

电力中长期市场的双侧竞价机制设计

俞耀文¹, 陆宏智¹, 赵勇^{1*}, 黄成²

(1. 华中科技大学人工智能与自动化学院, 湖北 武汉 430074;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 210093)

摘要: 为了尽力消除市场力的影响, 探讨电力中长期市场的机制设计问题. 针对原 Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 机制在双侧竞价时预算不平衡的缺陷, 提出了一种基于参考价出清的 VCG (reference price clearing based Vickrey-Clarke-Groves, RPCBV) 机制. 证明了 RPCBV 机制满足个体理性、激励相容性和 (正) 预算平衡性; 且在大数据和重复竞价情况下, 当成员报价和参考价选取分别满足适当要求和规则时, 其损失的社会福利是有限或可控的. 此外, RPCBV 机制的计算量相比于原 VCG 机制减少了近一半. 数值仿真表明 RPCBV 机制对于电力中长期市场的双侧竞价是有效的和可实施的, 且进一步阐释了该交易机制的内涵和应用.

关键词: 电力中长期市场; 双侧竞价; VCG机制; 参考价

中图分类号: F426

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2026)01-0077-17

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2026.01.006

Design of a bilateral bidding mechanism for the medium- and long-term electricity market

Yu Yaowen¹, Lu Hongzhi¹, Zhao Yong^{1*}, Huang Cheng²

(1. School of Artificial Intelligence and Automation, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited, Nanjing 210093, China)

Abstract: To eliminate the impacts of market power as much as possible, the mechanism design of medium- and long-term electricity markets is studied. To overcome the drawback of budget deficit in the original Vickrey-Clarke-Groves (VCG) mechanism for bilateral bidding, a reference price clearing based Vickrey-Clarke-Groves (RPCBV) mechanism is proposed. The RPCBV mechanism has been proven to satisfy individual rationality, incentive compatibility, and (positive) budget balance. Moreover, in the context of big data and repeated biddings, the loss of social welfare is limited or controllable when the participants' prices and the selection of the reference price satisfy proper requirements and rules, respectively. Furthermore, the computational requirement of our RPCBV mechanism is reduced to nearly half of the original VCG mechanism. Numerical simulations demonstrate that the RPCBV mechanism is effective and implementable for the medium and long-term electricity market with bilateral bidding. The meaning and application of our mechanism are also illustrated.

Key words: medium and long-term electricity market; bilateral bidding; VCG mechanism; reference price

收稿日期: 2023-02-22; 修订日期: 2024-05-13.

基金项目: 国家电网有限公司科技资助项目(1400-202099523A-0-0-00).

* 通信作者

1 引言

近年来,我国大力推进电力市场化改革进程^[1,2],旨在通过市场发现电能的价值,并实现各类新旧电力资源^[3]的优化配置和高效利用.而建立公正合理的交易机制或模型,促使市场竞争充分自由,是达成这一目的的基础^[4].目前,我国电力中长期市场集中竞价交易模式普遍采用高低匹配或边际出清价格(marginal clearing price, MCP)两种机制^[5].然而,这两种机制下市场成员均有行使市场力的动机,即通过谎报价格、容量滞留或需求缩减等策略来操纵或影响市场价格,进而谋求各自收益^[6,7].行使市场力的行为会使电价偏离正常水平,对电力市场的运行产生不良影响,并阻碍市场作用的发挥.尽管目前已有不少市场力监测及缓解措施,监测指标如 HHI 指数、TOP-m 指数、勒纳指数等^[8],缓解措施如设置申报价格上下限、修正部分发电商的报价或成本参数等,但尚不能有效遏制市场成员行使市场力^[9,10].对此,本文设计了一种面向电力中长期市场双侧竞价的激励^[11]市场成员真实报价的交易机制,旨在尽可能地消除市场力的影响.

Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 机制能够激励市场成员自愿揭示其私人信息,有效解决信息不对称环境下行使市场力的问题,并被广泛用于各类市场设计,如频谱分配^[12,13]、带宽分配^[14]、广告拍卖^[15,16]、运输市场^[17]、电力市场^[18]等.该机制的特点是任一市场成员的支付或收入取决于其他市场成员的报价,而与自身的报价无关.例如,作为 VCG 机制的一个特例,二价拍卖规定报价最高的买方获胜,但其支付价格却为次高价,这一结算特点是二价拍卖或 VCG 机制具有激励相容性的根本原因.在单边竞价市场中,报价一方的支付或收入根据 VCG 机制结算,而另一方通常作为价格的接受者,因此买方需要支付的费用与卖方希望获得的收入完全相等.结合激励相容性, VCG 机制能保障最优社会福利的获取.但是,在双侧竞价市场中, VCG 机制一般不能同时满足个体理性、激励相容性、(正)预算平衡性和分配的 Pareto 有效性^[17].

VCG 机制由于具有激励竞争者讲真话的特点而在电力市场中得到了广泛应用.对于单边竞价的电力市场, Tang 等^[19]采用 VCG 机制确定风力发电聚合商给发电商的支付,能够有效激励发电商申报真实的机组出力概率分布函数,从而实现聚合商利润的最大化.王剑晓等^[20]基于 VCG 机制,设计了一种用于日前市场的价值公平分配机制,将一台发电机组的价值定义为其参与日前市场前后系统成本的变化量,并且证明了所提机制能满足个体理性、激励相容性以及系统成本最小性. Xu 等^[21]将 VCG 机制应用于单边竞价和双侧竞价的电力批发市场,证明了给定一组发电商的供给曲线, VCG 机制下的单位电量结算价格总是高于节点边际价格(locational marginal price, LMP)机制的.对于双侧竞价的电力市场, Exizidis 等^[18]在考虑风力发电不确定性的两阶段随机电力市场中应用 VCG 机制,发现风力发电渗透率对市场出清结果有显著影响,原因是 VCG 能激励低成本的风力发电商诚实报价而导致期望社会福利增加.进一步地, Xu 等^[21]为解决双侧竞价市场中 VCG 机制不满足(正)预算平衡的问题,在用电户的支付函数中添加一个正项或者发电商的收入函数中添加一个负项,但这通常会破坏机制的个体理性. AlAshery 等^[22]在分布式能源 P2P 交易中应用 VCG 机制时,认为参考 MCP 来限制分配给市场成员的社会福利,可以解决 VCG 机制预算不平衡的问题.但仔细分析可以发现,由于 MCP 取决于市场成员的报价,该做法可能会破坏机制的激励相容性,并导致福利损失.最近, Fang 等^[23]针对储能商参与的电力市场,提出了一种复杂的储能商结算规则,即采用非对称纳什谈判方法来分配由 VCG 机制确定的储能商总收入.由于该谈判模型中包含与市场成员报价有关的 LMP,且市场出清规则和结算规则不一致,因此直觉上该机制可能存在激励相容性缺陷.还有, Xu 等^[24]在产消者参与的本地电力市场中结合 VCG 机制,提出了一个基于线性规划扰动(linear-program-based perturbation, LPBP)的双侧竞价机制,拟通过损失部分社会福利来换取预算不平衡问题的解决,但 LPBP 机制选取的这一部分跟本轮报价有关,在重复竞价市场中不能抑制市场成员行使市场力.此外, VCG 机制还常被用于紧急情况需求响应^[25]、数据中心需求响应^[26]等场景.

根据以上分析,本文致力于解决的问题为: 1) (正)预算平衡性对于市场的可持续运行尤为重要,因此首先要解决 VCG 机制在双侧竞价的电力市场中不满足(正)预算平衡要求的缺陷. 2) 同时,为了解决市场力的问题,所设计的机制还应该满足个体理性和激励相容性. 3) 最后,为了同时满足以上三条性质,损失的社会

福利最好有限或可控。

对此, 设计了一个基于参考价出清的 VCG (reference price clearing based Vickrey-Clarke-Groves, RPCBV) 机制, 使得中标用电户的结算支付不低于中标发电商的结算收入。RPCBV 机制满足个体理性、激励相容性和 (正) 预算平衡性; 且在大数据和重复竞价情况下, 当参考价的选取和成员报价满足某些适当规则和要求时, 其损失的社会福利有限或可控。此外, RPCBV 机制的计算量相比于原 VCG 机制减少了近一半。相比于文献 [23], RPCBV 机制的出清规则和结算规则是相一致的, 并可严格证明其满足个体理性、激励相容性和 (正) 预算平衡性; 相比于文献 [24], 参考价的设定对竞价双方具有不确定性, 因此 RPCBV 机制能在双侧、重复竞价的电力市场中抑制市场成员行使市场力。

2 面向双侧竞价市场的机制设计与建模

设有 m 个用电户和 n 个发电商参与电力中长期市场交易。用电户的集合用 $M = \{1, 2, \dots, m\}$ 表示并以 $i \in M$ 表示其索引。其中用电户 i 的私人信息为其单调递减的真实需求函数 $\hat{d}_i(p)$, 其公开申报的单调递减的需求函数为 $d_i(p)$, 并分别简记为 \hat{d}_i 和 d_i , 其申报的最大需求量用 d_i^{\max} 表示。类似地, 发电商的集合用 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示并以 $j \in N$ 表示其索引。其中, 发电商 j 的私人信息为其单调递增的真实供给函数 $\hat{s}_j(p)$, 其公开申报的单调递增的供给函数为 $s_j(p)$, 并分别简记为 \hat{s}_j 和 s_j , 其申报的最大供给量用 s_j^{\max} 表示。市场竞价采用双侧密封方式进行, 市场成员之间不允许交流和串谋。进一步地, 令 $\mathbf{d} = (d_1, d_2, \dots, d_m)$ 和 $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_n)$ 分别表示所有用电户申报的需求函数向量和所有发电商申报的供给函数向量, 而 \mathbf{d}_{-i} 和 \mathbf{s}_{-j} 分别表示除用电户 i 外其他用电户申报的需求函数向量和除发电商 j 外其他发电商申报的供给函数向量。此外, 为了表达和理解方便, 用 v_i 和 c_j 分别表示 d_i 和 s_j 的反函数。但需注意的是, 上述关于供需函数单调性的约定仅是为了方便后续的表达和证明, 实际上可放松为非递增的需求函数和非递减的供给函数, 这不会影响本文的结论。

通常, 市场成员按照事先约定的报价规则申报各自的供需信息后, 系统运营商 (如电力交易中心) 便可分别根据出清规则和结算规则确定各成员的中标电量和结算电价。令 q_i^U 表示用电户 i 的买入电量, $\mathbf{q}^U = (q_1^U, q_2^U, \dots, q_m^U)$ 表示所有用电户的出清电量向量。类似地, 令 q_j^G 表示发电商 j 的售出电量, $\mathbf{q}^G = (q_1^G, q_2^G, \dots, q_n^G)$ 表示所有发电商的出清电量向量。 $F(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 表示所有市场成员参与交易时的社会福利, $F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 表示所有市场成员参与交易时的最大社会福利, $F^{\max}(\mathbf{d}_{-i}, \mathbf{s})$ 表示用电户 i 不参与交易时的最大社会福利, $F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}_{-j})$ 表示发电商 j 不参与交易时的最大社会福利。

2.1 VCG 机制

在双侧竞价的电力市场中, VCG 机制与高低匹配机制、MCP 机制的出清 (电量分配) 规则类似, 都是以社会福利最大化为目标, 三者的区别主要在于结算规则的不同。通常, 高低匹配机制下市场成员的收入或支付价格为买卖双方实际报价的平均值, MCP 机制下的收入或支付价格为边际出清价格 (即“供需曲线的交点价格”), 而 VCG 机制下的收入或支付取决于其他成员对社会福利所做的贡献。

社会福利是指用电户愿意支付的最高费用与发电商希望获得的最低收入之差^[18], 即

$$F(\mathbf{d}, \mathbf{s}) = \sum_{i \in M} \int_0^{q_i^U} v_i(x) dx - \sum_{j \in N} \int_0^{q_j^G} c_j(x) dx. \quad (1)$$

VCG 机制的市场出清 (或电量分配) 问题可描述为以社会福利最大化为目标的凸优化模型 P1(\mathbf{d}, \mathbf{s})

$$\text{Max}_{(\mathbf{q}^U, \mathbf{q}^G)} F(\mathbf{d}, \mathbf{s}), \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in M} q_i^U = \sum_{j \in N} q_j^G, \quad (3)$$

$$0 \leq q_i^U \leq d_i^{\max}, \forall i \in M, \quad (4)$$

$$0 \leq q_j^G \leq s_j^{\max}, \forall j \in N, \quad (5)$$

其中目标函数 (2) 表示寻求一组出清电量来最大化社会福利. 约束条件 (3) 为市场供需平衡约束, 即用电户的总中标电量等于发电商的总中标电量. 约束条件 (4) 表示用电户的中标电量非负且不超过其最大需求量. 约束条件 (5) 表示发电商的中标电量非负且不超过其最大供给量.

结算时采用双侧竞价的 VCG 结算机制^[21, 22], 市场成员的支付或收入根据其参与交易前后其他市场成员最大社会福利的差值来确定. 设用电户 i 在 $P1(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 的最优解中的中标电量为 $q_i^{U, VCG}$, 其支付为 $W_i^{U, VCG}$. 其不参与交易时其他市场成员所得最大社会福利为 $F^{\max}(\mathbf{d}_{-i}, \mathbf{s})$, 其参与交易后其他市场成员得到的最大社会福利为 $F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}) - \int_0^{q_i^{U, VCG}} v_i(x) dx$, 二者之差即为该用电户的支付, 即

$$W_i^{U, VCG} = F^{\max}(\mathbf{d}_{-i}, \mathbf{s}) - \left(F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}) - \int_0^{q_i^{U, VCG}} v_i(x) dx \right) = \int_0^{q_i^{U, VCG}} v_i(x) dx - (F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}) - F^{\max}(\mathbf{d}_{-i}, \mathbf{s})). \quad (6)$$

相似地, 设发电商 j 在 $P1(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 的最优解中的中标电量为 $W_j^{G, VCG}$, 其收入 $W_j^{G, VCG}$ 为

$$W_j^{G, VCG} = - \left[F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}_{-j}) - \left(F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}) + \int_0^{q_j^{G, VCG}} c_j(x) dx \right) \right] = \int_0^{q_j^{G, VCG}} c_j(x) dx + (F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}) - F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}_{-j})). \quad (7)$$

可以证明, 在上述 VCG 机制下用电户和发电商均会诚实报价^[21], 即 $\mathbf{d} = \hat{\mathbf{d}}$ 和 $\mathbf{s} = \hat{\mathbf{s}}$, 其获得的收益就是对社会福利做出的贡献. 但是, 用电户需要支付的结算费用可能会小于发电商希望获得的结算收入, 即 $\sum_{i \in M} W_i^{U, VCG} < \sum_{j \in N} W_j^{G, VCG}$, 亦即不满足 (正) 预算平衡要求 (见第 5 节“算例分析”).

2.2 考虑 (正) 预算平衡要求的 VCG 机制设计

一个理想的市场交易机制应该同时满足个体理性、激励相容性、(正) 预算平衡性和分配的 Pareto 有效性等 4 项理性要求, 但在双侧竞价市场中这种机制一般不存在^[27]. 在电力市场中, 个体理性和激励相容性能分别使得市场成员收益非负和不行使市场力, 而 (正) 预算平衡性能保证系统运营商的收益非负, 是市场持续运行的前提. 因此, 通过对上述 VCG 机制中出清和结算规则的修改, 设计了一种基于参考价出清的 VCG (reference price clearing based Vickrey-Clarke-Groves, RPCBV) 机制, 旨在解决市场力问题的同时, 也能满足 (正) 预算平衡要求.

为了区别本文设计的 RPCBV 机制, 称上述 2.1 节中的 VCG 机制为原 VCG 机制 (original VCG).

1) 报价规则

与原 VCG 机制相同, RPCBV 机制要求市场成员独立、密封地申报各自单调递减的需求函数 $d_i (i \in M)$ 或单调递增的供给函数 $s_j (j \in N)$.

2) 出清 (或获胜) 规则

设定一个参考价 p_0 , 且该设定对竞价双方应具有不确定性. RPCBV 机制的市场出清规则如下: 叠加所有用电户的需求曲线形成总需求曲线 D (其反函数记为 V), 叠加所有发电商的供给曲线形成总供给曲线 S (其反函数记为 C), 令 $d_i(p_0)$ 表示在参考价 p_0 时用电户 i 的最大需求量, 显然 $d_i(p_0) \leq d_i^{\max}$. 类似地, 令 $s_j(p_0)$ 表示在参考价 p_0 时发电商 j 的最大供给量, 显然 $s_j(p_0) \leq s_j^{\max}$.

RPCBV 机制的市场出清问题可描述为以社会福利最大化为目标的凸优化模型 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$

$$\text{Max}_{(q^U, q^G)} F(\mathbf{d}, \mathbf{s}), \quad (8)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i \in M} q_i^U = \sum_{j \in N} q_j^G, \quad (9)$$

$$0 \leq q_i^U \leq d_i(p_0), \forall i \in M, \quad (10)$$

$$0 \leq q_j^G \leq s_j(p_0), \forall j \in N. \quad (11)$$

目标函数 (8) 与目标函数 (2) 相同, 即寻求最大社会福利出清. 约束条件 (9) 与约束条件 (3) 相同, 为供需平衡约束. 参考价 p_0 反映在约束条件 (10) 和 (11) 中, 约束条件 (10) 表示 RPCBV 机制下用电户的中标电量非负且不超过其在参考价 p_0 时的最大需求量; 约束条件 (11) 表示 RPCBV 机制下发电商的中标电量非负

且不超过其在参考价 p_0 时的最大供给量。

根据考虑参考价 p_0 时的供需关系, 出清结果有如下三种可能: 1) 如图 1(a) 所示, 若用电户的总需求量大于发电商的总供给量, 即 $\sum_{i \in M} d_i(p_0) > \sum_{j \in N} s_j(p_0)$, 则发电商的中标电量为 p_0 对应的最大供给量; 再根据供需平衡关系, 用电户与发电商的总中标电量应相等, 于是用电户的中标电量为价格 p' 对应的需求量, 其中 p' 表示需求曲线 D 上与 $\sum_{j \in N} s_j(p_0)$ 对应的价格. 2) 如图 1(b) 所示, 若用电户的总需求量小于发电商的总供给量, 即 $\sum_{i \in M} d_i(p_0) < \sum_{j \in N} s_j(p_0)$, 则用电户的中标电量为 p_0 对应的最大需求量; 而发电商的中标电量为价格 p'' 对应的供给量, 其中 p'' 表示供给曲线 S 上与 $\sum_{i \in M} d_i(p_0)$ 对应的价格. 3) 若用电户的总需求量等于发电商的总供给量, 即 $\sum_{i \in M} d_i(p_0) = \sum_{j \in N} s_j(p_0)$, 则用电户和发电商的中标电量均为 p_0 对应的最大需求量或供给量。

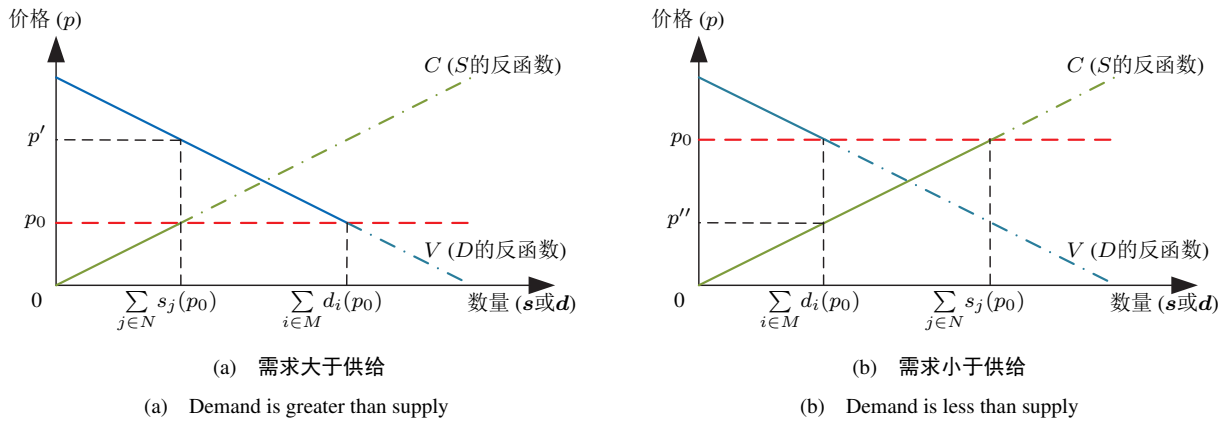


图 1 供需曲线出清示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of clearings according to the supply and demand curves

显然, 与 $P1(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 相比, $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 中市场成员中标电量的上限由 p_0 的限制而变小了. 由于 $P1(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 和 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 的目标函数相同, 而 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 的可行域包含于 $P1(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 的可行域中, 所以 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 的目标函数最优值不会大于 $P1(\mathbf{d}, \mathbf{s})$. 这意味着, RPCBV 机制下的社会福利不会大于原 VCG 机制, 或者说, RPCBV 机制以损失部分社会福利为代价弥补了原 VCG 机制预算不平衡的缺陷。

3) 结算规则

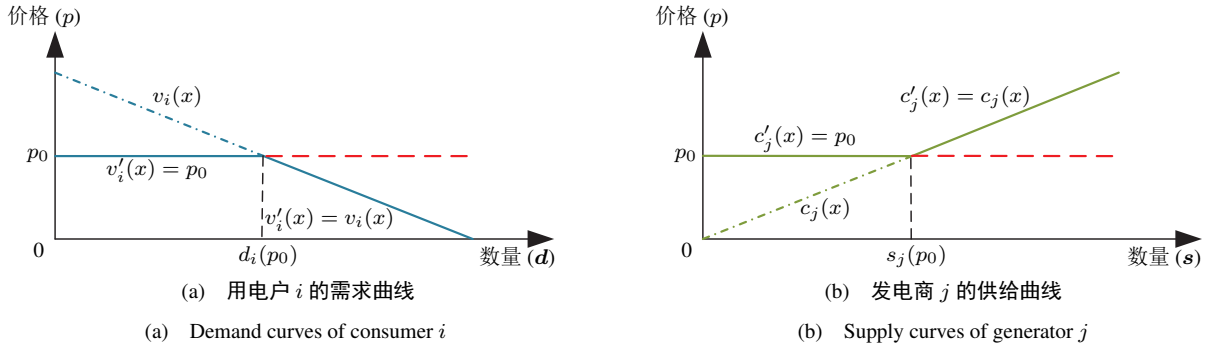
首先, 根据上述设定的参考价 p_0 调整各发电商的供给函数和用电户的需求函数. 具体地, 设 d'_i 和 s'_j 分别表示调整后用电户 i 的需求函数和发电商 j 的供给函数, 令 $\mathbf{d}' = (d'_1, d'_2, \dots, d'_m)$ 和 $\mathbf{s}' = (s'_1, s'_2, \dots, s'_n)$ 分别表示调整后所有用电户的需求函数向量和所有发电商的供给函数向量, 记 d'_i 和 s'_j 的反函数分别为 v'_i 和 c'_j . 如图 2(a) 所示, 用电户 i 需求曲线 $v'_i(x)$ 的调整规则可表示为

$$v'_i(x) = \begin{cases} p_0, & x \in [0, d_i(p_0)] \\ v_i(x), & x \in (d_i(p_0), +\infty). \end{cases} \quad (12)$$

如图 2(b) 所示, 发电商 j 供给曲线 $c'_j(x)$ 的调整规则可表示为

$$c'_j(x) = \begin{cases} p_0, & x \in [0, s_j(p_0)] \\ c_j(x), & x \in (s_j(p_0), +\infty). \end{cases} \quad (13)$$

在 RPCBV 机制下, 令 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 的最优解 q_i^{U*} 和 q_j^{G*} 分别表示用电户 i 和发电商 j 的中标电量, $F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}')$ 和 $F^{\max}(\mathbf{d}', \mathbf{s})$ 分别表示调整供给和需求函数后所有市场成员参与交易时的最大社会福利,

图 2 调整前后用电户 i 和发电商 j 的供需曲线Fig. 2 Demand curves of consumer i and supply curves of generator j before and after adjustments

即 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}')$ 和 $P2(\mathbf{d}', \mathbf{s})$ 的目标函数最优值; 而 $F^{\max}(\mathbf{d}_{-i}, \mathbf{s}')$ 和 $F^{\max}(\mathbf{d}', \mathbf{s}_{-j})$ 分别表示用电户 i 和发电商 j 不参与交易时的最大社会福利, 即 $P2(\mathbf{d}_{-i}, \mathbf{s}')$ 和 $F^{\max}(\mathbf{d}', \mathbf{s}_{-j})$ 的目标函数最优值. 用电户 i 的结算支付 W_i^U 和发电商 j 的结算收入 W_j^G 可根据以下公式计算:

$$W_i^U = \int_0^{q_i^{U*}} v_i(x) dx - (F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}') - F^{\max}(\mathbf{d}_{-i}, \mathbf{s}')), \quad (14)$$

$$W_j^G = \int_0^{q_j^{G*}} c_j(x) dx + (F^{\max}(\mathbf{d}', \mathbf{s}) - F^{\max}(\mathbf{d}', \mathbf{s}_{-j})). \quad (15)$$

出清模型 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 、 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}')$ 及 $P2(\mathbf{d}', \mathbf{s})$ 三者的最优解间有下述关系.

引理 1 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 的最优解是 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}')$ 的最优解, 也是 $P2(\mathbf{d}', \mathbf{s})$ 的最优解.

所有引理和命题的证明见附录.

某些特殊情况下同一个价格可能会对应多个需求量或供给量, 意味着 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 可能会有多个最优解或出清方案. 此时, 可按某种事前约定或规则选择其中一个最优解即可, 例如可将出清电量优先分配给申报时间较早的市场成员.

3 RPCBV 机制分析

如表 1 所示, 普遍采用的高低匹配机制和 MCP 机制均不满足激励相容性和分配的 Pareto 有效性, 原 VCG 机制不满足 (正) 预算平衡性. 本文设计的 RPCBV 机制满足个体理性、激励相容性和 (正) 预算平衡性, 尽管会损失部分社会福利 (即不满足分配的 Pareto 有效性).

表 1 与几种常用机制所满足性质的对照表

Table 1 Comparison table of properties with several common mechanisms

机制/性质	个体理性	激励相容性	(正) 预算平衡性	分配的 Pareto 有效性
高低匹配机制	✓	×	✓	×
MCP 机制	✓	×	✓	×
VCG 机制	✓	✓	×	✓
RPCBV 机制	✓	✓	✓	×

为了分析和证明 RPCBV 机制满足上述性质, 下面构造关于用电户 $k \in M$ 申报的需求函数 d_k 的辅助函数 \tilde{d}_k , 其满足单调递减要求. 具体方法如下: 任取某个价格 $p^\# \geq 0$, 令

$$\tilde{d}_k(p) = \begin{cases} d_k(p^\#), & p \in [0, p^\#] \\ d_k(p), & p \in (p^\#, +\infty). \end{cases} \quad (16)$$

于是, $\forall p \geq 0$ 有 $\tilde{d}_k(p) \leq d_k(p)$, 且其反函数 $\tilde{v}_k(x)$ 满足 $\tilde{v}_k(x) = v_k(x)$, $x \in [0, d_k(p^\#)]$; $\tilde{v}_k(x) = 0$, $x \in (d_k(p^\#), +\infty)$.

接下来, 给定 p_0 , 如果某个市场成员 k 对应的需求量 $d_k(p_0)$ 或供给量 $s_j(p_0)$ 为 0, 则根据 RPCBV 机制的出清规则可知, 其必然不中标. 于是, 为了简化表达, 不妨假设 $\forall i \in M$ 和 $\forall j \in N$ 有 $d_k(p_0) > 0$ 和 $s_j(p_0) > 0$.

引理 2 其他用电户在用电户 k 申报 \tilde{d}_k 时的中标电量不小于 k 申报 d_k 时的中标电量, 即 $i \in M$ 且 $i \neq k$ 有 $\tilde{q}_i^{U*} \geq q_i^{U*}$.

根据上述构造的辅助函数 (16), 可证明 RPCBV 机制具有如下性质或特点.

命题 1 RPCBV 机制满足激励相容性.

这里, 激励相容性是指市场成员追求个体利益最大化的行为, 与实现集体利益最大化的目标相一致. 具体地, RPCBV 机制满足激励相容性是指诚实报价 (即申报真实的供需函数) 是所有市场成员的占优策略; 或者说, 无论其他成员如何报价, 诚实报价都是任一成员的最优选择^[18].

命题 2 RPCBV 机制满足个体理性.

个体理性是指市场成员参与交易所获得的收益不低于其不参与交易时的收益. 通常, 成员不参与交易时的收益为“0”.

命题 3 RPCBV 机制满足 (正) 预算平衡性.

这里, (正) 预算平衡性要求买方支付的结算费用不得小于卖方获得的结算收入.

此外, 双侧竞价交易可用其分配效率来衡量相关机制实施的有效性. 其中, 分配效率可定义为交易机制能够实现的社会福利与完全信息条件下可获得的最大社会福利之比, 该比值位于 0 和 1 之间, 且越大意味着机制的分配越有效. 根据 RPCBV 机制的出清规则, 其分配效率与参考价 p_0 的设定有关. 显然, 若要使分配效率最大, 参考价 p_0 应设定为当前申报的供需曲线交点价格. 然而, RPCBV 机制的 100% 分配效率和激励相容性间存在如下矛盾.

命题 4 若“ p_0 取当前申报的供需曲线交点价格”的设定规则为市场共同知识, 则 RPCBV 机制不满足激励相容性.

命题 4 表明, 为了保证 RPCBV 机制满足激励相容性, p_0 的设定需具有不确定性, 且使得市场成员难以预测和不能操纵. 因此, 上述满足 (正) 预算平衡性的 RPCBV 机制需牺牲部分社会福利来换取激励相容性, 即该机制的分配效率达不到 100%.

4 参考价 p_0 设定与分配效率分析

根据命题 4 及其分析, 为了使得 RPCBV 机制能够满足激励相容性, “参考价 p_0 的设定规则”需要满足如下条件: 任何市场成员在其报价前难以预测或操纵参考价 p_0 .

直觉上, p_0 的设定对竞价双方应该具有不确定性, 且 p_0 信息的公开与其设定规则有关. 例如, 若 p_0 取前若干次交易的 MCP, 那么真实价格低于 p_0 的用电户得知自己无法中标后会有动机谎报低价格, 促使当前交易的 MCP (即后续交易设定的 p_0) 更低, 从而争取在后几次交易中出清并谋取利益, 因此每次交易的 MCP 不能在当前交易结束时就立刻公布, 需推迟若干个交易周期后再公布. 若 p_0 在政府管制的价格上下限之间随机生成, 则不会受到市场成员申报信息的影响, 可以及时公布. 尽管当 p_0 的随机值恰好在供需曲线交点的 MCP 时, 能达到 100% 的市场效率, 然而 p_0 选取的随机性导致市场效率也具有较大随机性, 难以确定市场效率的损失.

4.1 RPCBV-MCP 机制

RPCBV 机制的缺陷在于存在分配效率或社会福利的损失问题, 但可以结合实际市场情景进行改善. 在电力中长期双侧竞价市场中, 市场成员通常被允许申报一个价格及其对应的需求量或供给量, 即一段水平需求线或供给线. 结合这一特点, 本节设计了一个 p_0 的设定规则以将上述福利损失控制在一个有限范围内.

在上述“一价一量”的市场申报规则下, 市场成员首先独立、密封地给出各自的需求信息 $(p_i, d_i)(i \in M)$ 或供给信息 $(p_j, s_j)(j \in N)$. 然后, 叠加所有用电户的需求信息形成阶梯型的总需求折线 D , 叠加所有发电商的供给信息形成阶梯型的总供给折线 S , 如图 3 所示.

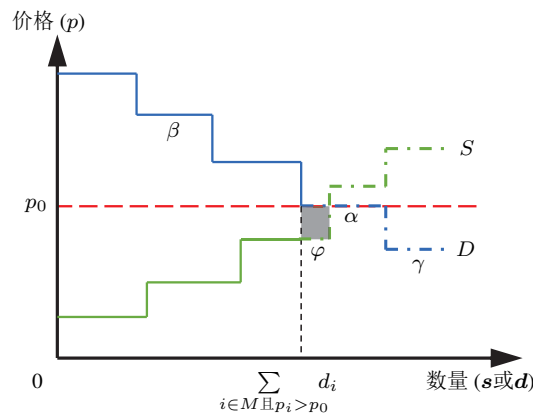


图 3 参考价的设定规则说明图

Fig. 3 Illustration of rules for setting the reference price

选取图 3 中需求折线 D 上与供给折线 S 的交点 α 对应的价格作为出清参考价 p_0 , 即需求侧的 MCP, 并删除 α 点对应的用电户 (若有多个, 则只需删除 1 个), 此时有 $\sum_{i \in M \text{ 且 } p_i > p_0} d_i < \sum_{j \in N \text{ 且 } p_j \leq p_0} s_j$. 最后, 市场出清如下: 报价高于 p_0 的用电户的中标电量为申报的需求量, 而发电商的总中标电量可根据供需平衡关系确定, 见 2.2 节. 显然, 在上述 p_0 设定规则下 RPCBV 机制 (RPCBV-MCP 机制) 的福利损失仅为图 3 中的阴影部分, 或者说被控制在了一个有限范围内.

命题 5 RPCBV-MCP 机制满足激励相容性、个体理性和 (正) 预算平衡性.

通常, VCG 机制在双侧竞价市场中不满足预算平衡性, 会导致某些市场难以长期有效运行. 理论上, 为了满足 (正) 预算平衡性, VCG 机制的改进需在激励相容、个体理性以及分配的 Pareto 有效性之间权衡. 上述命题 5 表明, 在“一价一量”的申报规则下, 以供需折线交点对应的价格作为参考价 p_0 的 RPCBV-MCP 机制在改善分配效率的同时, 不会破坏 RPCBV 机制原有的上述特性, 本质上是 VCG 机制的一种折中. 这里, 该命题的管理启示是: RPCBV-MCP 机制以牺牲部分社会福利的方式折中换取了对市场更重要的激励相容性、个体理性和 (正) 预算平衡性等要求, 且该机制损失的福利能被控制在一定的范围内, 适用于电力中长期市场双侧竞价的管理.

4.2 假设和机制的进一步说明

需进一步说明的还有以下情形.

1) 上述分析和证明虽然都只是针对一次双侧竞价交易, 但由于 p_0 的每次设定具有独立性, 因此本文结论 (包括命题 1 至命题 5) 对于具有电力中长期双侧、重复竞价市场也成立.

2) 由式 (14) 和式 (15)、并结合“一价一量”申报规则, 不难证明在上述参考价的设定规则下, 用电户的结算价等于 p_0 , 而发电商的结算价会小于 p_0 , 那么只需计算发电侧的出清价格, 总计算量减少了近一半, 有利于 RPCBV 机制的实施.

3) 对称地, p_0 的设定规则也可以是: 选取图 3 中供给折线 S 上 φ 点所对应的价格作为参考价, 即发电

侧 (商) 的 MCP, 并删除 φ 点对应的发电商.

4) 要想完全消除社会福利损失在理论上是不可能的, 但可以控制在一个有限范围 (见图 3 中的阴影部分); 否则, 必然会牺牲机制的其他性质.

提出的 RPCBV 机制通过引入参考价, 牺牲部分市场效率换取了该机制可以同时实现个体理性、激励相容性、(正) 预算平衡性. 此外, 根据实际电力中长期市场中申报“一价一量”的特点, 本节提出的参考价设定策略还可使 RPCBV 机制的市场效率损失控制在一个有限的可接受范围内.

5 数值仿真

本节将结合两个算例来分析和比较 RPCBV 机制和原 VCG 机制间的差异, 并通过 p_0 的不同取值来揭示或验证 p_0 对 RPCBV 机制下的支付或收入价格、分配效率 (社会福利) 以及市场盈余等的影响.

5.1 算例设计

如第 4 节所述, 在电力中长期市场的实际竞价交易中, 通常仅允许市场成员申报一个价格及其对应的需求量或供给量, 即一条水平的需求线或供给线. 因此, 本节的算例设计仅考虑每个成员只申报“一价一量”的情形. 具体地, 设有 5 个用电户和 5 个发电商参与交易, 其申报的供需信息如下表 2 所示.

表 2 算例分析中市场成员申报的供需信息
Table 2 Supply and demand information submitted by market participants in case study

用电户	价格/(元/MW·h)	需求量/(MW·h)	发电商	价格/(元/MW·h)	需求量/(MW·h)
1	480	2.3	1	220	3.5
2	460	3.2	2	250	2.3
3	435	3.5	3	325	3.8
4	350	1.8	4	220	2.2
5	280	2.2	5	450	1.5

采用原 VCG 机制进行市场出清和结算 (参照图 4(a)、并去掉红线): 首先, 用电户 1、用电户 2、用电户 3、用电户 4 的中标电量分别为 2.3 MW·h、3.2 MW·h、3.5 MW·h、0.6 MW·h, 发电商 1、发电商 2、发电商 3 的中标电量分别为 3.5 MW·h、2.3 MW·h、3.8 MW·h, 而其他市场成员不中标. 然后, 以用电户 1 的支付计算为例, 其参与交易时的社会福利为 $480 \times 2.3 + 460 \times 3.2 + 435 \times 3.5 + 350 \times 0.6 - 220 \times 3.5 - 250 \times 2.3 - 325 \times 3.8 = 1728.5$ 元, 不参与交易时的社会福利为 $460 \times 3.2 + 435 \times 3.5 + 350 \times 1.8 - 220 \times 3.5 - 250 \times 2.3 - 325 \times 2.7 = 1402$ 元, 因此其需支付的费用为 $480 \times 2.3 - (1728.5 - 1402) = 777.5$ 元, 支付价格为 338.04 元/MW·h, 其他市场成员的支付或收入可类似计算. 最后, 原 VCG 机制下的市场出清和结算结果如表 3 所示. 显然, 不同市场成员的支付或收入价格不同, 且机制实现的社会福利为 1728.5 元, 即可实现的最大社会福利.

采用 RPCBV 机制进行市场出清和结算: 如图 4(a) 所示, 叠加所有用电户的需求信息形成阶梯型总需求折线 D , 叠加所有发电商的供给信息形成阶梯型的总供给折线 S ; 然后, 任取 $p_0 = 400$ 元/MW·h, 此时总需求量小于总供给量, 于是用电户 1、用电户 2、用电户 3 的中标电量分别为 2.3 MW·h、3.2 MW·h、3.5 MW·h, 发电商 1、发电商 2、发电商 3 的中标电量分别为 3.5 MW·h、2.3 MW·h、3.2 MW·h, 而其他市场成员不中标. 再如图 4(b) 所示, 将发电商 1、发电商 2、发电商 3 的报价调整为 p_0 , 叠加所有发电商调整后的供给折线形成阶梯型的总供给折线 S' ; 接下来, 以用电户 1 的支付计算为例, 其参与交易时的社会福利为 $480 \times 2.3 + 460 \times 3.2 + 435 \times 3.5 - 400 \times 9 = 498.5$ 元, 不参与交易时的社会福利为 $460 \times 3.2 + 435 \times 3.5 - 400 \times 6.7 = 314.5$ 元, 因此其需要支付的费用为 $480 \times 2.3 - (498.5 - 314.5) = 920$ 元, 或支付价格为 400 元/MW·h, 其他市场成员的支付或收入可类似计算. 最后, RPCBV 机制下的市场出清和结算结果如表 3 所示. 由表 3 可知, 给定 p_0 后总需求量小于总供给量的情形下, 用电户的支付价格均为参考价 p_0 , 而不同发电商的收入价格不同, 且该机制能实现的社会福利为 $480 \times 2.3 + 460 \times 3.2 + 435 \times 3.5 - 220 \times 3.5 - 250 \times 2.3 - 325 \times 3.2 = 1713.5$ 元.

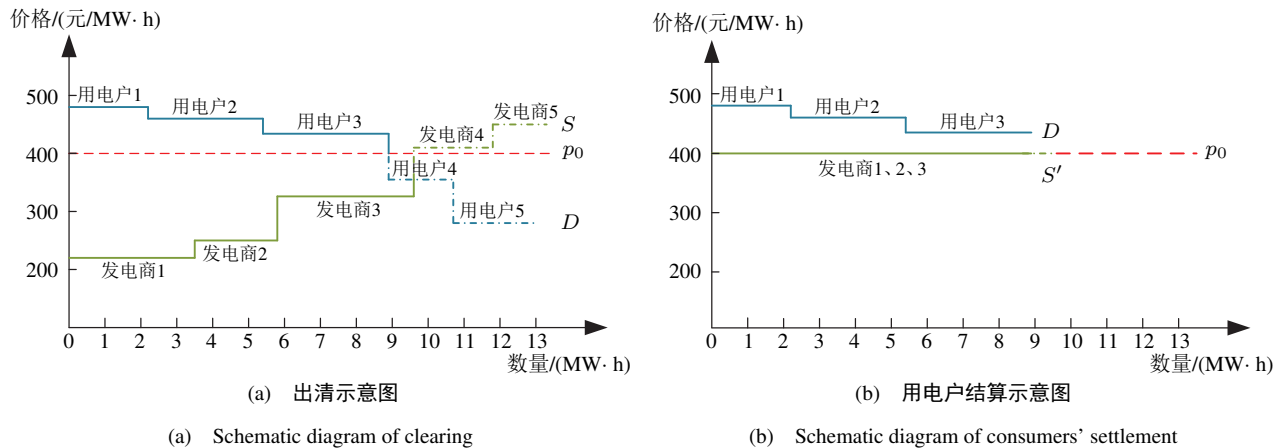


图 4 算例分析中市场成员申报的供需折线

Fig. 4 Supply and demand curves in case study

采用 RPCBV-MCP 机制进行出清和结算 (参照图 4(a), 但红线位于 350 元/MW·h 处): 根据供需曲线交点对应价格, 取 $p_0 = 350$ 元/MW·h, 与 RPCBV 机制不同, RPCBV-MCP 需剔除位于交点的用电户 4, 此时总需求量小于总供给量, 用电户 1、用电户 2、用电户 3 的中标电量分别为 2.3 MW·h、3.2 MW·h、3.5 MW·h, 发电商 1、发电商 2、发电商 3 的中标电量分别为 3.5 MW·h、2.3 MW·h、3.2 MW·h, 而其他市场成员不中标. RPCBV-MCP 中的参考价选取规则仅影响 RPCBV 机制的出清规则, 不影响机制的结算规则, 中标市场成员的支付和收入可按照 RPCBV 机制取 $p_0 = 350$ 元/MW·h 的情况结算. 市场出清和结算结果如表 3 所示. 虽然选取参考价时剔除了用电户 4, 但此时 RPCBV-MCP 机制能实现的社会福利仍能达到 1 713.5 元, 与 $p_0 = 400$ 元/MW·h 时 RPCBV 机制实现的社会福利相同.

表 3 算例分析中的市场出清和结算结果

Table 3 Market clearing and settling results in case study

市场成员	中标电量/(MW·h)			支付或收入/(元)			支付或收入价格/(元/MW·h)			收益/(元)		
	Original VCG	RPCBV	RPCBV-MCP	Original VCG	RPCBV	RPCBV-MCP	Original VCG	RPCBV	RPCBV-MCP	Original VCG	RPCBV	RPCBV-MCP
用电户 1	2.3	2.3	2.3	777.5	920.0	805.0	338.04	400.00	350.00	326.5	184.0	299.0
用电户 2	3.2	3.2	3.2	1 070.0	1 280.0	1 120.0	334.38	400.00	350.00	402.0	192.0	352.0
用电户 3	3.5	3.5	3.5	1 167.5	1 400.0	1 225.0	333.57	400.00	350.00	355.0	122.5	297.5
用电户 4	0.6	0	0	195.0	0	0	325.00	\	\	15.0	0	0
发电商 1	3.5	3.5	3.5	1 416.5	1 355.0	1 210.0	404.71	387.14	345.71	646.5	585.0	440.0
发电商 2	2.3	2.3	2.3	907.0	875.0	790.0	394.35	380.43	343.48	332.0	300.0	215.0
发电商 3	3.8	3.2	3.2	1 547.0	1 280.0	1 120.0	407.11	400.00	350.00	312.0	240.0	80.0

5.2 机制对比

如表 4 所示, 与原 VCG 机制相比, RPCBV 机制下用电户平均支付价格更高, 而发电商平均收入价格更低. 原 VCG 机制能够实现最大化社会福利, 机制效率达到了 100%, 但会产生 660.5 元的 (负) 预算不平衡. RPCBV 机制和 RPCBV-MCP 机制损失了部分社会福利, 但分配效率仍然较高, 均可达到 99.13%, 且都不存在原 VCG 机制的预算不平衡问题, 两机制分别可产生 90 元和 30 元的市场盈余, 该盈余可用于电网的建设与日常维护等方面.

实施 RPCBV 机制时, p_0 设置规则引入的不确定性导致难以确定机制效率损失的范围. 使用图 3 中给出的参考价设定方法, 实施 RPCBV-MCP 机制时仅剔除边际用电户/发电商的投标, 由于单个用电户/发电商的报价报量有界, 损失的社会福利或机制效率也将有界.

表 4 不同市场机制对比
Table 4 Comparison among mechanisms

机制	用电户平均支付价格/ (元/MW·h)	发电商平均收入价格/ (元/MW·h)	社会福利/(元)	机制效率	市场盈余/(元)
Original VCG	334.38	403.18	1 728.5	100%	-660.5
RPCBV	400.00	390.00	1 713.5	99.13%	90.0
RPCBV-MCP	350.00	346.67	1 713.5	99.13%	30.0

5.3 参考价设定的影响

为了分析 RPCBV 机制中参考价 p_0 变化对市场成员结算价格、机制效率以及市场盈余的影响, 以 5 元为步长在 220 元~480 元的范围内调整 p_0 的取值, 结果展示在如图 5 中. 如图 5(a) 所示, 当 p_0 从发电商的最低报价 220 元变化到发电商 3 的报价 325 元时, 用电户的平均支付价格逐渐降低; 而当 p_0 从发电商 3 的报

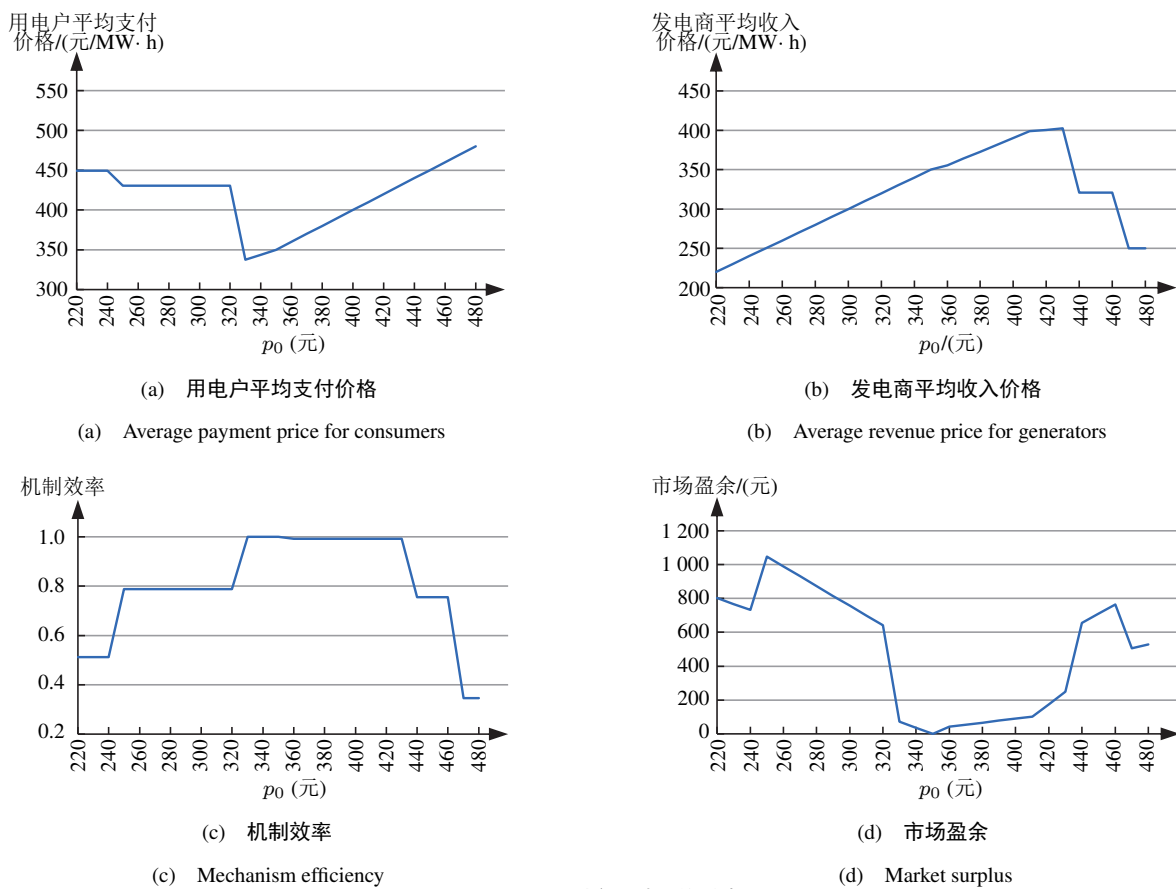


图 5 p_0 对市场结果的影响

Fig. 5 Impacts of p_0 on market results

价 325 元变化到用电户的最高报价 480 元时, 用电户的平均支付价格逐渐上升. 如图 5(b) 所示, 当 p_0 从发电商的最低报价 220 元变化到用电户 3 的报价 435 元时, 发电商的平均收入价格逐渐上升; 而当 p_0 从用电户 3 的报价 435 元变化到用电户的最高报价 480 元时, 发电商的平均收入价格逐渐降低. 可见, 随着 p_0 的增大, 用电户的平均支付价格先下降后上升, 而发电商的平均收入价格先上升后下降.

如图 5(c) 所示, 机制效率随着 p_0 的增大先上升后下降 (即社会福利随着 p_0 的增大先增大后减小), 且当 p_0 位于发电商 3 的报价 325 元和用电户 4 的报价 350 元之间时, 能够达到 100%. 值得注意的是在 RPCBV 机制中, 当 p_0 恰好选在 MCP 的 350 元时, 对应的用电户 (发电商) 投标不会被剔除, 此处与 RPCBV-MCP 机制不同. 随着 p_0 偏离此区间, 市场效率随着被剔除的投标数量增加而降低. 如图 5(d) 所示, 市场盈余也显著受到 p_0 的影响, 最低为 0 元, 最高为 1 047.5 元.

6 结束语

高低匹配机制和 MCP 机制下,中长期电力市场的成员通常有动机行使市场力来影响市场出清或结算的结果,不利于电力市场的长期有效运行和效率发挥.对此,一个有效的解决办法是采用 VCG 机制,然而在双侧竞价的环境下 VCG 机制一般不满足(正)预算平衡要求.因此,设计了一个改进的、基于参考价出清的 RPCBV 机制,该机制满足个体理性、激励相容性和(正)预算平衡性,但社会福利或分配效率会有一些的损失.个体理性和激励相容性能分别使得市场成员收益非负和不行使市场力,而(正)预算平衡性能保证系统运营商的收益非负,是市场持续运行的前提.为了能将福利或效率损失控制在一个有限范围,结合电力中长期市场双侧竞价仅允许申报“一价一量”的实际情形,提出了一个参考价设定的具体规则,即选取供需折线交点对应的价格(MCP)作为出清参考价 p_0 、并排除该交点对应的用电户或发电商作为中标(出清)成员.同时,该设定规则也能降低 RPCBV 机制近一半的计算量,有利于 RPCBV 机制的实际运用.理论分析和算例研究表明,该参考价设定规则不影响 RPCBV 机制的其他性质以及信息公开的要求,并能将福利损失控制在一个有限范围内,对于电力中长期市场的重复竞价具有可实施性.

本文研究还存在可改进方向.例如,尚未考虑电力中长期市场与现货市场的衔接模式,仅在中长期市场的角度进行交易机制设计.未来研究可从多时间尺度电力市场的交互出发,明确市场间信息披露机制,厘清单个市场的价格信号对其他时间尺度市场的影响机理,设计合理可靠的市场衔接机制,确保电力市场相互促进、协同发展.

参考文献:

- [1] 胡伟,姚文慧.能源区块链多交易主体博弈模型及阻塞管理.系统工程学报,2022,37(4):448-459.
Hu W, Yao W H. Game modeling for multiple trading parties and congestion management in energy blockchains. Journal of Systems Engineering, 2022, 37(4): 448-459. (in Chinese)
- [2] 和识之,何翔路,娄素华,等.南方(以广东起步)电力现货市场“月结算”试运行关键监测指标及市场力分析.电网技术,2023,47(1):175-185.
He S Z, He X L, Lou S H, et al. Key monitoring indicators and market power analysis in “monthly settlement” trial operation of southern China electricity spot market (starting with Guangdong Province). Power System Technology, 2023, 47(1): 175-185. (in Chinese)
- [3] 贾俊秀,赵学科.政府补贴下新能源汽车供应链电池续航能力及回收策略.系统工程学报,2022,37(3):330-343.
Jia J X, Zhao X K. Battery endurance and recycling strategies of a new energy vehicle supply chain under government subsidies. Journal of Systems Engineering, 2022, 37(3): 330-343. (in Chinese)
- [4] 张增凯,彭彬彬,解伟,等.能源转型与管理领域的科学研究问题.管理科学学报,2021,24(8):147-153.
Zhang Z K, Peng B B, Xie W, et al. Scientific research issues in the field of energy transition and management. Journal of Management Sciences in China, 2021, 24(8): 147-153. (in Chinese)
- [5] 程海花,杨辰星,刘硕,等.基于路径组合计及ATC的省间中长期交易优化出清和系统研发.电网技术,2022,46(12):4762-4774.
Cheng H H, Yang C X, Liu S, et al. Optimization clearing and system development of inter-provincial medium and long term trade considering ATC base on path combination. Power System Technology, 2022, 46(12): 4762-4774. (in Chinese)
- [6] 刘贞,任玉珑,王恩创,等.基于双边合同二次交易的高低匹配竞价机制 Swarm 仿真.电力系统自动化,2007,31(18):26-29.
Liu Z, Ren Y L, Wang E C, et al. Swarm simulation on high-low matching auction mechanism based on secondary trade of bilateral contract. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 26-29. (in Chinese)
- [7] 李庚银,杨建华,周明,等.MCP机制下考虑供需弹性的发电容量持留.电力系统及其自动化学报,2008,20(5):35-39.
Li G Y, Yang J H, Zhou M, et al. Generator capacity withholding considering supply and demand elasticity under marginal clearing price. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2008, 20(5): 35-39. (in Chinese)

- [8] 蒲勇健. 发电商古诺博弈下差价合约的市场力抑制效应. 系统工程学报, 2018, 33(6): 754–762.
Pu Y J, Market power inhibiting effects of contracts for difference under Cournot game of electricity producers, Journal of Systems Engineering, 2018, 33(6): 754–762. (in Chinese)
- [9] 陈青, 杨骏伟, 黄远明, 等. 国外电力市场中市场力监测与缓解机制综述. 南方电网技术, 2018, 12(12): 9–15.
Chen Q, Yang J W, Huang Y M, et al. Review on market power monitoring and mitigation mechanisms in foreign electricity markets. Southern Power System Technology, 2018, 12(12): 9–15. (in Chinese)
- [10] 张伟, 余杰文, 何超林, 等. 北美电力市场中市场力缓解措施综述. 广东电力, 2021, 34(4): 24–33.
Zhang W, Yu J W, He C L, et al. Overview of market power mitigation measures in north American electricity market, Guangdong Electric Power, 2021, 34(4): 24–33. (in Chinese)
- [11] 吴赐联, 林晶, 王健. 基于激励削弱与惩罚遏制的零售商串谋约束. 系统工程学报, 2022, 37(5): 689–700.
Wu C L, Lin J, Wang J. Retailer collusion constraint based on incentive weakening and punishment containment. Journal of Systems Engineering, 2022, 37(5): 689–700. (in Chinese)
- [12] Yang S, Peng D, Meng T, et al. On designing distributed auction mechanisms for wireless spectrum allocation. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2019, 18(9): 2129–2146.
- [13] Li W, Cheng X Z, Tian Z, et al. Truthful auction analysis and design in multiunit heterogenous spectrum markets with reserve prices. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2021, 7(1): 157–170.
- [14] 郑臻哲, 吴帆, 陈贵海. 多维度防策略性云带宽预留拍卖机制设计. 计算机学报, 2019, 42(4): 701–720.
Zheng Z Z, Wu F, Chen G H. On designing multi-dimensional strategy-proof auctions for distributed cloud bandwidth reservation. Chinese Journal of Computers, 2019, 42(4): 701–720. (in Chinese)
- [15] 常瑞, 赵勇, 胡二琴, 等. 关键词拍卖中广告位数的事前分析与优化研究. 系统工程学报, 2018, 33(2): 212–224.
Chang R, Zhao Y, Hu E Q, et al. Ex ante analysis and optimization research on the number of advertising slots in keyword auctions. Journal of Systems Engineering, 2018, 33(2): 212–224. (in Chinese)
- [16] Decarolis F, Goldmanis M, Penta A. Marketing agencies and collusive bidding in online ad auctions. Management Science, 2020, 66(10): 4433–4454.
- [17] Li R J, Nie Y, Liu X B. Pricing carpool rides based on schedule displacement. Transportation Science, 2020, 54(4): 1134–1152.
- [18] Exizidis L, Kazempour J, Papakonstantinou A, et al. Incentive-compatibility in a two-stage stochastic electricity market with high wind power penetration. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 2846–2858.
- [19] Tang W Y, Jain R. Aggregating correlated wind power with full surplus extraction. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6030–6038.
- [20] 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. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 7–17.
Wang J X, Zhong H W, Xia Q, et al. Competitive mechanism design in electricity market based on fair benefit allocation. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 7–17. (in Chinese)
- [21] Xu Y J, Low S H. An efficient and incentive compatible mechanism for wholesale electricity markets. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(1): 128–138.
- [22] AlAshery M K, Yi Z H, Shi D, et al. A blockchain-enabled multi-settlement quasi-ideal peer-to-peer trading framework. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(1): 885–896.
- [23] Fang X C, Guo H Y, Zhang X, et al. An efficient and incentive-compatible market design for energy storage participation. Applied Energy, 2022, 311: 118731.
- [24] Xu S, Zhao Y, Li Y Z, et al. Truthful double-auction mechanisms for peer-to-peer energy trading in a local market // 2021 IEEE Sustainable Power and Energy Conference, Nanjing: IEEE, 2021: 2458–2463.
- [25] Tran N H, Pham C, Nguyen M N H, et al. Incentivizing energy reduction for emergency demand response in multi-tenant mixed-use buildings. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 3701–3715.
- [26] Zhou Z, Liu F M, Chen S T, et al. A truthful and efficient incentive mechanism for demand response in green datacenters. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2020, 31(1): 1–15.
- [27] Myerson R B, Satterthwaite M A. Efficient mechanisms for bilateral trading. Journal of Economic Theory, 1983, 29(2): 265–281.

作者简介:

俞耀文 (1988—), 男, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 研究方向: 能源电力系统优化调度, Email: yaowen_yu@hust.edu.cn;

陆宏智 (1999—), 男, 广西桂林人, 硕士生, 研究方向: 电力市场及区块链应用, Email: hzlu@hust.edu.cn;
 赵勇 (1967—), 男, 湖北天门人, 博士, 教授, 研究方向: 决策理论与方法, Email: zhiwei98530@hust.edu.cn;
 黄成 (1991—), 女, 新疆伊犁人, 硕士, 工程师, 研究方向: 电力市场及经济分析, Email: huangc4@js.sgcc.com.cn.

附录

引理 1 的证明:

1) 当 $\sum_{i \in M} d_i(p_0) \leq \sum_{j \in N} s_j(p_0)$ 时, 根据 K-T 条件得 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 的最优解为 $\mathbf{q}^* = (q_i^{U^*} = d_i(p_0), i \in M; q_j^{G^*} = s_j(p^*), j \in N)$, 其中 p^* 满足 $\sum_{j \in N} s_j(p^*) = \sum_{i \in M} d_i(p_0)$; 而 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}')$ 的最优解不唯一, 其最优解集为 $Q^* = \{(q_i^{U^*} = d_i(p_0), i \in M; q_j^{G^*} \in [0, s_j(p_0)], j \in N) | \sum_{j \in N} q_j^{G^*} = \sum_{i \in M} d_i(p_0)\}$, 显然, $\mathbf{q}^* \in Q^*$, 因此 \mathbf{q}^* 是 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}')$ 的最优解.

此外, 由 K-T 条件还可得 $P2(\mathbf{d}', \mathbf{s})$ 的最优解 $\mathbf{q}^{**} = (q_i^{U^{**}} = d_i(p_0), i \in M; q_j^{G^{**}} = s_j(p^*), j \in N)$, 其中 p^* 满足 $\sum_{j \in N} s_j(p^*) = \sum_{i \in M} d_i(p_0)$. 显然, \mathbf{q}^* 也是 $P2(\mathbf{d}', \mathbf{s})$ 的最优解.

2) 当 $\sum_{i \in M} d_i(p_0) > \sum_{j \in N} s_j(p_0)$ 时, 同理可证. 证毕.

引理 2 的证明:

1) 当 $\sum_{i \in M} d_i(p_0) \leq \sum_{j \in N} s_j(p_0)$ 时, 根据 K-T 条件, $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 的最优解 $\mathbf{q}^* = (q_i^{U^*} = d_i(p_0), i \in M; q_j^{G^*} = s_j(p^*), j \in N)$, 其中 p^* 满足 $\sum_{j \in N} s_j(p^*) = \sum_{i \in M} d_i(p_0)$; 而 $P2((\tilde{d}_k, \mathbf{d}_{-k}), \mathbf{s})$ 的最优解 $\tilde{\mathbf{q}}^* = (\tilde{q}_k^{U^*} = \tilde{d}_k(p_0), \tilde{q}_i^{U^*} = d_i(p_0), i \in M \text{ 且 } i \neq k; \tilde{q}_j^{G^*} = s_j(p^*), j \in N)$, 其中 p^* 满足 $\sum_{j \in N} s_j(p^*) = \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} d_i(p_0) + \tilde{d}_k(p_0)$. 显然, 此时其他用电户的中标电量将保持不变.

2) 当 $\sum_{i \in M} d_i(p_0) > \sum_{j \in N} s_j(p_0)$, 且 $\sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} d_i(p_0) + \tilde{d}_k(p_0) \geq \sum_{j \in N} s_j(p_0)$ 时, 根据 K-T 条件, $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 的最优解 $\mathbf{q}^* = (q_i^{U^*} = d_i(p^*), i \in M; q_j^{G^*} = s_j(p_0), j \in N)$, 其中 p^* 满足 $\sum_{j \in N} s_j(p_0) = \sum_{i \in M} d_i(p^*)$; 而 $P2((\tilde{d}_k, \mathbf{d}_{-k}), \mathbf{s})$ 的最优解 $\tilde{\mathbf{q}}^* = (\tilde{q}_k^{U^*} = \tilde{d}_k(p^*), \tilde{q}_i^{U^*} = d_i(p^*), i \in M \text{ 且 } i \neq k; \tilde{q}_j^{G^*} = s_j(p_0), j \in N)$, 其中 p^* 满足 $\sum_{j \in N} s_j(p_0) = \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} d_i(p^*) + \tilde{d}_k(p^*)$.

假设 $p^{**} > p^*$, 则根据 $\tilde{d}_k(p) \leq d_k(p)$ 有 $\sum_{j \in N} s_j(p_0) = \sum_{i \in M} d_i(p^*) > \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} d_i(p^{**}) + \tilde{d}_k(p^{**}) = \sum_{j \in N} s_j(p_0)$, 于是产生矛盾, 因此可得 $p^{**} \leq p^*$. 再根据 $d_i(p) (\forall i \in M \text{ 且 } i \neq k)$ 的单调性有 $d_i(p^{**}) \geq d_i(p^*)$ 或 $\tilde{q}_i^{U^*} \geq q_i^{U^*}$, 即其他用电户在用用户 k 申报 \tilde{d}_k 时的中標电量不小于 k 申报 d_k 时的中標电量.

3) 当 $\sum_{i \in M} d_i(p_0) > \sum_{j \in N} s_j(p_0)$, 且 $\sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} d_i(p_0) + \tilde{d}_k(p_0) < \sum_{j \in N} s_j(p_0)$ 时, 根据 K-T 条件, $P2((\tilde{d}_k, \mathbf{d}_{-k}), \mathbf{s})$ 的最优解 $\tilde{\mathbf{q}}^* = (\tilde{q}_k^{U^*} = \tilde{d}_k(p_0), \tilde{q}_i^{U^*} = d_i(p_0), i \in M \text{ 且 } i \neq k; \tilde{q}_j^{G^*} = s_j(p^*), j \in N)$, 其中 p^* 满足 $\sum_{j \in N} s_j(p^*) = \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} d_i(p_0) + \tilde{d}_k(p_0)$. 再由前述 2) 的证明过程可知 $\forall i \in M \text{ 且 } i \neq k$ 有 $q_i^{U^*} = d_i(p^*)$, 且 $p^* > p_0$. 因此, 由 d_i 的单调性得 $q_i^{U^*} = d_i(p_0) \geq d_i(p^*) = q_i^{U^*}$. 证毕.

命题 1 的证明:

根据引理 1, 给定参考价 p_0 和市场成员申报的供需函数时, $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s})$ 的最优解 \mathbf{q}^* 也是 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}')$ 的最优解. 于是, 根据式 (14), RPCBV 机制下用电户 $k \in M$ 的收益:

$$\begin{aligned} \pi_k(d_k) &= \int_0^{q_k^{U^*}} \hat{v}_k(x) dx - \left[\int_0^{q_k^{U^*}} v_k(x) dx - (F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}') - F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}')) \right] \\ &= \int_0^{q_k^{U^*}} \hat{v}_k(x) dx - \left[\int_0^{q_k^{U^*}} v_k(x) dx - \left(\sum_{i \in M} \int_0^{q_i^{U^*}} v_i(x) dx - \sum_{j \in N} \int_0^{q_j^{G^*}} c'_j(x) dx \right) + F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}') \right] \quad (17) \\ &= \int_0^{q_k^{U^*}} \hat{v}_k(x) dx + \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} \int_0^{q_i^{U^*}} v_i(x) dx - \sum_{j \in N} \int_0^{q_j^{G^*}} p_0 dx - F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}'). \end{aligned}$$

下面, 分 $d_k(p_0) \leq \hat{d}_k(p_0)$ 和 $d_k(p_0) > \hat{d}_k(p_0)$ 两种情况讨论用电户 k 申报 $\hat{d}_k(p)$ 还是 $d_k(p)$ 时可以获得更大的利益.

1) 当 $d_k(p_0) \leq \hat{d}_k(p_0)$ 时, $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}')$ 的可行域包含于 $P2((\hat{d}_k, \mathbf{d}_{-k}), \mathbf{s}')$ 的可行域之中, 所以 $P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}')$ 的最优解 \mathbf{q}^* 必然是 $P2((\hat{d}_k, \mathbf{d}_{-k}), \mathbf{s}')$ 的一个可行解. 设 $\hat{\mathbf{q}}^* = (\hat{q}_i^{U^*}, i \in M; \hat{q}_j^{G^*}, j \in N)$ 为 $P2((\hat{d}_k, \mathbf{d}_{-k}), \mathbf{s}')$ 的最优解, 那么用电户 k 申报 \hat{d}_k 时

能获得的收益为

$$\begin{aligned}
\pi_k(\hat{d}_k) &= \int_0^{\hat{q}_k^{U^*}} \hat{v}_k(x) dx + \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} \int_0^{\hat{q}_i^{U^*}} v_i(x) dx - \sum_{j \in N} \int_0^{\hat{q}_j^{G^*}} p_0 dx - F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}') \\
&= F^{\max}((\hat{d}_k, \mathbf{d}_{-k}), \mathbf{s}') - F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}') \\
&\geq F((\hat{d}_k, \mathbf{d}_{-k}), \mathbf{s}')|_{\hat{q}^* = q^*} - F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}') \\
&= \int_0^{\hat{q}_k^{U^*}} \hat{v}_k(x) dx + \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} \int_0^{\hat{q}_i^{U^*}} v_i(x) dx - \sum_{j \in N} \int_0^{\hat{q}_j^{G^*}} p_0 dx - F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}') \\
&= \pi_k(d_k).
\end{aligned} \tag{18}$$

2) 当 $d_k(p_0) > \hat{d}_k(p_0)$ 时, 取 $p^\#$ 满足 $d_k(p^\#) = \hat{d}_k(p_0)$, 并构造辅助函数 $\tilde{d}_k(p)$: $\tilde{d}_k(p) = d_k(p^\#) = \hat{d}_k(p_0)$, $p \in [0, p^\#]$; $\tilde{d}_k(p) = d_k(p)$, $p \in (p^\#, +\infty)$. 显然, $(p_0, d_k(p_0))$ 和 $(p^\#, d_k(p_0))$ 是 d_k 上的两点, 且有 $p_0 < p^\#$ 和 $\tilde{d}_k(p_0) = \hat{d}_k(p_0)$, 这意味着 \tilde{d}_k 满足上述 1) 中的条件 ($d_k(p_0) \leq \hat{d}_k(p_0)$), 因此有 $\pi_k(\hat{d}_k) \geq \pi_k(\tilde{d}_k)$, 且用电户 k 申报 \tilde{d}_k 时能获得的收益

$$\pi_k(\tilde{d}_k) = \int_0^{\tilde{q}_k^{U^*}} \hat{v}_k(x) dx + \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} \int_0^{\tilde{q}_i^{U^*}} v_i(x) dx - \sum_{j \in N} \int_0^{\tilde{q}_j^{G^*}} p_0 dx - F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}'). \tag{19}$$

另外, 若 P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}) 的最优解 q^* 中 $q_k^{U^*} < \hat{d}_k(p_0) (= \tilde{d}_k(p_0) < d_k(p_0))$, 这意味着 P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}) 中的约束条件 $q_k^U \leq d_k(p_0)$ 和 P2($(\hat{d}_k, \mathbf{d}_{-k}), \mathbf{s}$) 中的约束条件 $\tilde{q}_k^U \leq \tilde{d}_k(p_0)$ 均为无效约束, 那么根据 K-T 条件可知 P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}) 与 $q_k^U \leq d_k(p_0)$ 和 P2($(\hat{d}_k, \mathbf{d}_{-k}), \mathbf{s}$) 的最优解相同, 于是 $\pi_k(d_k) = \pi_k(\tilde{d}_k)$. 下面, 考虑 $q_k^{U^*} \geq \hat{d}_k(p_0)$ 的情况.

根据引理 2, 此时 $\forall i \in M$ 且 $i \neq k$, $\tilde{q}_i^{U^*} \geq q_i^{U^*}$, 且对于用电户 k 有 $\tilde{q}_k^{U^*} = \hat{d}_k(p_0) \leq q_k^{U^*}$. 因为 \hat{d}_k 是单调递减的, 所以 $\hat{v}_k(x) \leq p_0$, $x \in [\hat{d}_k(p_0), q_k^{U^*}] = [\tilde{q}_k^{U^*}, q_k^{U^*}]$. 此外, 根据 P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}) 的约束条件 (10) 可知, 对于任一中标的用电户, 其需求量不超过中标电量时的报价不低于 p_0 , 即 $\forall i \in M$ 且 $\tilde{q}_i^{U^*} > 0$ 有 $v_i(x) \geq p_0$, $x \in [0, \tilde{q}_i^{U^*}]$. 于是

$$\begin{aligned}
\pi_k(d_k) - \pi_k(\tilde{d}_k) &= \int_{\tilde{q}_k^{U^*}}^{q_k^{U^*}} \hat{v}_k(x) dx - \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} \int_{\tilde{q}_i^{U^*}}^{q_i^{U^*}} v_i(x) dx + p_0 \sum_{j \in N} (\tilde{q}_j^{G^*} - q_j^{G^*}) \\
&\leq p_0 (q_k^{U^*} - \tilde{q}_k^{U^*}) - p_0 \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} (\tilde{q}_i^{U^*} - q_i^{U^*}) + p_0 \sum_{j \in N} (\tilde{q}_j^{G^*} - q_j^{G^*}) \\
&= p_0 \left[\left(q_k^{U^*} + \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} q_i^{U^*} - \sum_{j \in N} q_j^{G^*} \right) + \left(\sum_{j \in N} q_j^{G^*} - \tilde{q}_k^{U^*} - \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} \tilde{q}_i^{U^*} \right) \right] \\
&= 0.
\end{aligned} \tag{20}$$

因此, $\pi_k(\hat{d}_k) \geq \pi_k(\tilde{d}_k) \geq \pi_k(d_k)$. 综上所述, 诚实报价是所有用电户的占优策略.

同理可证, 诚实报价也是所有发电商的占优策略.

证毕.

命题 2 的证明:

由于 $F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}')$ 为 P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}') 的目标函数最优值, 而 $F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}')$ 为 P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}') 中添加约束条件 $q_k^U = 0$ 后求得的目标函数最优值, 显然有 $F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}') \geq F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}')$. 命题 1 已经证明诚实报价是所有市场成员的最优选择, 此时用电户 k 的收益

$$\begin{aligned}
\pi_k(\hat{d}_k) &= \int_0^{\hat{q}_k^{U^*}} \hat{v}_k(x) dx - \left[\int_0^{\hat{q}_k^{U^*}} \hat{v}_k(x) dx - \left(F^{\max}((\hat{d}_k, \mathbf{d}_{-k}), \mathbf{s}') - F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}') \right) \right] \\
&= F^{\max}((\hat{d}_k, \mathbf{d}_{-k}), \mathbf{s}') - F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}') \\
&\geq 0.
\end{aligned} \tag{21}$$

同理可证, 选择最佳报价策略 (即诚实报价) 时发电商 l 的收益 $\pi_l(\hat{s}_l)$ 也是非负的.

证毕.

命题 3 的证明:

根据引理 1 和 2, $\forall i \in M$ 且 $i \neq k$, P2($\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}'$) 的最优解 q^{U^*} 中 $q_i^{U^*} \geq q_i^{U^*}$; 再根据 P2(\mathbf{d}, \mathbf{s}) 的约束条件 (10), $\forall i \in M$ 且 $q_i^{U^*} > 0$ 有 $v_i(x) \geq p_0$, $x \in [0, q_i^{U^*}]$. 另外, $\forall j \in N$ 有 $c_j'(x) = p_0$, $x \in [0, s_j(p_0)]$; 而根据约束条件 (11), 有 $q_j^{G^*} \leq s_j(p_0)$ 和 $q_j^{G^*} \leq s_j(p_0)$. 于是, 根据式 (12), 用电户 k 需要支付的费用

$$\begin{aligned}
W_k^U &= \int_0^{q_k^{U^*}} v_k(x) dx - (F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}') - F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}')) \\
&= \int_0^{q_k^{U^*}} v_k(x) dx - \left[\left(\sum_{i \in M} \int_0^{q_i^{U^*}} v_i(x) dx - \sum_{j \in N} \int_0^{q_j^{G^*}} c'_j(x) dx \right) - \left(\sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} \int_0^{q_i^{U^*}} v_i(x) dx - \sum_{j \in N} \int_0^{q_j^{G^*}} c'_j(x) dx \right) \right] \\
&= \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} \int_0^{q_i^{U^*}} v_i(x) dx + \sum_{j \in N} \int_{q_{g,j}^{G^*}}^{q_j^{G^*}} p_0 dx \\
&\geq p_0 \left[\left(\sum_{j \in N} q_j^{G^*} - \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} q_i^{U^*} \right) + \left(\sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} q_i^{U^*} - \sum_{j \in N} q_j^{G^*} \right) \right] \\
&= p_0 q_k^{U^*}. \tag{22}
\end{aligned}$$

同理可证, 发电商 $l \in N$ 的收入 $W_l^G \leq p_0 q_l^{G^*}$. 所以, $\sum_{i \in M} W_i^U \geq p_0 \sum_{i \in M} q_i^{U^*} = p_0 \sum_{j \in N} q_j^{G^*} \geq \sum_{j \in N} W_j^G$, 即用电户和发电商间的交易满足(正)预算平衡. 证毕.

命题 4 的证明:

设有 2 个用电户和 2 个发电商参与交易, 其供给量或需求量均为 1 单位. 用电户 1、用电户 2 的真实价格分别为 10 元、8 元, 而发电商 1、发电商 2 的真实价格分别为 3 元、6 元. 出清时, 易知 $p_0 = (8 + 6)/2 = 7$ 元 (这里取边际用电户和边际发电商的报价平均值作为供需曲线交点价格), 有效分配为所有市场成员均中标 1 单位电量. 结算时, 以用电户 2 为例, 将发电商 1、发电商 2 的报价调整为 7 元, 然后计算其支付. 若用电户 2 参与交易, 有效分配仍然为所有市场成员均中标 1 单位电量, 社会福利为 $10 + 8 - 7 - 7 = 4$ 元; 若其不参与交易, 有效分配为发电商 1 将 1 单位电量出售给用电户 1, 社会福利为 $10 - 7 = 3$ 元, 那么根据 RPCBV 机制的结算规则, 用电户 2 的支付为 $8 - (4 - 3) = 7$ 元.

由于 p_0 的设定规则为共同知识, 所以用电户 2 如果能事先知道发电商的报价信息, 可将其报价调整为 6 元, 此时 $p_0 = (6 + 6)/2 = 6$ 元. 重复上面计算过程, 易得用电户 2 仍然中标 1 单位电量, 但支付为 6 元 < 7 元. 可见, 诚实报价不是用电户 2 的最优选择. 究其原因, p_0 的设定与市场成员当前申报的信息有关, 因此成员有动机谎报价格来操纵以谋取利益. 证毕.

命题 5 的证明:

下面仅需证明激励相容性, 而个体理性和(正)预算平衡性与命题 2 和命题 3 中的证明相同(略).

假设电力中长期市场规则要求每个市场成员仅能申报“一价一量”, 而 m 个用电户和 n 个发电商申报的真实需求信息和真实供给信息、以及参考价 p_0 的设定如图 3 所示. 下面, 分析市场成员的偏离情况.

首先分析任一用电户 k 的偏离情况. 在用电户 k 不参与报价时, 设 $q_{i,-k}^{U^*}$ 为其他任一用电户 $i \in M$ 且 $i \neq k$ 的中标电量, $q_{j,-k}^{G^*}$ 为任一发电商 $j \in N$ 的中标电量. 根据(14), 该用电户 k 的支付可计算为

$$\begin{aligned}
W_k^U &= v_k q_k^{U^*} - (F^{\max}(\mathbf{d}, \mathbf{s}') - F^{\max}(\mathbf{d}_{-k}, \mathbf{s}')) \\
&= v_k q_k^{U^*} - \left[\left(\sum_{i \in M} v_i q_i^{U^*} - \sum_{j \in N} p_0 q_j^{G^*} \right) - \left(\sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} v_i q_{i,-k}^{U^*} - \sum_{j \in N} p_0 q_{j,-k}^{G^*} \right) \right] \\
&= v_k q_k^{U^*} - \left[\left(\sum_{i \in M} v_i q_i^{U^*} - p_0 \sum_{j \in N} q_j^{G^*} \right) - \left(\sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} v_i q_{i,-k}^{U^*} - p_0 \sum_{j \in N} q_{j,-k}^{G^*} \right) \right] \\
&= v_k q_k^{U^*} - \left[\left(\sum_{i \in M} v_i q_i^{U^*} - p_0 \sum_{i \in M} q_i^{U^*} \right) - \left(\sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} v_i q_{i,-k}^{U^*} - p_0 \sum_{i \in M \text{ 且 } i \neq k} q_{i,-k}^{U^*} \right) \right] \\
&= v_k q_k^{U^*} - v_k q_k^{U^*} + p_0 q_k^{U^*} \\
&= p_0 q_k^{U^*}. \tag{23}
\end{aligned}$$

以上第 4 个等式利用了供需平衡关系, 第 5 个等式利用 RPCBV 机制下采用调整后的供给曲线 \mathbf{s}' 时 $q_i^{U^*} = q_{i,-k}^{U^*}, \forall i \in M$ 且 $i \neq k$ 的特殊关系. 式(23)表明用电户 k 的支付价格正好是参考价 p_0 , 这在算例分析的表 3 中也能观察到.

那么, 此时用电户 k 以参考价作为单价进行结算, 此时用电户中标时的收益为

$$\pi_k(\hat{d}_k) = \hat{v}_k q_k^{U^*} - p_0 q_k^{U^*} = (\hat{v}_k - p_0) q_k^{U^*}, \tag{24}$$

若用电户 k 偏离其真实需求价格报价, 需根据其在出清中的不同位置考虑:

1) 若用电户 k 为用电户 α (见图 3), 则 $\hat{v}_k = p_0$ 且 $q_k^{U^*} = 0$, 此时其收益 $\pi_k(\hat{d}_k) = 0$. 如果用电户 α 向下偏离其真实需求价格 \hat{v}_k , 则其可能仍会处于边际价格或低于边际价格, 因此其仍会被踢出中标群而得不到任何好处. 如果用电户 α 向上偏离其真实价格 \hat{v}_k , 会导致两种可能结果: ① 参考价增大为 p_0^h , 用电户 α 可能仍为边际用电户而被踢出; 或用电户 α 中标且中标

电量为 $q_k^{U,h}$, 其收益为

$$\pi_k(d_k) = \hat{v}_k q_k^{U,h} - p_0^h q_k^{U,h} = (\hat{v}_k - p_0^h) q_k^{U,h} < 0, \tag{25}$$

那么其收益会下降. ② p_0 不变, 用电户 α 中标, 其收益仍为 0. 因此, 用电户 α 不会偏离其真实需求价格.

2) 若用电户 k 为中标用电户群中的任一用电户 β , 则 $\hat{v}_k > p_0$ 且 $q_k^{U*} > 0$, 此时其收益 $\pi_k(\hat{d}_k) > 0$. 如果用电户 β 向下偏离其真实需求价格, 那么会导致两种可能结果: ① 偏离价 v_k 低于 p_0 , 则 β 会被踢出中标群而得不到任何收益, 相比于真实报价其收益下降. ② 偏离价 v_k 高于 p_0 , 此时出清参考价保持不变, 根据 RPCBV 机制的结算规则, β 的结算支付不变, 相比于真实报价其收益不变. 如果用电户 β 向上偏离其真实价格, 那么该用电户仍然会中标, 且结算支付不变. 因此, 用电户 β 不会偏离其真实需求价格.

3) 若用电户 k 为未中标用电户群中的任一用电户 γ , 则 $\hat{v}_k < p_0$ 且 $q_k^{U*} = 0$, 此时其收益 $\pi_k(\hat{d}_k) = 0$. 如果向下偏离其真实需求价格, 那么其仍然不会中标, 其收益不会改变. 如果向上偏离其真实需求价格, 其仍可能不中标; 或中标且中标电量为 $q_k^{U,h'}$, 参考价变为 $p_0^{h'}$ 且 $p_0^{h'} \geq p_0$, 那么其收益为

$$\pi_k(d_k) = \hat{v}_k q_k^{U,h'} - p_0^{h'} q_k^{U,h'} = (\hat{v}_k - p_0^{h'}) q_k^{U,h'} < 0, \tag{26}$$

那么其收益会下降. 因此, 用电户 γ 也不会偏离其真实需求价格.

上述 p_0 的设定只与用电户申报的需求信息有关, 而与发电商申报的供给信息无关. 或者说, 对发电商而言, p_0 的设定满足事前难以预测或操纵的要求. 因此, 任何发电商都不会偏离其真实供给价格.

综上所述, RPCBV-MCP 机制满足激励相容性.

证毕.

2025年《系统工程学报》评审专家名单 (排名不分先后)

李 波	陈萍萍	胡文婕	陈敬贤	林 强	游家兴	李登峰	朱书尚	张雪花	席运江	王志宏	谷 丽
何 桢	周翠华	李宗平	蔡子功	王 宇	郑江波	艾兴政	高金伍	牛 奔	钟军委	王一雷	方匡南
熊 熊	宋振东	许格妮	车阿大	胡贝贝	徐 娟	李 果	韩曙光	牛英杰	刘炳胜	赵 宁	张 强
马军海	李志国	周 驰	李 楠	夏西强	吴 冲	王 鹏	胡林敏	姜彩楼	顾东晓	张 震	王 璟
孙晓晨	蒋忠中	张跃军	杨国庆	刘 勇	许海平	但 斌	王能民	张 蓓	许启发	迟国泰	张继红
吴文清	方 新	王国利	方国昌	杜运周	王国成	吴 江	朱庆华	郑江淮	郭军华	张 玲	朱 磊
张永杰	田 妮	李 政	王浩宇	郝兆伟	张 珩	李 丁	甄学平	柯 青	邹 鑫	严洪森	李 新
张建雄	赵泉午	孙 洁	韩先锋	刘德海	张钟文	肖 辉	宁薛平	李昊骅	赵军产	李文权	贾 斌
兰燕飞	卢继周	吴 鹏	陈永成	汪旭晖	吴文青	司书宾	张亚京	牛文举	王纲金	薛巍立	郎茂祥
郭均鹏	夏南新	刘 斌	金 亮	倪得兵	魏云捷	王 鹏	翟庆庆	李仲飞	周鸿卫	朱冬梅	蒋永雷
刘伟华	丁琳琳	曹 健	罗春林	李 奕	陈凯华	孙少龙	范美婷	黎继子	王 迪	邱若臻	辛春林
解百臣	张 明	夏唐斌	谭英贤	郝 宇	叶五一	郑冠群	刘建国	林智平	崔春生	付 俊	谢法琪
陈卫东	李玉鹏	孟令鹏	熊剑芳	卢全莹	苟清龙	柴 建	周军杰	喻登科	魏 杰	李 斌	衣博文
高举红	黄 钧	卞亦文	熊 强	张 文	吴 杰	贾俊秀	王玉燕	林晓伟	丁晶晶	汪恭书	喻雪莹
林 强	胡 毅	魏 航	曹 彬	董雪璠	赵树然	杨善学	李保勇	朱翼隼	姜元春	肖伯文	刘天亮
张水波	廉 莹	赵明霞	李 平	陈水霞	郭海湘	王仁祥	吴盼玉	田立新	钱晓飞	李凤羽	王 晶
王钟彬	孙 琦	马树萍	周 品	王 永	李枝勇	邹镇涛	丁荣贵	李文鹤	贾君君	王江涛	李胜利
许叶军	聂佳佳	许永洪	徐 和	黄承峰	王海宇	范如国	刘鲁浩	梅 强	杨 敏	梁德翠	张成堂
朱 宁	石宝峰	计国君	俞耀文	刘名武	翟运开	邵 帅	张 博	杨成荣	徐 涛	晏 伟	龚本刚
张世晨	李大垒	宋士吉	左文明	伊辉勇	鲁其辉	刘 亮	王 毅	刘志学	惠晓峰	冯 薇	张云丰
赵建国	洪兆富	卫 强	王小燕	周愉峰	王江峰	马亚明	武康平	赵林海	张晓飞	罗 政	赵宇哲
石 平	刘爱军	周南南	宋珠珠	姚 潇	吴 堪	苑 楠	谢小磊	陈有华	宫诚举	王建军	王安宇
钱存华	李超凡	马德青	肖 皓	贾晓菁	史金召	张书华	刘 杰	李志宏	郭兴海	吕一博	李 琳
刘 颖	周兴建	李贵萍	李 杰	张鹏东	郭慧婷	唐应辉	陈孝伟	朱桂龙	陈宇宁	胡祥培	朱 鹏
孟 斌	蔡学媛	李勇建	高 洋	王 杉	刘兰剑	邓国营	侯棚文	牛保庄	张发明	李先能	莫 栋
范体军	戴 宾	屈绍建	林晓刚	李 兵	杨 红	梁海明	赖向京	徐维军	曹兵兵	孙秀峰	赖邵永
王亚东	许明辉	汪建均	刘冬宁	李 海	官振中	郭海男	巩在武	杨 磊	曾 鹏	金 淳	余东升
朱福敏	杨 冕	周小虎	张新生	孟凡永	刘 盾	周茂森	程明宝	吴贤毅	贺 勇	刘家国	叶阿忠
李 军	尤建新	赵旭峰	刘庆富	杜 瑶							