$$

剥离不确定性因素部分,则整个合同周期内 VPP 的总利润的期望为:

$$\max E(\Pi_{VPP}) = \sum_{t=1}^T E(p_t \theta_t - \Delta \delta_t) - \Phi(\phi) T \quad (15)$$

2.2 具有公平关切的 DER 的决策

由于 DER 具有公平关切,所以仅当 VPP 的报价对应的效用函数不小于 0 时,该报价对于 DER 才有意义。对于该不确定模型,应该保证效用函数期望不小于 0。这里考虑 2 种场景:存在和不存在 VPP 竞争。对于不存在竞争的场景,对于 VPP 给出的聚合价格,DER 的有限决策只有 2 种:加入和不加入。

$$u_{k,M} = \begin{cases} 0 & E(U_{r,k,M}) < 0 \\ 1 & E(U_{r,k,M}) \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

对于效用函数期望的计算,将简化场景代入,有 $\Pi_{k,M} = \phi_M q_{k,M} T$,进而可以求其期望效用函数为:

$$E(U_{r,k,M}) = E\{\Pi_{k,M} - \lambda(\Pi_{VPP} - \Pi_{k,M})\} = \lambda \Phi(\phi) T + (1 + \lambda) \phi_M q_{k,M} T - \lambda \sum_{t=1}^T E(p_t \theta_t - \Delta \delta_t) \quad (17)$$

考虑 VPP 竞争时,由于是初立模型,且没有自有 DER, VPP 不存在特殊偏好,故 DER 的决策也略显简单,即价高者得。在存在 VPP 竞争的情况下,主要对于实际价格引入竞争机制,而不考虑一事一议的方式。这里考虑存在 2 个 VPP(A 和 B), DER 的有限决策变为 3 种:加入 A、加入 B、不加入。即

$$u_{k,M,A} = \begin{cases} 1 & E(U_{rA,k,M}) \geq 0, \phi_{M,A} \geq \phi_{M,B} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

$$u_{k,M,B} = \begin{cases} 1 & E(U_{rB,k,M}) \geq 0, \phi_{M,B} \geq \phi_{M,A} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

$$u_{k,M,A} + u_{k,M,B} \leq 1 \quad (20)$$

$$\phi_M = \max\{\phi_{M,A}, \phi_{M,B}\} \quad (21)$$

当两者报价相同时, DER 随机加入。假设该 DER 选择了 A,对于存在竞争的场景, DER 的效用函数期望 $E(U_{rA,k,M})$ 与式(17)中的 $E(U_{r,k,M})$ 相同。故竞争可以用单纯博弈理论的互动机制求解,在 DER 与 VPP 的互动当中, DER 只选择与胜出的 VPP 互动。

2.3 VPP 与 DER 的协同优化

在经济学中,效率通常指的是资源的有效分配,即在生产过程中以最低的成本生产出最大的产出。在本文中, VPP 组合优化决策就是基于效率最优(组合优化的期望收益最大)。结合关于公平的定义,本文中的公平主要指的是分配公平,或者更进一步说,是利益分配的合理性。模型借助考虑公平关切的效用函数,引入了两方决策间的互动耦合,需要进行协同优化求解。VPP 的规划,涉及了 VPP 的最优决策和价值模型与 DER 的决策和价值模型的互动和评价。考虑到 DER 的公平关切行为, DER 运营模型不再仅仅关注经济收益,还引入了对利润分摊方式合理性的评价和互动。VPP 的真实收益与 DER 的参与直接关联, DER 的效用函数也与 VPP 的总收益有关,上、下层互动的模型无法进行有效迭代和更新。就上层模型的诉求而言, VPP 为了寻求利益最大化,将 DER 的定价置 0, DER 置 0 必然导致含公平关切的 DER 的效用函数为负。设 DER 签约价格设置合理,使得预测偏差可以由 DER 内部调度补足,不发生额外惩罚,并改写分段函数式(16), VPP 与 DER 的协同优化模型可以简化为:

$$\max f(\{\phi_M\}; \{\theta_t\}) = \sum_{t=1}^T E(p_t \theta_t - \Delta \delta_t) - \Phi(\phi) T \quad (22)$$

s.t.

式(2)一式(7),式(13),式(14),式(17)

$$u_{k,M} E(U_{r,k,M}) \geq 0 \quad \forall M, k \quad (23)$$

$$u_{k,M} \in \{0, 1\} \quad \forall M, k \quad (24)$$

式中: T 为总时长。

将两层约束合并后,会出现高次约束(如式(23)所示),使得该问题不适用于常规的求解方法,可以采用大 M 法进行松弛求解,如式(25)所示。

$$xf(x) \geq 0 \Rightarrow f(x) + Z(1-x) \geq 0 \quad (25)$$

式中: Z 为一个与 $f(x)$ 相比很大的数。

本文调度过程主要分为两个阶段:第 1 阶段为确定 DER 的签约价格,然后再进一步确定是否签约和电量申报;第 2 阶段是根据签约价格、签约决策和电量申报进行实际的调度允许,可能面临预测偏差

(电价和出力),可以借助签约的BESS和IL去协调中和,无法覆盖的部分则交由市场和系统(承担惩罚)。第2阶段的收益(预期值)同时也影响第1阶段的签约决策(公平关切和相关判定),故相较于传统问题,本文中的协同优化问题存在着更为较严重的耦合关系。针对这一问题,本文拟借鉴传统电网调度中的机组启停和经济调度的思路予以解决,即先决定DER是否签约,再衡量具体调度安排,进而迭代求解。

3 基于先签约后调度思路的两阶段优化模型求解

在传统电力系统调度中,机组启停和经济调度往往接续安排,由于面临巨大的启停成本,先结合整体的负荷水平和运行约束做出机组启停安排。在日后的调度中,按经济性最优(例如,等效微增率等去安排具体出力)进行调度。由于面临中长期决策(签约期内不可以随意毁约),故可以先根据初步的电价、负荷演化趋势确定DER签约报价,再在日常调度中去优化运行决策。需要指出的是,DER其实也是基于期望收益进行决策,故这里的协同优化的目标更容易达到,本周期的实际调度收益则主要会影响DER在下一个周期的签约决策。

3.1 边界签约价格初值确定

将效用函数式(17)置0,结合DER收益的定义,即可以获得某DER签约的边界价格,若低于此价格,则DER退出。即

$$\phi_M = \frac{\Pi_{k,M}}{q_{k,M}T} = \frac{\lambda}{1+\lambda} \frac{1}{q_{k,M}T} \Pi_{VPP} \quad (26)$$

显然,同质同量的DER会具有相同的签约价格。忽略DER的签约意愿,松弛相关约束,求得VPP调度的最大回报 Π_{VPP0} ,并代入VPP调度最大回报 Π_{VPP0} ,即可求得每个边界签约价格的初值,即

$$\phi_{k,M0} = \frac{\Pi_{k,M}}{q_{k,M}T} = \frac{\lambda}{1+\lambda} \frac{1}{q_{k,M}T} \Pi_{VPP0}$$

式中:下标0表示对应标量的最大值。

显然,在该设定下DER不会获得收益。在实际运行中,由于DER会分走大量的收益,故实际的签约价格往往应该在该初始价格的30%以下(对应30个DER参与的VPP,如果数量增加,这个比例会进一步下降)。在该范围内,采用第1阶段的混合整数优化模型与下层调度模型互动,求取更优的签约价格和初步的调度方案。

3.2 边界签约价格迭代求解

由于存在公平关切,所有策略都具有价格敏感性,所以这里反其道而行,以连续变量聚合价格作为决策变量,相应的聚合决策则作为状态变量参与整个学习过程。这样的设计可以充分反映计及DER公平关切行为后的调度过程的问题属性,但是相应的策略空间会显著扩大。以上一步推演获得的初值为始,采用迭代的方法进行求解,压缩求解策略空间,提升求解效率,更快更好地实现基于“先签约后调度”思路的协同优化决策。基于这样的思路,将2.3节中构建的协同优化模型改写为双层模型。

1)上层(签约决策)模型

在边界签约价格的基础上,上层模型采用第1阶段混合整数规划模型生成签约价格、签约决策和申报电量决策,传递给下层模型,用于计算期望收益。上层模型初始输入为一个预设的期望收益初值,以完成其关于公平性的判定。可以通过合理设置迭代条件,实现效率与精度的平衡。

$$f_1(\phi_{IG}, \phi_{BESS}, \phi_{IL}) = \max f_2(\{\theta_i\} | \phi_{IG}, \phi_{BESS}, \phi_{IL}) \quad (27)$$

式中: $\phi_k \in (0, 0.3\phi_{k,M0})$ 。

2)下层(调度决策)模型

将协同优化问题解耦后,下层调度决策模型如下所示,可以采用求解器进行有效求解。考虑不同的电价、可再生能源出力波动场景,构建不同的下层模型分别探究相应场景下的运行收益,并进而求取其期望收益,与上层模型进行迭代,直至收敛。其中,同类、同价的DER的选取存在随机性,后续研究中将任意选择或平分任务,不区分同类、同价的DER供体。在 θ_i 申报步骤中可进行适度的预判,以避免较大偏差,剩余的偏差可以由调整实际BESS和IL的调度决策 $\theta'_{i,BESS}$ 、 $\theta'_{i,IL}$ 来填充,无法补足的部分则构成缺口 D_i ,承担单价为 χ 的差额惩罚。即

$$\begin{cases} \max_{\phi_{IG}, \phi_{BESS}, \phi_{IL}} f_2(\{\theta_i\}) = \sum_{i=1}^T E(p_i \theta_i - \Delta_i) - \Phi(\phi)T \\ \text{s.t. 式(2)—式(7), 式(13), 式(14), 式(17),} \\ \text{式(23), 式(24)} \end{cases} \quad (28)$$

$$\Delta \delta_i = \chi D_i = \chi(\theta_i - \theta'_{i,IG} - \theta'_{i,BESS} - \theta'_{i,IL}) \quad (29)$$

式中: $\theta'_{i,IG}$ 为实际IG出力。

3.3 DER续约率优化和区域容量载量限制

目前考虑区域内存在多个VPP,呈完全竞争状态,后续将更多关注VPP调度决策行为影响以及市场力影响。在不考虑合作和博弈的情景下,本文的框架也可以适用于DER续约率的优化和区域容量

载量限制的模拟,其相应的针对VPP个体行为的约束和表述也适用于存在博弈和合作的情况。

DER续约率可以根据最终的优化结果而定,将其代入式(17)即可以获得每个DER的续约决定,可以根据其与价格的演化趋势,衡量分析签约价格的适配(公平)程度。

对于区域容量载量,即该区域的总负荷需求容量(设为 Ω),不考虑与其他VPP的互动,单纯分析其容量限制,可以针对式(2)增加关于区域容量载量的限制约束,如式(30)所示。将其并入3.2节的优化模型进行求解,即可以得到受限下的收益和决策。

$$\theta_i \leq \Omega \quad \forall t \quad (30)$$

如果逐渐缩小其服务范围,达到一定程度时其总收益也将收到影响,也即该区域的DER签约过载,或将导致DER的签约价格出现较大落差,后续算例分析中,也将对这一影响加以分析。

4 算例分析

4.1 问题描述

以某局部地区的DER聚合为例,阐述所提出的兼顾公平与效率的VPP规划,并展示所提出的求解方法。本文考虑单个VPP中有10个IG、10个BESS、10个IL,所有DER均具有公平关切行为,合同周期为1个月。采用澳大利亚国家电力市场(national electricity market, NEM)中新南威尔士州地区2023年4月的电价数据为背景展开研究(NEM的实时电价计价间隔为5分钟,本文对小时内的电价求取了平均值,更细的研究将在后续相同场景下的调度优化研究中开展)。抽取典型日的电价和风力数据为研究场景对预期收益和签约容量进行分析。

为不失一般性,考虑各类DER有2~3种容量组成,这里IG以风力发电机组为例,其中,5台容量为500 kW,其余5台容量为1000 kW; BESS中有3台容量为600kW、3台为400 kW、4台为200 kW,单位时间的充放电速率均为总容量的20%;有1个IL的规模为1000 kW,其余IL的规模均为100 kW,只有对总中断时长的限制,对单次响应的深度没有额外约束。设实际风力出力偏差为总量的 $\pm 10\%$,随机生成10个风机出力场景,风机出力场景1下典型风机出力和不同机组的实际出力如图1所示;电价取连续10天电价作为10个场景,并以其平均值为预测数据,典型日和10个电力场景的电价数据如图2所

示。风机出力场景 i 和电价场景 j 形成联合场景 (i, j) ,则共有100组联合场景。公平关切系数 λ 取0.5,报量差额的罚系数设为1 000 澳元/kW·h,大M法中的罚因子取1 000。

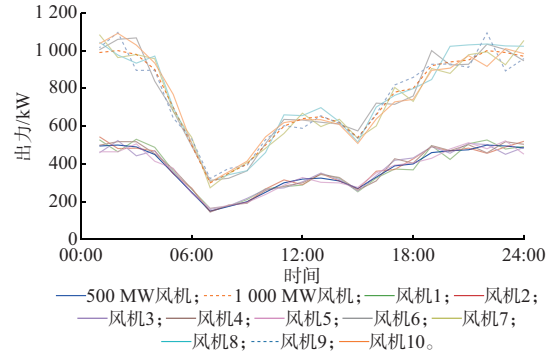


图1 风机出力场景1下典型风机出力和不同机组的出力
Fig. 1 Typical wind turbine output and output of different units under different scenarios

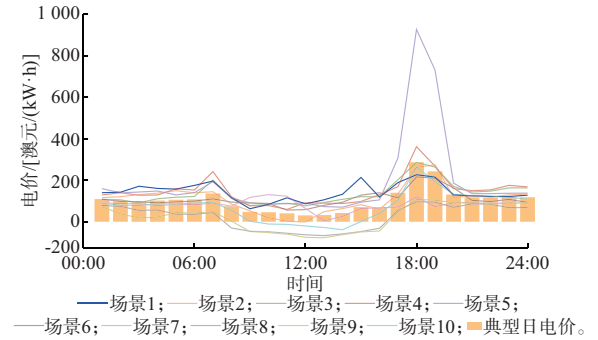


图2 典型日预测电价和10个场景电价对比
Fig. 2 Comparison of predicted electricity prices on typical day with prices in 10 scenarios

4.2 结果分析与讨论

通过上、下层模型的迭代求解,最终得到VPP对IL、BESS和IL的签约价格分别为2.78, 13.89, 13.89 澳元/kW·h, 典型日的VPP预期收益为 9.60×10^6 澳元。全部DER都选择参与VPP调度。第1阶段中的报量决策如图3所示。

以联合场景(1,1)的具体实际调度数据为例,探

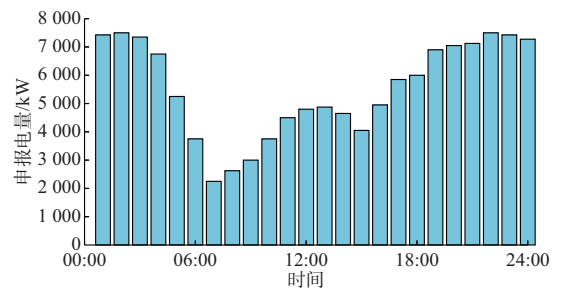


图3 典型日申报电量决策柱状图
Fig. 3 Bar chart of declared electricity quantities on typical day

究日内 BESS 和 IL 的调度情况。针对 IL 添加价格为 1 澳元/kW·h 的调度罚因子的情况下,该场景未调度 IL,对于 BESS 的调度如图 4 所示。去掉罚因子重新允许该场景,可以得到该模型决策选择调用 IL,而未利用 BESS。IL 随时间变化曲线如图 5 所示。2 种情况下都没有引发实际的报量偏差,即式 (29) 中的缺口 D_i 始终取 0,没有触发差额惩罚。

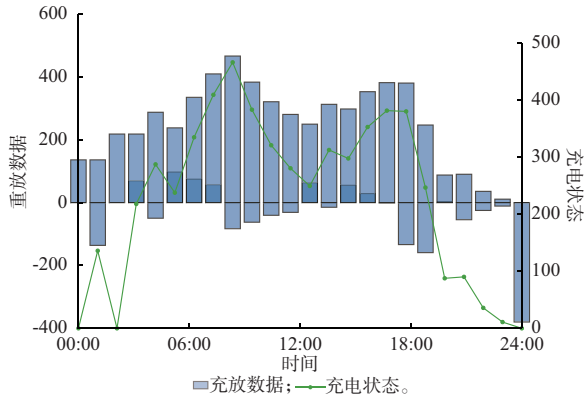


图 4 联合场景(1,1)下的电池充放数据与充电状态
Fig. 4 Battery charge and discharge data and charging status (scenario 1,1)

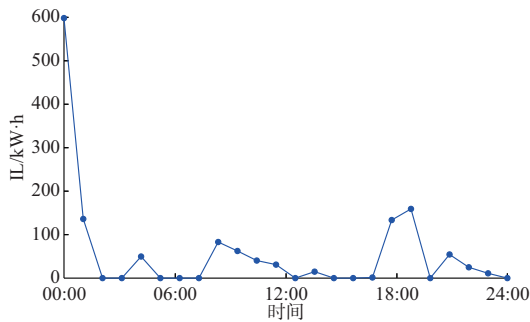


图 5 IL 随时间变化图(场景 1,1)
Fig. 5 Interruptible load variation over time (scenario 1,1)

显然,公平关切系数和系统规模会影响签约价格和 VPP 收益,本文设置 λ 在 $[0, 1]$ 之间以 0.1 为步长进行遍历,以探究公平关切系数和系统规模对于签约价格和 VPP 期望收益的影响。相应的签约决策价格和最优 VPP 期望收益如表 1 所示。目前,在电力领域关于公平性的研究尚在概念和宏观设计上,少有的几篇文献(例如,文献[21])采用了基尼系数的方法,亦侧重指标衡量,故而本文没有与现有研究结果对比,而是侧重了本算例中公平关切的有无和关切程度的演变来进行对比。

从分析结果可以看出,公平关切系数的适度提升对 VPP 期望收益的影响并不显著,甚至从完全不关切到 $\lambda = 0.1$ 有细微的提升。但是,通过适度提升

表 1 λ 对签约决策和 VPP 期望收益的影响
Table 1 Impact of λ on contract decisions and expected revenue of VPP

λ	签约决策价格/(澳元/(kW·h))			VPP 期望收益/澳元
	IG	BESS	IL	
0	0	0	0	1.00×10^7
0.1	0.76	3.79	3.79	1.07×10^7
0.2	1.39	6.94	6.94	1.04×10^7
0.3	1.92	9.62	9.62	1.01×10^7
0.4	2.38	11.90	11.90	9.84×10^6
0.5	2.78	13.89	13.89	9.60×10^6
0.6	3.13	15.63	15.63	9.42×10^6
0.7	3.43	17.16	17.16	9.24×10^6
0.8	3.70	18.52	18.52	9.08×10^6
0.9	3.95	19.74	19.74	8.94×10^6
1.0	4.17	20.83	20.83	8.81×10^6

λ , 可以使 DER 的收益得到显著提升,从而提升市场的活跃程度和健康水平。从实践意义和市场行为进行分析,不同规模、不同特性的 DER 将倾向于拥有不同的 λ , 因其本质上是反映了利益分配的合理性,不合理的分配注定导致“散伙”。 λ 会因体量不同有差异,例如,便利店和大型商超的预期收益必然不尽相同,这与其定位和体量呈现出一定的相关性。

另一方面, Ω 的变动(即逐步缩进容量载量约束)会对 VPP 的收益产生影响,设置 $\Omega = 5\,000$ kW, 重新计算签约决策价格和最优 VPP 总收益,可以得到 VPP 期望收益锐减至 6.74×10^6 澳元,如表 2 所示。签约价格和前述完全一致,未受影响。令 Ω 在 $0 \sim 8\,000$ kW 之间以步长 1 000 进行遍历(8 000 kW 略大于 IG 的总装机容量,即新添加约束完全不起效,故等于原先的解),发现相应的签约决策价格都没有发生改变,但 VPP 最优期望收益受限于区域容量载量限制随之下降。

从具体的算例和数据结果可以看出,公平关切

表 2 Ω 对签约决策和 VPP 最优总收益的影响
Table 2 Impact of Ω on contract decisions and optimal total revenue of VPP

Ω /kW	VPP 期望收益/澳元
1 000	1.62×10^5
2 000	1.92×10^6
3 000	3.60×10^6
4 000	5.19×10^6
5 000	6.74×10^6
6 000	8.25×10^6
7 000	9.35×10^6
8 000	9.60×10^6

行为本身对VPP的收益空间压缩其实较为有限,但BESS、IL等灵活性资源的市场化定价需要合理,以避免容量过剩,造成恶性竞争和投资浪费。定价过低会导致相应的欠投资和灵活资源退出,无法有效开展需求侧响应;定价过高,甚至超过弃风成本,市场这只无形的手也会将其抛弃。在本文研究中也发现,辅助服务定价太高,VPP从收益角度出发会选择弃风弃光,而不是采购灵活性资源。

此外,还可以看出需要重视对服务区域的灵活资源进行合理的组合和定容。以两阶段模型为例,对于风力的研究主要以其偏差幅度为主,在接下来的研究中,将进一步结合可再生能源出力特点,开展更有针对性的可再生能源和灵活性资源的联合规划和调度。据气象统计资料,大风时段集中在当日21:00至次日03:00,小风时段为07:00—09:00,即夜间风大、白天风小,风电的发电过程呈现一定的反调节性,即负荷高峰时风电出力较低、负荷低谷时风电出力较高。所以,风力具有与灵活性资源结合的较大潜力。

5 结语

在“碳达峰·碳中和”目标的背景下,VPP作为聚合海量、多元分布式灵活资源的关键角色正逐渐展现其功能。然而,灵活资源和VPP正处于快速发展阶段,双碳目标实现路径和新型电力系统构建方案也在持续演进,亦会对其产生重大的影响。在这种背景下,对VPP的商业模型、关键问题以及目标诉求都需要进一步明确和澄清。同时,社会对能源公平的关注也日益增强。因此,本文提出在VPP规划中引入公平性衡量标准的构想,旨在提出一套兼顾公平与效率的聚合、调用和利益分配方案。面向不确定风险下的VPP组合优化和具有公平关切的DER协同优化问题,基于“先签约后调度”的思路借助两阶段优化模型进行了有效的求解。从具体的数据结果可以看出,兼顾公平对于VPP调度的效率影响有限且可控,有较强的实践意义。研究还表明,BESS、IL等灵活性资源的市场化定价的合理确定对于避免造成恶性竞争和投资浪费具有显著意义,拟在后续工作中开展更为深入的研究。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读

网络全文。

参考文献

- [1] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等.新型电力系统规模化灵活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.
- [2] 唐家俊,吴晓刚,张思,等.基于Gale-Shapley算法的虚拟电厂与分布式资源匹配机制[J].电力系统自动化,2022,46(18):65-73.
TANG Jiajun, WU Xiaogang, ZHANG Si, et al. Matching mechanism for virtual power plants and distributed energy resources based on gale-shapley algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 65-73.
- [3] 刘江,郭云鹏,张波,等.基于云模型和改进证据理论的调峰型虚拟电厂聚合用户优选[J].电力系统自动化,2022,46(18): 37-45.
LIU Jiang, GUO Yunpeng, ZHANG Bo, et al. Aggregated user selection of peak-regulation virtual power plant based on cloud model and improved evidence theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 37-45.
- [4] 潘明杰,解大,王西田.计及分布式资源调节特性差异的虚拟电厂响应策略[J].电力系统自动化,2022,46(18):108-117.
PAN Mingjie, XIE Da, WANG Xitian. Response strategy for virtual power plant considering difference in regulation characteristics of distributed energy resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 108-117.
- [5] 孔祥玉,刘超,陈宋宋,等.考虑动态过程的可调资源集群多时间节点响应潜力评估方法[J].电力系统自动化,2022,46(18): 55-64.
KONG Xiangyu, LIU Chao, CHEN Songsong, et al. Assessment method for multi-time-node response potential of adjustable resource cluster considering dynamic process [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 55-64.
- [6] 胡俊杰,马文帅,薛禹胜,等.基于CPSSE框架的电动汽车聚合商备用容量量化[J].电力系统自动化,2022,46(18):46-54.
HU Junjie, MA Wenshuai, XUE Yusheng, et al. Quantification of reserve capacity provided by electric vehicle aggregator based on framework of cyber-physical-social system in energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 46-54.
- [7] 沈思辰,韩海腾,周亦洲,等.基于条件风险价值的多虚拟电厂电-碳-备用P2P交易模型[J].电力系统自动化,2022,46(18): 147-157.
SHEN Sichen, HAN Haiteng, ZHOU Yizhou, et al. Electricity-carbon-reserve peer-to-peer trading model for multiple virtual power plants based on conditional value-at-risk [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 147-157.
- [8] WANG Y. An adaptive importance sampling method for spinning reserve risk evaluation of generating systems incorporating virtual

- power plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5082-5091.
- [9] YANG Y, WANG Y, WU W C. Allocating ex-post deviation cost of virtual power plants in distribution networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(3): 1014-1019.
- [10] 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.
- [11] CHEN J R, LIU M Y, MILANO F. Aggregated model of virtual power plants for transient frequency and voltage stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4366-4375.
- [12] 陈雨鸽,陈昌铭,张思,等.考虑时空耦合的小水电富集型虚拟电厂优化调度策略[J].电力系统自动化,2022,46(18):90-98.
CHEN Yuge, CHEN Changming, ZHANG Si, et al. Optimal dispatching strategy of small hydropower enriched virtual power plant considering temporal-spatial coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 90-98.
- [13] LI H Y, HUI H X, ZHANG H C. Blockchain-assisted virtual power plant framework for providing operating reserve with various distributed energy resources[J]. iEnergy, 2023, 2(2): 133-142.
- [14] ZHANG R F, HREDZAK B. Distributed dynamic clustering algorithm for formation of heterogeneous virtual power plants based on power requirements[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 192-204.
- [15] FANG F, YU S Y, XIN X L. Data-driven-based stochastic robust optimization for a virtual power plant with multiple uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 456-466.
- [16] 郭霁莹.新能源成我国第一大电源新型电力系统构建还有哪些问题待解[N].第一财经日报,2024-07-18.
GUO Jiying. What problems remain to be solved in the construction of new power system[N]. China Business News, 2024-07-18.
- [17] 国务院关于印发《2024—2025年节能降碳行动方案》的通知[EB/OL]. [2024-01-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202405/content_6954323.htm.
Notice of the State Council on “action plan for energy conservation and carbon reduction in 2024-2025”[EB/OL]. [2024-01-01]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202405/content_6954323.htm.
- [18] CAMPBELL C L, HEINRICH D, SCHOENMÜLLER V. Consumers' reaction to fair trade motivated price increases[J]. Journal of Retailing and Consumer Services, 2015, 24: 79-84.
- [19] COHEN M C, ELMACHTOUB A N, LEI X. Price discrimination with fairness constraints[J]. Management Science, 2022, 68(12): 8536-8552.
- [20] WANG Q, FAN J, KWAN M P, et al. Examining energy inequality under the rapid residential energy transition in China through household surveys[J]. Nature Energy, 2023, 8: 251-263.
- [21] 戴俊良,王鹏,王轩,等.基于基尼系数的电力调度公平性指标探讨[J].电力系统自动化,2008,32(2):26-29.
DAI Junliang, WANG Peng, WANG Xuan, et al. Discussion on impartiality index of power dispatching based on gini coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 26-29.
- [22] 王剑晓,钟海旺,夏清,等.基于价值公平分配的电力市场竞争机制设计[J].电力系统自动化,2019,43(2):7-17.
WANG Jianxiao, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Competitive mechanism design in electricity market based on fair benefit allocation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 7-17.
- [23] LIN Y L, WANG J H, YUE M. Equity-based grid resilience: how do we get there?[J]. The Electricity Journal, 2022, 35(5): 107135.
- [24] 卢延国.能源观澜公平与效率:电力辅助服务的必由之路[J].能源,2019(8):52-55.
LU Yanguo. Fairness and efficiency of energy resources: the only way for power auxiliary service[J]. Energy, 2019(8): 52-55.
- [25] 李薇,许轶,许野,等.基于FCI-公平性的电力系统负荷侧碳排放责任分摊研究[J].华南师范大学学报(自然科学版),2023, 55(2):10-17.
LI Wei, XU Yi, XU Ye, et al. Research on load-side carbon emission obligation allocation of power system based on FCI-fairness method[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2023, 55(2): 10-17.
- [26] 潘金涛,王道平,田雨.政府补贴下考虑公平关切的双渠道绿色供应链定价决策研究[J].系统科学与数学,2023,43(12): 3243-3262.
PAN Jintao, WANG Daoping, TIAN Yu. Research on dual-channel green supply chain decision-making considering fairness concerns under government subsidies[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2023, 43(12): 3243-3262.

梁博森(1989—),女,博士,副教授,主要研究方向:综合能源系统、电力市场与电力经济。E-mail: bomiao.liang@zust.edu.cn

杨甲甲(1989—),男,通信作者,博士,高级讲师,博士生导师,东北电力大学电气工程学院2007级校友,主要研究方向:分布式能源接入、智能电网与电力市场等。E-mail: jiajia.yang@jcu.edu.au

文福拴(1965—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统故障诊断与系统恢复、电力市场与电力经济、智能电网与电动汽车等。E-mail: fushuan.wen@gmail.com

(编辑 冯慧敏)

Virtual Power Plant Collaborative Planning Aggregating Multivariate and Flexible DER Balancing Fairness and Efficiency

LIANG Bomiao¹, YANG Jiajia², WEN Fushuan³, WANG Licheng⁴, DONG Zhao Yang⁵, HOU Beiping¹

(1. College of Automation and Electrical Engineering, Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, China; 2. College of Science and Engineering, James Cook University, QLD 4811, Australia; 3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310007, China; 4. College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 5. Department of Electrical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong SAR, China)

Abstract: Under the dual carbon goal, the function of virtual power plants (VPPs) in aggregating massive and diverse distributed flexible resources is becoming increasingly prominent. Clarification of business model, key issues, and target demands of VPP will exploit the potential of flexible DERs and virtual power plants, and facilitate the low-carbon and zero carbon construction of new power systems. At the same time, social concerns about fairness are also increasing. Energy equity is closely related to basic production and life, and the operation of flexible resources may involve different participants, leading to a much stronger demand for fairness in VPP planning and scheduling compared to traditional scenarios. Therefore, this paper intends to introduce fairness measurement standards in VPP planning, propose aggregation, invocation, and benefit distribution schemes that balance fairness and efficiency. A medium and long-term scheduling and revenue model is first established comprehensively considering the VPP market interaction and DER contract scheduling. Then the collaborative optimization of VPP portfolio optimization under uncertain risks and DER decisions with fairness concerns are carried out. Afterwards, the problem is solved with a two-stage optimization model based on the idea of “contract first, dispatch later”, and the optimization of DER renewal rate and the impacts of regional capacity constraints are also explored. Finally, based on specific examples and data analysis, it can be concluded that fairness concerns have limited compression on VPP’s revenue space. However, it is still necessary to establish reasonable market-based pricing for flexible resources such as energy storage and interruptible loads to avoid vicious competition and investment waste.

This work is jointly supported by Fundamental Research Funds for Zhejiang University of Science and Technology (No. 2023QN043) and National Natural Science Foundation of China under Grant (No. 52007170).

Key words: virtual power plant; flexible DER; demand response; fairness concern; bi-level optimization

