

建筑虚拟电厂参与需求响应市场的报量报价机制设计

漆淘懿¹, 惠红勋¹, 叶承晋², 丁一², 赵宇明³, 宋永华¹

(1. 智慧城市物联网国家重点实验室(澳门大学), 澳门 999078; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027;
3. 深圳供电局有限公司, 广东省深圳市 518001)

摘要: 高负荷密度的受端城市电网正面临日益严重的调节资源匮乏问题,城市建筑拥有大量中央空调、电动汽车等优质灵活资源,可通过聚合构建虚拟电厂参与城市电网的供需互动。随着需求响应市场的快速发展,灵活资源的市场化定价和交易成为趋势。为此,考虑到建筑和虚拟电厂两者的获益需求,设计了建筑虚拟电厂参与需求响应市场交易的报量报价机制。首先,根据建筑负荷的响应特性,将其分为无损可转移负荷、有损可转移负荷和有损可削减负荷,并分别提出其容量-成本的计算方法。然后,设计了同时保证建筑和虚拟电厂可靠收益的分配方法,以持续激励两者参与市场的积极性。在此基础上,建立了虚拟电厂参与市场交易的报价优化模型,实现不同场景下虚拟电厂的收益最大化。最后,通过算例仿真证明了所提机制在市场交易和收益分配方面的有效性。

关键词: 虚拟电厂; 需求响应; 电力市场; 城市建筑; 灵活负荷; 报量报价机制

0 引言

在“碳达峰·碳中和”目标的推动下,中国新能源装机容量不断攀升,预计在2024年将超过煤电装机容量^[1]。高比例新能源固有的出力波动性、间歇性和随机性,将给电力系统的实时供需平衡带来严峻挑战^[2]。同时,供应侧传统发电机组占比的持续降低,进一步压缩了电力系统灵活调节资源的空间^[3]。因此,大力挖掘需求侧灵活资源的调节潜力,参与电力系统的动态调节和供需平衡刻不容缓^[4]。

面对异构、分散、多样的分布式负荷资源,虚拟电厂(virtual power plant, VPP)提供了一种高效的运营范式^[5]。文献[6]构建了含基站储能的虚拟电厂,实现了闲置资源的充分利用。文献[7]通过组合多种虚拟储能和固定储能形成广义储能,参与虚拟电厂内电-气-热的三阶段优化调度,在降低运营成本的同时提升了供能可靠性。尽管虚拟电厂从一定程度上打破了负荷资源聚合、管理和调控的空间限制^[8],但是局部区域的断面、线路与变压器的过载等风险,仍然需要利用就近的调节资源应对^[9]。

在负荷高度集中的城市中,灵活调节资源的匮乏问题尤为突出。因此,构建满足城市电网调控需求的虚拟电厂势在必行^[10]。大量建筑是城市中重要的能源消费者,其内部拥有中央空调、电动汽车充电桩、储能设备等优质灵活资源,是构建虚拟电厂的理想对象^[11]。文献[12]基于商业建筑的中央空调,研究了建筑虚拟电厂的构建方法和运行策略。文献[13]使用决策树算法,对上海商业建筑虚拟电厂的执行力进行分析,从而提高了虚拟电厂调控能力的预测精准度。建筑虚拟电厂作为多元灵活负荷的天然聚合体,能够实现负荷间以及建筑间的优势互补,为城市电网储备稳定可靠的调控容量。然而,目前未能充分释放建筑集群在城市电网中的调控潜力。

为充分反映不同场景下调控资源的稀缺性,近年来,中国需求侧灵活资源的调用正在从固定补贴模式向市场化定价模式转型^[14]。文献[15]针对初期现货市场下大量中小用户无法主动报价的问题,设计了考虑灵活负荷间接参与的市场出清模型和结算方法。随着电力市场体制改革的不断深化,中国广东、浙江等地区已经形成相对完善的现货市场和需求响应市场体系^[16]。不仅需求响应的品种更加多元化,市场的准入门槛也逐渐降低,使得大量中小用户能够以报量报价的形式参与市场化交易。文献[17]提出了计及虚拟电厂灵活特性的现货市场出清模型和灵活性评价方法。文献[18]通过聚合海量分散的多元灵活资源,建立了风险量化的点对点(peer-

收稿日期: 2024-03-13; 修回日期: 2024-05-29。

上网日期: 2024-07-24。

中国南方电网有限责任公司重点科技项目(090000KK52210176);广东省基础与应用基础研究基金面上资助项目(2024A1515010141);澳门科学技术发展基金资助项目(001/2024/SKL)。

to-peer, P2P)交易模型,实现不同资源之间的能量交易。然而,现有研究较少考虑建筑内部灵活资源多样化的运行特性与差异化的调控成本。

为便于建筑虚拟电厂参与需求响应交易,本文首先根据建筑虚拟电厂的调控特性明确了其适合参与的需求响应类型;然后,将建筑灵活负荷分为无损可转移、有损可转移和有损可削减3类负荷,通过针对性的成本分析提出了建筑负荷的调控容量-价格生成方法。在此基础上,设计了建筑虚拟电厂报量报价机制及收益分配方法,不仅满足了虚拟电厂在不同场景下的报价决策需求,还保证了建筑用户和虚拟电厂的可靠收益,能够持续激发两者参与需求响应的意愿。最后,通过算例分析证明了所提报量报价机制在市场交易和收益分配方面的有效性。

1 建筑虚拟电厂架构

需求响应市场通常会组织多种类型的交易以满足电力系统调频、调峰等不同的调节需求。例如,中国广东省需求响应市场规定了3种典型的需求响应

交易方式,分别是日前邀约需求响应交易、可中断负荷交易和直控型可调节负荷竞争性配置交易,三者的响应性能要求和可靠性逐一增加^[19]。

考虑到临时切负荷会影响用户用能体验,建筑虚拟电厂不适合参与直控型负荷交易。同时,建筑内也缺少适合直控改造的负荷。而日前邀约需求响应的随机性太强,导致负荷参与容量的不确定性太大,难以充分发挥建筑的调节潜力。可中断负荷交易需要将第 W 运行周某时段(通常为 2 h)的需求响应容量提前在第 $W-1$ 周一次性完成交易,不仅为建筑用户预留了较长的负荷调整时间,还可以避免建筑用户频繁地改变用电计划。

当电网调度中心预测第 W 运行周存在电力供应紧张、断面或设备重过载风险时,则向建筑虚拟电厂在内的各市场主体发布可中断负荷交易需求^[19]。本文将可中断负荷交易的持续时间设置为 2 h,并要求各市场主体完整参与,分别提出了建筑虚拟电厂架构和报量报价机制,如图 1 所示。图中: N 为建筑数量。

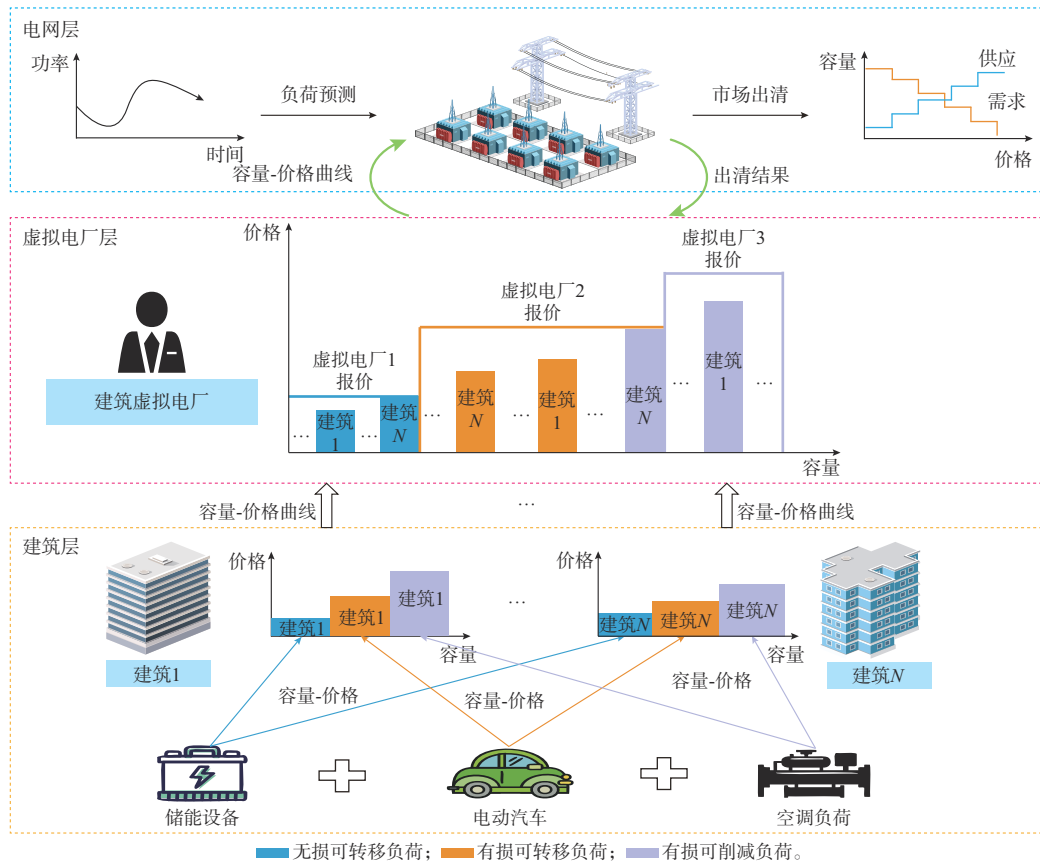


图1 建筑虚拟电厂架构与报量报价机制

Fig. 1 Framework of building virtual power plant and bidding mechanism

首先,在建筑层,根据灵活负荷的运行和调节特性可分为3类:无损可转移负荷、有损可转移负荷和

有损可削减负荷。针对这3类灵活负荷,确定它们在可中断负荷时段内的调节成本和调节容量,按照

单位容量的调节成本从低到高依次排列后,生成分段的容量-价格曲线并上报至虚拟电厂。

然后,在虚拟电厂层,收集到 N 栋建筑的容量-价格曲线后,虚拟电厂把所有建筑的分段容量-价格曲线拆分,并重新根据单位容量的调节成本从低到高依次排序。虚拟电厂会根据建筑的容量-价格信息,以最大化自身收益为目标,决策形成最优的报量报价策略参与可中断负荷市场交易。

最后,在电网层,根据负荷预测得到的调节容量需求对可中断负荷进行出清。可中断负荷交易要求中标负荷在第 W 运行周提供中标时段的可中断负荷容量。电网将出清结果反馈给建筑虚拟电厂后,建筑用户将根据其中标容量和时段调整第 W 运行周的用电计划。在实际运行时,调度中心将根据实际运行情况,决定是否调用中标的建筑虚拟电厂。

2 建筑负荷调控成本分析与容量-价格曲线生成方法

2.1 灵活负荷分类与调节成本分析

建筑内灵活负荷的运行特性决定了其参与需求响应的调控方法和调控成本。为精细化反映不同种类负荷的调控成本并申报合理的价格,将其分为无损可转移负荷、有损可转移负荷和有损可削减负荷,分别通过下标 $n = 1, 2, 3$ 区分,它们参与可中断负荷交易的调控方式详见附录 A。

1) 无损可转移负荷:将某时段固有的负荷用能需求完整转移到其他时段,而不会导致用户用能体验的下降,如储能设备^[20]。因此,无损可转移负荷的调控成本主要来自用能成本的变化,如式(1)所示。

$$c_{i,1} = \max \{ (p_i^e - p_{i,1}^{e,0}) Q_{i,1}, 0 \} \quad (1)$$

式中: $c_{i,1}$ 为第 i 栋建筑无损可转移负荷的调控成本; $Q_{i,1}$ 为第 i 栋建筑无损可转移负荷转移的负荷容量; p_i^e 为第 i 栋建筑可中断负荷交易时段的电价; $p_{i,1}^{e,0}$ 为第 i 栋建筑无损可转移负荷初始用能时段的电价。

一般地,建筑负荷用能已经根据现货市场电价进行了优化,无损可转移负荷总是被安排到低电价时段以降低建筑用户用能成本。可中断负荷交易时段往往是电力供应紧张的高电价时段,正常情况下该时段没有无损可转移负荷。无损可转移负荷一旦中标,需要从低电价时段转移到高电价的,可中断负荷交易时段,从而具备负荷转移的能力。因此,可以认为 $p_i^e \geq p_{i,1}^{e,0}$,由此产生了调控成本。

2) 有损可转移负荷:将某时段固有的负荷用能需求转移到其他时段,但是会导致用户用能体验的

下降,如电动汽车^[21]。因此,有损可转移负荷的调控成本不仅包含了用能成本的变化,还包括用能体验损失的额外成本,如式(2)所示。

$$c_{i,2} = (p_{i,2}^{e,0} - p_i^e) Q_{i,2} + \lambda_{i,2} Q_{i,2} \quad (2)$$

式中: $c_{i,2}$ 为第 i 栋建筑有损可转移负荷的调节成本; $Q_{i,2}$ 为第 i 栋建筑有损可转移负荷转移的负荷容量; $p_{i,2}^{e,0}$ 为第 i 栋建筑有损可转移负荷转移后用能时段的电价; $\lambda_{i,2}$ 为第 i 栋建筑单位容量转移导致用能体验损失的成本系数。一般地,有 $c_{i,2} \geq 0$,因为用户临时的用能体验损失往往高于电价偏差。

3) 有损可削减负荷:将某时段固有的负荷用能需求完全或部分削减,削减的电量在其他时段无须或不能再重新消耗,如空调负荷^[22]。由于用电量被削减,有损可削减负荷通常会导致更严重的用能体验损失,其调控成本可以表示为用户的用能体验损失减去电量削减所节约的费用,如式(3)所示。

$$c_{i,3} = -p_i^e Q_{i,3} + \lambda_{i,3} Q_{i,3} \quad (3)$$

式中: $c_{i,3}$ 为第 i 栋建筑有损可削减负荷的调节成本; $Q_{i,3}$ 为第 i 栋建筑有损可削减负荷削减的负荷容量; $\lambda_{i,3}$ 为第 i 栋建筑单位电量削减导致用能体验损失的成本系数。一般地,有 $c_{i,3} \geq 0$,因为削减用电量导致的用户体验损失往往大于节省电量的收益。

2.2 灵活负荷容量-价格曲线生成方法

基于对不同灵活负荷调控成本的评估,建筑用户需要生成容量-价格曲线并提交给虚拟电厂进行聚合。考虑到操作可行性,每栋建筑的容量-价格曲线要求不超过3段。由于3类负荷调控成本的差异,建筑用户可以依据3类负荷对应提供3段容量-价格曲线。如果某类负荷中包含多种负荷,可以用其中调节成本最高的负荷作为该类型负荷的报价^[23]。第 i 栋建筑的申报容量和申报价格分别为 $Q_{i,n}$ 和 $p_{i,n}$,通过下标 $n = 1, 2, 3$ 区分3种负荷。

中国广东省可中断负荷交易的实施流程规定,补贴分为调用费用和备用费用^[19]。在第 W 运行周的中标时段,如果可中断负荷被调用,则以中标价格乘以响应容量结算调用费用;反之则以备用价格比例系数乘以中标价格,再乘以备用容量结算备用费用。因此,为了保证自身收益的非负性,建筑用户在报量报价时需要同时考虑中标后被调用和未被调用2种情况。

1) 无损可转移负荷:中标后无损可转移负荷需要改变用能计划,从原来的低电价时段转移到高电价的中标时段。无论负荷在中标时段是否被调用,额外的备用成本已经产生。因此,其申报的价格和容量分别需要满足式(4)和式(5)。

$$p_{i,1} \geq \max \left\{ \frac{p_i^e - p_{i,1}^{e,0}}{\gamma_{\text{dis}}}, 0 \right\} \quad (4)$$

$$0 \leq Q_{i,1} \leq Q_{i,1}^{\max} \quad (5)$$

式中： γ_{dis} 为备用价格比例系数； $Q_{i,1}^{\max}$ 为第*i*栋建筑无损可转移负荷的最大调节容量。式(4)能够在中标未调用时保证建筑用户申报价格和调控收益的非负性。

2)有损可转移负荷：中标后有损可转移负荷没有额外的备用成本，只有被调用时才产生调控成本。因此，其提交的价格和容量分别需要满足式(6)和式(7)。

$$p_{i,2} \geq \frac{c_{i,2}}{Q_{i,2}} \quad (6)$$

$$0 \leq Q_{i,2} \leq Q_{i,2}^{\max} \quad (7)$$

式中： $Q_{i,2}^{\max}$ 为第*i*栋建筑有损可转移负荷的最大调节容量。

3)有损可削减负荷：中标后有损可削减负荷也没有额外的备用成本，只有被调用时才产生调控成本。因此，其提交的价格和容量分别需要满足式(8)和式(9)。

$$p_{i,3} \geq \frac{c_{i,3}}{Q_{i,3}} \quad (8)$$

$$0 \leq Q_{i,3} \leq Q_{i,3}^{\max} \quad (9)$$

式中： $Q_{i,3}^{\max}$ 为第*i*栋建筑有损可削减负荷的最大调节容量。

此外，根据市场规则，所有建筑用户的报价都需要满足市场价格约束式(10)。

$$\begin{cases} p_{\min} \leq p_{i,1} \leq p_{\max} \\ p_{\min} \leq p_{i,2} \leq p_{\max} \\ p_{\min} \leq p_{i,3} \leq p_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中： p_{\min} 、 p_{\max} 分别为可中断负荷交易报价的最小值和最大值。

本文提出的容量-价格曲线生成方法严格保证了建筑用户参与可中断负荷交易所获收益的非负性，式(4)、式(6)、式(8)只限制了报价的最低值，建筑用户可以根据自身偏好决定报价。建筑用户将3类负荷的价格按照从低到高排列后(假设 $p_{i,1} < p_{i,2} < p_{i,3}$)，向虚拟电厂提交形如 $[(p_{i,1}, Q_{i,1}), (p_{i,2}, Q_{i,2}), (p_{i,3}, Q_{i,3})]$ 的容量-价格信息。

需要注意的是，此容量-价格曲线生成方法同样适用于多时段的可中断负荷交易市场。如果市场主体允许按时段提供多组报量报价，则可以针对不同时段分别进行报量报价；如果市场主体仅允许提供一组报量报价，则申报容量取各时段的最小值，申报

价格取各时段的最大值。

3 虚拟电厂收益分配方法与报量报价机制

3.1 可中断负荷交易收益计算与分配方法设计

在收到所有建筑用户的容量-价格曲线后，虚拟电厂首先将所有建筑用户的分段容量-价格曲线进行分解，按照单位容量调控成本从低到高重新排序。同样地，为了具备可操作性，避免过多的分段，虚拟电厂上报的容量-价格曲线也被要求分为3段。未来市场更加成熟后，虚拟电厂可以在满足市场规则的前提下，根据实际需求调整容量-价格曲线的分段数量。虚拟电厂在可中断负荷市场中的报量报价同时影响建筑用户和虚拟电厂的收益。为实现可中断负荷交易对市场主体的持续激励，需要设计合理的收益分配方法，既要保证虚拟电厂和建筑用户能够获得稳定的收益，又要驱动虚拟电厂优化自身的报量报价决策。

基于上述考虑，设计了如下的收益分配方法：假设可中断负荷市场的出清价格为 p_{clr} ，第*m*($m=1, 2, 3$)段虚拟电厂的报价为 p_m^{vpp} ，对于虚拟电厂，其收益来源于报价和出清价格之差，如图2所示。因此，除了决定最终出清价格的边际虚拟电厂容量-价格组合，每段中标的容量-价格组合总是能获得收益。此外，虚拟电厂收益还需要考虑是否被调用。因此，总收益由调控收益和备用收益两部分组成。

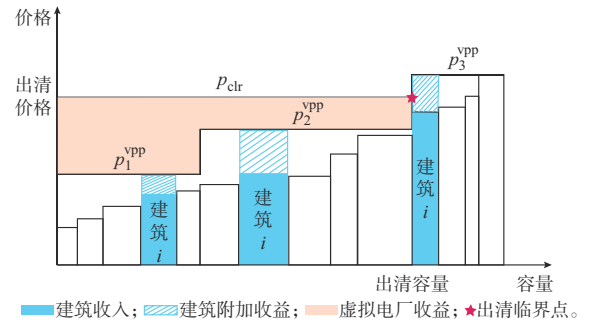


图2 虚拟电厂需求响应收益分配结果
Fig. 2 Demand response revenues allocation results of virtual power plant

$$S_{\text{IL}}^{\text{vpp}} = \sum_{m=1}^3 s_m^{\text{IL}} s_m^{\text{clr}} (p_{\text{clr}} - p_m^{\text{vpp}}) Q_m^{\text{vpp}} \quad (11)$$

$$S_{\text{R}}^{\text{vpp}} = \gamma_{\text{dis}} \sum_{m=1}^3 (1 - s_m^{\text{IL}}) s_m^{\text{clr}} (p_{\text{clr}} - p_m^{\text{vpp}}) Q_m^{\text{vpp}} \quad (12)$$

$$s_m^{\text{clr}} = \begin{cases} 1 & p_{\text{clr}} \geq p_m^{\text{vpp}} \\ 0 & p_{\text{clr}} < p_m^{\text{vpp}} \end{cases} \quad (13)$$

$$s_m^{\text{IL}} \leq s_m^{\text{clr}} \quad (14)$$

式中： $S_{\text{IL}}^{\text{vpp}}$ 、 $S_{\text{R}}^{\text{vpp}}$ 分别为虚拟电厂的调控收益和备用收益； s_m^{IL} 为表示虚拟电厂第*m*段是否被调用的0-1变

量; s_m^{clr} 为表示虚拟电厂第 m 段是否被出清中标的 0-1 变量; Q_m^{vpp} 为虚拟电厂第 m 段的申报容量。

需要注意的是, 本文重点关注建筑虚拟电厂的报量报价机制, 分别使用建筑用户和虚拟电厂的申报容量替代实际响应容量, 忽略响应偏差以便于分析虚拟电厂与建筑用户之间的收益分配情况。在响应收益计算时, 实际响应容量应该为基线负荷与实际测量负荷之差, 建筑用户与虚拟电厂的基线负荷计算方法详见附录 B。

式(11)和式(12)表示调控收益和备用收益是互斥的, 即负荷被调控且获得调控收益时, 不能同时获得备用收益, 即 $1 - s_m^{\text{ll}} = 0$ 一定成立, 反之亦然。尽管式(12)中每段容量-价格组合均乘以备用价格比例系数, 但是该系数只对未被调用的分段起作用。

建筑用户的收益包括建筑收入和建筑附加收益。建筑收入等于响应容量和申报价格的乘积, 建筑附加收益则来源于其申报价格和虚拟电厂报价之差。

第 i 栋建筑的调控收益 $S_{\text{IL},i}^{\text{bul}}$ 可以表示为:

$$S_{\text{IL},i}^{\text{bul}} = S_{\text{IL},i}^{\text{bul,inc}} + S_{\text{IL},i}^{\text{bul,sur}} \quad (15)$$

$$S_{\text{IL},i}^{\text{bul,inc}} = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 s_m^{\text{ll}} s_{i,m,n}^{\text{clr}} p_{i,n} Q_{i,n} \quad (16)$$

$$S_{\text{IL},i}^{\text{bul,sur}} = \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 s_m^{\text{ll}} s_{i,m,n}^{\text{clr}} (p_m^{\text{vpp}} - p_{i,n}) Q_{i,n} \quad (17)$$

$$s_{i,m,n} = \begin{cases} 1 & p_{m-1}^{\text{vpp}} < p_{i,n} \leq p_m^{\text{vpp}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

$$p_0^{\text{vpp}} = p_{\min} \quad (19)$$

式中: $S_{\text{IL},i}^{\text{bul,inc}}$ 、 $S_{\text{IL},i}^{\text{bul,sur}}$ 分别为第 i 栋建筑被调控时的建筑收入和建筑附加收益; $s_{i,m,n}$ 为表示第 i 栋建筑的第 n 段容量-价格组合是否属于虚拟电厂第 m 段容量-价格组合的 0-1 变量; p_0^{vpp} 为虚拟电厂第 1 段容量-价格组合的申报价格最小值。

第 i 栋建筑的备用收益 $S_{\text{R},i}^{\text{bul}}$ 可以表示为:

$$S_{\text{R},i}^{\text{bul}} = S_{\text{R},i}^{\text{bul,inc}} + S_{\text{R},i}^{\text{bul,sur}} \quad (20)$$

$$S_{\text{R},i}^{\text{bul,inc}} = \gamma_{\text{dis}} \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 s_m^{\text{ll}} s_{i,m,n}^{\text{clr}} p_{i,n} Q_{i,n} \quad (21)$$

$$S_{\text{R},i}^{\text{bul,sur}} = \gamma_{\text{dis}} \sum_{m=1}^3 \sum_{n=1}^3 s_m^{\text{ll}} s_{i,m,n}^{\text{clr}} (p_m^{\text{vpp}} - p_{i,n}) Q_{i,n} \quad (22)$$

式中: $S_{\text{R},i}^{\text{bul,inc}}$ 、 $S_{\text{R},i}^{\text{bul,sur}}$ 分别为第 i 栋建筑未被调控时的建筑收入和建筑附加收益。

3.2 虚拟电厂最优报量报价策略

虚拟电厂和建筑间的收益分配方法已经保证了双方稳定的收益。在此基础上, 虚拟电厂可以进一步优化决策报量报价信息, 以最大化自身的收益。在市场出清时, 可中断负荷的需求总量是固定的。因此, 虚拟电厂的报价越低则中标概率越高, 但是收

益也会随之减少。由于其他虚拟电厂的容量-价格曲线和市场的出清价格都是难以确定的, 虚拟电厂需要考虑不同出清价格的场景, 优化 3 段报量报价策略以最大化不同场景下的期望收益^[24]。

由于虚拟电厂只是建筑用户参与需求响应交易的代理, 能够将市场对响应容量偏差的考核传导至建筑用户。因此, 在报量报价的优化过程中, 虚拟电厂认为建筑用户的申报容量等于实际响应容量。

虚拟电厂的优化目标为:

$$\max \left\{ \sum_{\omega} \pi_{\omega} (p_{\text{clr},\omega}) \sum_{m=1}^3 [Q_{\text{clr},m,\omega}^{\text{vpp}} (p_{\text{clr},\omega} - p_{m,\omega}^{\text{vpp}})] \right\} \quad (23)$$

$$\sum_{\omega} \pi_{\omega} (p_{\text{clr},\omega}) = 1 \quad (24)$$

式中: $\pi_{\omega} (p_{\text{clr},\omega})$ 为出清价格等于 $p_{\text{clr},\omega}$ 时场景 ω 的概率; $p_{m,\omega}^{\text{vpp}}$ 和 $Q_{\text{clr},m,\omega}^{\text{vpp}}$ 分别为场景 ω 下虚拟电厂第 m 段容量-电价组合的申报价格和中标容量。式(24)表示所有场景的概率之和等于 1。

虚拟电厂报量报价的约束包括:

$$p_{m,\omega}^{\text{vpp}} \leq p_{m+1,\omega}^{\text{vpp}} \quad \forall \omega, m = 1, 2 \quad (25)$$

$$Q_{m,\omega}^{\text{vpp}} = \sum_{i=1}^N s_{i,m,n,\omega}^{\text{bid}} Q_{i,n} \quad \forall \omega, \forall m, \forall n \quad (26)$$

$$\sum_{m=1}^3 s_{i,m,n,\omega}^{\text{bid}} = 1 \quad \forall i, \forall \omega, \forall n \quad (27)$$

式中: $Q_{m,\omega}^{\text{vpp}}$ 为在场景 ω 下虚拟电厂第 m 段的申报容量; $s_{i,m,n,\omega}^{\text{bid}}$ 为表示在场景 ω 下第 i 栋建筑的第 n 段容量-价格组合是否属于虚拟电厂第 m 段容量-价格组合的 0-1 变量。

式(25)要求虚拟电厂第 m 段的报价不能超过第 $m+1$ 段报价; 式(26)要求属于第 m 段容量-价格组合的建筑负荷容量之和等于虚拟电厂第 m 段的申报容量; 式(27)要求负荷容量 $Q_{i,n}$ 属于且只能属于虚拟电厂的某一段容量-价格组合。 $s_{i,m,n}^{\text{bid},\omega}$ 的取值可以表示为:

$$s_{i,m,n,\omega}^{\text{bid}} = \begin{cases} 1 & p_{m-1,\omega}^{\text{vpp}} < p_{i,n} \leq p_{m,\omega}^{\text{vpp}} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

$$p_{0,\omega}^{\text{vpp}} = p_{\min} \quad (29)$$

式中: $p_{0,\omega}^{\text{vpp}}$ 为在场景 ω 下虚拟电厂第 1 段容量-价格组合的申报价格最小值。

式(29)要求当 $m=1$ 时 $p_{0,\omega}^{\text{vpp}}$ 应等于市场报价允许的最低价格 p_{\min} 。可中断负荷交易市场出清的约束包括:

$$s_{m,\omega}^{\text{clr}} Q_{m,\omega}^{\text{vpp}} = Q_{\text{clr},m,\omega}^{\text{vpp}} \quad \forall \omega, \forall m \quad (30)$$

$$s_{m,\omega}^{\text{clr}} \geq s_{m+1,\omega}^{\text{clr}} \quad \forall \omega, m = 1, 2 \quad (31)$$

式中: $s_{m,\omega}^{\text{clr}}$ 为表示在场景 ω 下虚拟电厂第 m 段容量-价格组合是否中标的 0-1 变量。式(31)要求第 $m+1$ 段

容量-价格组合中标的前提是第 m 段容量-价格组合也中标。

$$s_{m,\omega}^{\text{clr}} p_{m,\omega}^{\text{vpp}} \leq p_{\text{clr},\omega} \quad (32)$$

式(32)要求虚拟电厂第 m 段容量-价格组合中标的条件是报价低于出清价格。

场景 $\pi_{\omega}(p_{\text{clr},\omega})$ 的概率可以表示为:

$$\pi_{\omega}(p_{\text{clr},\omega}) = \frac{\Pr(p_{\text{clr},\omega})}{\sum_{\omega} \Pr(p_{\text{clr},\omega})} \quad (33)$$

式中: $\Pr(p_{\text{clr},\omega})$ 为在场景 ω 下出清价格为 $p_{\text{clr},\omega}$ 的概率,虚拟电厂可以通过历史出清价格的数据来估计不同出清价格的概率。

对于每一种场景,都会有一组最优的报量报价。如果虚拟电厂能够预测市场的出清价格,则可以使用该价格对应场景下的最优容量-价格曲线参与市场竞标。反之,虚拟电厂可以通过概率加权平均所有场景下的最优报价得到最终报价,使得自身的期望收益最大^[25]:

$$p_m^{\text{vpp},*} = \sum_{\omega} \pi_{\omega}(p_{\text{clr},\omega}) p_{m,\omega}^{\text{vpp},*} \quad (34)$$

式中: $p_m^{\text{vpp},*}$ 、 $p_{m,\omega}^{\text{vpp},*}$ 分别为虚拟电厂第 m 段的最优申报价格以及在场景 ω 下的最优申报价格。

需要注意的是,负荷响应量并不是通过加权平均得到的,而是在3段报价确定后,根据建筑负荷上报的容量-价格计算得到:

$$Q_m^{\text{vpp},*} = \sum Q_{i,n} \quad p_{m-1}^{\text{vpp},*} < p_{i,n} < p_m^{\text{vpp},*}, \forall m \quad (35)$$

$$p_0^{\text{vpp},*} = p_{\min} \quad (36)$$

式中: $Q_m^{\text{vpp},*}$ 为虚拟电厂第 m 段的最优响应容量; $p_0^{\text{vpp},*}$ 为虚拟电厂第1段报价区间的最小值。式(36)要求当 $m=1$ 时 $p_0^{\text{vpp},*}$ 等于市场报价允许的最低价格 p_{\min} 。

在实际响应过程中,由于负荷的不确定性,虚拟电厂需要对建筑的响应偏差进行管理,详见附录C。最后,上述优化问题可以转换为混合整数二次规划问题,并使用Gurobi等商用求解器进行求解。

4 算例分析

4.1 参数设置

为验证所提报量报价机制参与可中断负荷交易的有效性,本节通过算例仿真的形式分析了建筑虚拟电厂的出清情况和响应收益。可中断负荷交易的容量准入门槛设置为0.3 MW,申报价格下限和上限分别设置为70元/(MW·h)和5 000元/(MW·h),市场按照边际容量-价格组合全量中标的方式进行出清^[19]。对于中标负荷,调用时按照出清价格结算调用费用,作为备用时则将出清价格乘以备用价格比例系数得到备用价格并结算备用费用,备用价格比例系数设置为 $\gamma_{\text{dis}} = 0.09$ ^[19]。算例设置的建筑虚拟电厂共包含7栋建筑,建筑负荷申报的价格和容量如表1所示。无损可转移负荷还包括中标时段和初始用能时段的电价差,用于计算备用运行时的调控成本。

表1 建筑负荷报量报价信息
Table 1 Bidding information of building loads

建筑编号	无损可转移负荷			有损可转移负荷		有损可削减负荷	
	容量/kW	价格/(元·(kW·h) ⁻¹)	电价差/(元·(kW·h) ⁻¹)	容量/kW	价格/(元·(kW·h) ⁻¹)	容量/kW	价格/(元·(kW·h) ⁻¹)
1	100	1.98	0.17	80	0.80	50	3.50
2	50	2.52	0.20	110	3.40	65	4.80
3	230	1.62	0.14	300	2.78	170	3.70
4	160	1.80	0.16	130	3.10	100	4.00
5	120	1.35	0.11	90	2.30		
6	250	1.44	0.12			135	3.85
7				150	2.90	200	4.40

本文假设可中断负荷交易出清价格的概率服从正态分布 $N(4.0, 0.5625)$ 元/(kW·h),对价格区间 $[2.0, 4.9]$ 元/(kW·h),以0.1元/(kW·h)为步长生成30种场景,每种场景的概率为归一化后的出清价格概率。需要注意的是,出清价格的概率分布并不影响所提报量报价机制的应用,实际上虚拟电厂可以根据历史不同出清价格出现的频率来拟合各场景的概率。

4.2 算例结果

4.2.1 建筑虚拟电厂报量报价结果

由于出清价格的不确定,虚拟电厂的最优报价是一个随机优化问题,对于具有不同出清价格的场景,虚拟电厂的最优报量报价结果如图3所示。为了让所有建筑都参与可中断负荷市场交易,虚拟电厂的报量报价策略包含了所有负荷,所以其3段申报容量之和始终等于2.49 MW。随着出清价格的

升高,第1段和第2段申报的容量都不断提高,第3段申报的容量也随之不断减少。

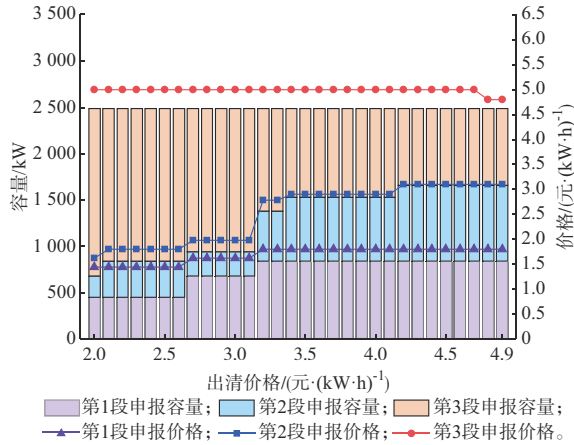


图3 不同出清价格下建筑虚拟电厂的最优报量报价结果
Fig. 3 Optimal bidding results of building virtual power plant under different clearing prices

对于某一确定的出清价格,虚拟电厂总是让前2段容量-价格组合能够中标以获取最大的收益。由于第3段申报价格不能低于建筑负荷的最高报价4.8元/(kW·h),在出清价格低于4.8元/(kW·h)时,第3段容量-价格组合总是不能中标,绝大部分情况下虚拟电厂总是将第3段的申报价格设置为最大值5.0元/(kW·h)。然而,当市场出清价格继续升高到4.8元/(kW·h)时,第3段容量-价格组合也能够出清,虚拟电厂就会将报价调整到4.8元/(kW·h),以获取更多的收益。

此外,当出清价格变化时,虚拟电厂的报量报价策略不一定会对应地做出改变。例如,虚拟电厂的报量报价策略在部分价格区间内是稳定的,如[2.1,2.6]元/(kW·h)和[2.7,3.1]元/(kW·h)。30种场景下,虚拟电厂的报量报价策略共有7种组合,证明以0.1元/(kW·h)为步长构建的场景能足够反映报量报价策略的变化情况。

4.2.2 建筑虚拟电厂的收益分配结果

进一步分析不同出清价格下,建筑虚拟电厂调用和备用场景的收益分配结果如图4所示。图4(a)表示建筑虚拟电厂中标容量-价格组合被调用的场景。虚拟电厂的收益随着出清价格的升高稳步上升,而建筑附加收益和建筑收入呈现出明显的阶梯形。从式(11)和式(17)可知,虚拟电厂的收益和出清价格正相关,即使出清容量没有增加,虚拟电厂的收益也会随着出清价格的升高而增加;而建筑收入和建筑附加收益都必须在虚拟电厂的竞标策略改变后才会变化,它们的变化趋势和虚拟电厂报量报价

策略的调整是同步的。此外,尽管建筑总收益会随着出清价格的升高而增加,但是对于某一具体的建筑负荷来说,其建筑附加收益不一定会始终增加。

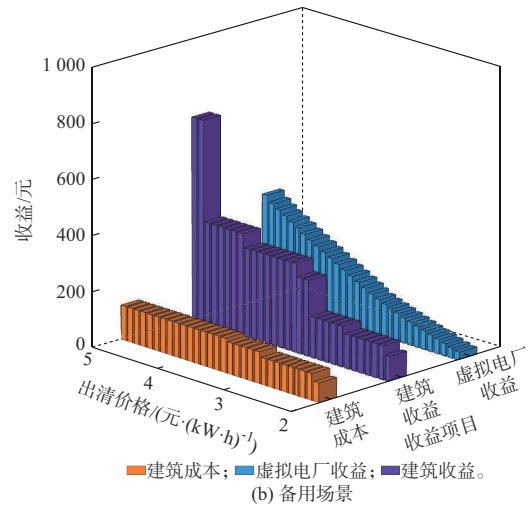
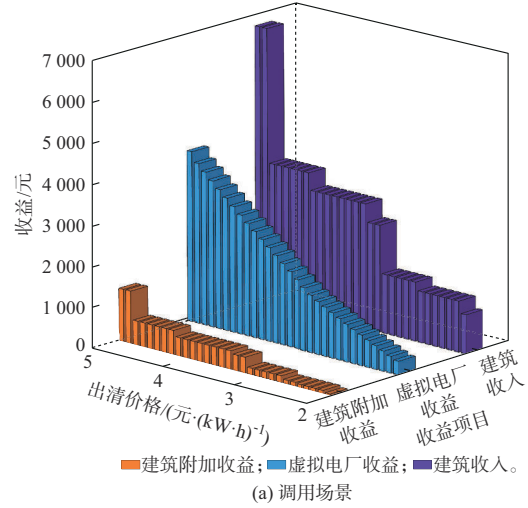


图4 不同出清价格下建筑虚拟电厂的收益分配结果
Fig. 4 Revenues allocation results of building virtual power plant under different clearing prices

图4(b)表示中标容量-价格组合未被调用的备用场景。相较于已有研究,本文重点关注建筑虚拟电厂作为备用运行时的成本,所提报量报价机制旨在保证建筑用户参与可中断负荷交易时的收益非负性。因此,增加了对建筑备用成本的刻画,并用建筑收益来表示建筑收入与建筑附加收益之和。即使在出清价格较低的区间,建筑收益也严格大于建筑成本。随着出清价格的升高,报价相对较高的有损可转移负荷和有损可削减负荷也逐渐中标。由于其作为备用运行时没有额外的成本,建筑成本没有显著增长,但是它们的收益使得建筑和虚拟电厂收益不断增加。

4.2.3 建筑用户报量报价方法对比

为说明所提方法对建筑负荷的精细化分类在报量报价方面的优势,将其与平均报价、最高报价2种方法进行了对比分析。平均报价采用不同负荷调控成本关于响应容量的加权平均作为申报价格,最高报价采用最高的负荷调控成本作为申报价格,2种方法的报量报价信息如表2所示。

表2 不同报量报价方法的申报信息
Table 2 Declaration information of different bidding methods

建筑编号	容量/kW	平均报价/ (元·(kW·h) ⁻¹)	最高报价/ (元·(kW·h) ⁻¹)
1	230	1.90	3.50
2	225	3.60	4.80
3	700	2.62	3.70
4	390	2.79	4.00
5	210	1.75	2.30
6	385	2.28	3.85
7	350	3.75	4.40

3种报量报价方法在不同出清价格下的收益对比如图5所示。当出清价格较低(2.0~3.5元/(kW·h))时,平均报价能够让虚拟电厂中标更多的容量,最高报价几乎没有中标容量,而本文方法的中标容量适中;当出清价格较高(3.5~4.9元/(kW·h))时,情况正好相反,平均报价在出清价格达到3.8元/(kW·h)时,响应容量就已经全部中标,此时最高报价的中标容量才开始快速增加,本文方法的中标容量仍然稳步上升。可以看出,平均报价和最高报价由于申报价格过低或者过高,中标容量分别集中在低价区间和高价区间,而本文方法准确反映了不同负荷的调控成本,在完整的价格区间内都能提供适当的响应容量。

从收益分配结果来看,建筑用户采用平均报价方法报量报价时,获取的收益即建筑附加收益较少,主要的收益分配给了虚拟电厂;建筑用户采用最高报价方法时,建筑用户获取了主要的市场收益,使得虚拟电厂的收益大幅降低;失衡的收益分配结果会挫伤其中一方参与市场的积极性,而本文方法能促使建筑用户和虚拟电厂之间的利益分配更为均衡,有利于可中断负荷市场交易的可持续进行。

得益于精细化的负荷分类,建筑用户采用本文所提报量报价方法参与可中断负荷市场交易时,在中标容量和收益分配两方面都拥有更均衡的效果,不仅能够不同出清价格下提供适当的响应容量,还可以有效避免建筑用户和虚拟电厂间分配失衡的问题。

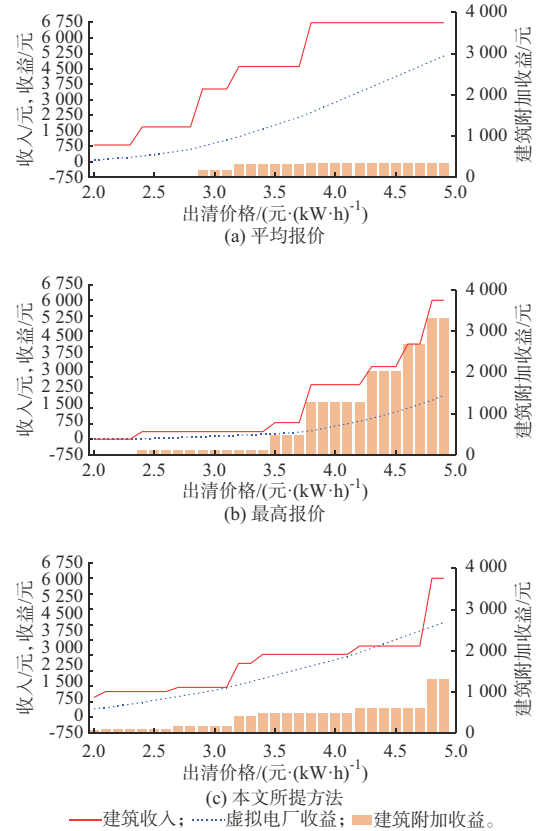


图5 不同报量报价方法的收益对比
Fig. 5 Revenues comparison with different bidding methods

4.2.4 建筑虚拟电厂最优报量报价

最后,将不同场景下虚拟电厂的报价根据场景出现的概率进行加权平均,可以得到虚拟电厂的最优报量报价结果如表3所示。

表3 虚拟电厂最优报量报价结果
Table 3 Optimal bidding results of virtual power plant

分段编号	价格/(元·(MW·h) ⁻¹)	容量/MW
第1段	1 786	0.68
第2段	2 901	0.85
第3段	4 990	0.96

当虚拟电厂按照最优容量-价格曲线进行申报时,建筑用户提交的容量-价格曲线和虚拟电厂的容量-价格曲线的关系如附录D图D1所示,虚拟电厂收益、建筑收入和建筑附加收益如表4所示。虚拟电厂的收益依然会随着出清价格的升高而增加,只是比每种场景下分别计算最优报价所获得的收益略低。不同于虚拟电厂的收益变化趋势,建筑收入和建筑附加收益并不会随着出清价格的上涨持续上升,两者只会在出清的临界点阶跃。因此,当虚拟电

厂总是提交最优报价时,建筑收入和建筑附加收益最多只有3种情况,分别对应第1段容量-价格组合出清,第1、2段容量-价格组合出清和第3段容量-价格组合全部出清情景。

表4 最优报量报价情景下的收益
Table 4 Revenues in optimal bidding scenario

出清价格/ (元·(kW·h) ⁻¹)	虚拟电厂 收益/元	建筑收 入/元	建筑附加 收益/元
2.0	145	958	255
2.1	213	958	255
2.2	281	958	255
2.3	349	958	255
2.4	417	958	255
2.5	485	958	255
2.6	553	958	255
2.7	621	958	255
2.8	689	958	255
2.9	757	958	255
3.0	909	3 046	633
3.1	1 062	3 046	633
3.2	1 215	3 046	633
3.3	1 368	3 046	633
3.4	1 521	3 046	633
3.5	1 674	3 046	633
3.6	1 827	3 046	633
3.7	1 980	3 046	633
3.8	2 133	3 046	633
3.9	2 286	3 046	633
4.0	2 439	3 046	633
4.1	2 592	3 046	633
4.2	2 745	3 046	633
4.3	2 898	3 046	633
4.4	3 051	3 046	633
4.5	3 204	3 046	633
4.6	3 357	3 046	633
4.7	3 510	3 046	633
4.8	3 663	3 046	633
4.9	3 730	3 046	633

以上算例仿真结果证明了所设计的需求响应收益分配方法能够保证建筑用户和虚拟电厂参与可中断负荷交易时收益的非负性,有利于激发建筑用户和虚拟电厂参与需求响应的积极性。同时,提出的虚拟电厂的最优报量报价策略能够实现不同出清价格时的期望收益最大。另外,虚拟电厂和建筑用户都可以优化自身的报量报价策略提高收益。对于虚拟电厂,通过不断地参与市场交易可以更好地预测出清价格,从而调整最优报价策略实现更多的盈

利。对于建筑用户,可以优化灵活负荷资源,降低调控成本以增加建筑附加收益和出清概率。

5 结语

为促进城市电网对海量建筑灵活负荷的市场化调用,本文提出建筑虚拟电厂参与可中断负荷市场交易的报量报价机制。所提报量报价机制首先考虑了不同负荷调节特性的差异,从而提出了负荷的容量-价格计算方法,基于此方法申报的容量-价格曲线能够保证建筑收益的非负性;随后提出了虚拟电厂的报量报价策略,并明确了需求响应收益分配的方法;在此基础上,将虚拟电厂的报量报价问题构建为随机优化问题,基于历史出清价格优化虚拟电厂的容量-价格曲线以获取更多收益。最后的算例分析结果表明,所提报量报价机制能够同时保证建筑用户和虚拟电厂参与可中断负荷交易的收益。

需要指出的是,本文主要针对确定的建筑响应容量,对于调控过程中固有的容量偏差考虑有所欠缺,后续工作将重点研究适应负荷响应容量不确定性的市场报量报价机制。此外,中国电力市场和需求响应市场仍在不断完善中,报量报价机制也需要紧跟市场改革的步伐做出对应的优化和调整。

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] 中国电力企业联合会. 中电联发布《2023-2024年度全国电力供需形势分析预测报告》[EB/OL]. (2024-01-30) [2024-02-28]. <https://cec.org.cn/detail/index.html? 3-330280>. China Electricity Council. China Electricity Council released "National Electricity Supply and Demand Situation Analysis Forecast Report from 2023 to 2024" [EB/OL]. (2024-01-30) [2024-02-28]. <https://cec.org.cn/detail/index.html? 3-330280>.
- [2] 卓振宇,张宁,谢小荣,等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191. ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [3] 宁剑,吴继平,江长明,等. 考虑资源运行特性的可调节负荷调峰调频优化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 11-19. NING Jian, WU Jiping, JIANG Changming, et al. Optimal control strategy of peak and frequency regulation for adjustable loads considering operation characteristics of resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 11-19.
- [4] 宁剑,江长明,张哲,等. 可调节负荷资源参与电网调控的思考与技术实践[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(17): 1-8. NING Jian, JIANG Changming, ZHANG Zhe, et al. Thinking

- and technical practice of adjustable load resources participating in dispatching and control of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(17): 1-8.
- [5] 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.
- [6] 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 Gujing, GAO Ciwei, SONG Meng, 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.
- [7] 王瑞东,吴杰康,蔡志宏,等.含广义储能虚拟电厂电-气-热三阶段协同优化调度[J].电网技术,2022,46(5):1857-1868.
WANG Ruidong, WU Jiekang, CAI Zhihong, et al. Three-stage collaborative optimal scheduling of electricity-gas-heat in virtual power plant with generalized energy storage [J]. Power System Technology, 2022, 46(5): 1857-1868.
- [8] 卫志农,余爽,孙国强,等.虚拟电厂的概念与发展[J].电力系统自动化,2013,37(13):1-9.
WEI Zhinong, YU Shuang, SUN Guoqiang, et al. Concept and development of virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 1-9.
- [9] 徐俊俊,陈洪凯,张腾飞,等.需求响应视角下有源配电网分层分区切负荷方法[J].电力自动化设备,2022,42(7):244-252.
XU Junjun, CHEN Hongkai, ZHANG Tengfei, et al. Hierarchical and partitioned load shedding method of active distribution network in demand response perspective [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 244-252.
- [10] 宋梦,周佳妮,高赐威,等.CPSS视角下城市建筑与配电网高韧性协调运行:研究述评与展望[J].电力系统自动化,2023, 47(23):105-121.
SONG Meng, ZHOU Jiani, GAO Ciwei, et al. High-resilience coordinated operation of urban buildings and distribution networks from cyber-physical-social system perspective: research review and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 105-121.
- [11] MU Y F, XU Y Z, ZHANG J R, et al. A data-driven rolling optimization control approach for building energy systems that integrate virtual energy storage systems [J]. Applied Energy, 2023, 346: 121362.
- [12] 郭旭歆.含商业楼宇中央空调的虚拟电厂构建与运行研究 [D].南京:东南大学,2019.
GUO Xuxin. Research on construction and operation of virtual power plant with central air conditioning in commercial buildings [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [13] 熊真真.基于决策树的上海商业建筑虚拟电厂执行力分析[J].综合智慧能源,2023,45(6):66-72.
XIONG Zhenzhen. Analysis on execution of VPPs for commercial buildings in Shanghai based on decision tree [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(6): 66-72.
- [14] 柏颖,刘晓峰,陈雪颖.面向需求响应日前市场投标的负荷聚合商决策动力学分析[J].电力系统自动化,2022,46(24): 95-103.
BAI Ying, LIU Xiaofeng, CHEN Xueying. Dynamics analysis on decision-making of load aggregator for day-ahead demand response market bidding [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 95-103.
- [15] 尹逊虎,丁一,惠红勋,等.初期现货市场下考虑用户响应行为的需求响应机制设计[J].电力系统自动化,2021,45(23): 94-103.
YIN Xunhu, DING Yi, HUI Hongxun, et al. Design of demand response mechanism considering response behaviors of customers in initial electricity spot market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 94-103.
- [16] 赵力航,常伟光,杨敏,等.电力市场环境下虚拟电厂两阶段能量经济优化调度[J].中国电力,2022,55(10):14-22.
ZHAO Lihang, CHANG Weiguang, YANG Min, et al. Two-stage energy economic optimal dispatch of virtual power plant in deregulated electricity market [J]. Electric Power, 2022, 55(10): 14-22.
- [17] 高洪超,陈启鑫,金泰,等.考虑虚拟电厂灵活调节特性的现货市场出清模型及灵活性溢价评估方法[J].电网技术,2023,47(1):194-207.
GAO Hongchao, CHEN Qixin, JIN Tai, et al. Spot market clearing model and flexible premium evaluation method considering flexible regulation of virtual power plant [J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 194-207.
- [18] 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.
- [19] 广东电力交易中心.广东省市场化需求响应实施细则(试行稿)[EB/OL].(2022-05-13)[2024-03-10].<https://pm.gd.csg.cn/portal/#/home/informationNotice/detail?id=8077¬iceTypeId=31>.
Guangdong Power Trading Center. Implementation rules for market-oriented demand response in Guangdong Province (trial draft) [EB/OL]. (2022-05-13) [2024-03-10]. <https://pm.gd.csg.cn/portal/#/home/informationNotice/detail?id=8077¬iceTypeId=31>.
- [20] 倪泽龙,林钰钧,王治涛,等.基于模型预测的虚拟同步机控制储能调频研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(14):85-93.
NI Zelong, LIN Yujun, WANG Zhitao, et al. Research on frequency regulation of VSG controlled energy storages based on model predictive control [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 85-93.
- [21] QI T Y, YE C J, ZHAO Y M, et al. Deep reinforcement learning based charging scheduling for household electric vehicles in active distribution network [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2023, 11(6): 1890-1901.
- [22] HUI H X, DING Y, LIU W D, et al. Operating reserve

- evaluation of aggregated air conditioners [J]. *Applied Energy*, 2017, 196: 218-228.
- [23] 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.
- [24] 钱韦廷, 赵长飞, 万灿, 等. 基于概率预测的混合储能平抑风电波动随机优化调控方法[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(18): 18-27.
- QIAN Weiting, ZHAO Changfei, WAN Can, et al. Probabilistic forecasting based stochastic optimal dispatch and control method of hybrid energy storage for smoothing wind power fluctuations [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(18): 18-27.
- [25] YANG Y, PENG J C H, YE C J, et al. A criterion and stochastic unit commitment towards frequency resilience of power systems [J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2022, 37(1): 640-652.
-
- 漆洵懿(1998—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 电力需求侧管理、需求响应市场机制、建筑数字孪生。E-mail: taoyi.qi@connect.um.edu.mo
- 惠红勋(1992—), 男, 通信作者, 博士, 助理教授, 博士生导师, 主要研究方向: 灵活负荷资源的建模、控制、优化和市场策略。E-mail: hongxunhui@um.edu.mo
- 叶承晋(1987—), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统规划与运行、电力系统需求侧灵活资源。E-mail: yechenjing@zju.edu.cn
- (编辑 顾晓荣)

Bidding Mechanism Design for Building Virtual Power Plant to Participate in Demand Response Markets

QI Taoyi¹, HUI Hongxun¹, YE Chengjin², DING Yi², ZHAO Yuming³, SONG Yonghua¹

(1. State Key Laboratory of Internet of Things for Smart City (University of Macau), Macau 999078, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518001, China)

Abstract: The receiving-end urban power grids with high load density are facing an increasingly serious shortage of regulation resource. Urban buildings have many promising and flexible resources such as central air conditioners and electric vehicles, and can participate in the supply-demand interaction by constructing the virtual power plant (VPP) through aggregation. With the rapid development of the demand response (DR) markets, the market-oriented pricing and trading of flexible resources have become a trend. Therefore, considering the benefit demand of buildings and VPPs, the bidding mechanism for the building VPP participating in the DR market trading is designed. First, according to the characteristics of flexible loads of buildings, they are divided into lossless transferable loads, lossy transferable loads, as well as lossy reducible loads, and the corresponding formulation methods of capacity-cost are proposed, respectively. Then, an allocation method is proposed to guarantee the reliable revenues of both the buildings and the VPP, so as to continuously motivate them to participate in the DR markets. On this basis, the bidding optimization model is developed for the VPP to participate in the DR markets to realize the maximization of the revenues of VPPs in different scenarios. Finally, the effectiveness of the proposed mechanism in market trading and revenues allocation is proved by case simulations.

This work is supported by China Southern Power Grid Company Limited (No. 090000KK52210176), Guangdong Provincial Basic and Applied Basic Research Foundation of China (No. 2024A1515010141), and Science and Technology Development Fund of Macau SAR, China (No. 001/2024/SKL).

Key words: virtual power plant; demand response; electricity market; urban building; flexible load; bidding mechanism

