

广东电力现货市场环境下的需求响应交易机制设计

关玉衡¹,何宇俊²,肖云鹏¹,蔡秋娜¹,陈启鑫²

(1. 广东电网有限责任公司 电力调度控制中心,广州 510699;2. 清华大学 电机系 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室,北京 100084)

Design of demand response trading mechanism under Guangdong spot energy market environment

GUAN Yuheng¹, HE Yujun², XIAO Yunpeng¹, CAI Qiuna¹, CHEN Qixin²

(1. Guangdong Power Dispatch and Control Center, Guangzhou 510699, China; 2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, EE Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

摘要:随着用户侧市场的放开,用市场化的需求响应交易代替传统的电力需求侧管理已成为电力市场的发展趋势,包括广东在内的国内许多省市相继开展了需求响应的市场化交易实践活动。首先,介绍了广东省需求响应市场化交易的启动条件、交易流程、测量方式和资金来源等要素;然后,提出了需求侧市场主体与发电机组同台竞价的出清模式与价格机制,重点分析了2次出清模式在需求响应参与现货市场中的作用;最后,通过市场算例验证了不同出清机制的优劣和对市场主体的影响。

关键词:现货市场;需求响应;负荷聚合商;市场出清机制;价格机制

Abstract: With the deregulation of demand-side market, the marketization of demand response (DR) instead of the conventional power demand-side management is becoming a trend under the background of power market reform. A series of provinces and cities including Guangdong have implemented the market trade programs of DR. The Guangdong DR program's elements are introduced including start-up condition, trading process, measurement approach and financial source, etc. Then, the market clearing mode and price mechanism for the bidding on the same platform of DR market actors and generators are proposed, and the role of two clearing modes in DR's participation in spot market is analyzed. Finally, the advantages and disadvantages of different clearing mechanisms and their impact on market actors are verified by market simulations.

Key words: spot market; demand response; load aggregator; market clearing mechanism; pricing mechanism

0 引言

需求响应(demand response, DR)指用户根据价格信号或激励手段改变既定用电计划的行为。随着用户侧市场的放开,以需求响应交易代替电力需求侧管理已成为电力市场的发展趋势^[1]。国外需求响应的市场化实施已经开展了相当长时间,对我国需求响应机制设计具有一定的启示^[2]。美国PJM市场中,用户可由削减服务提供商(curtailement service providers, CSP)代理的方式参与需求响应项目。PJM市场提供紧急型和经济型需求响应,并基于联合优化出清价格为CSP等市场主体提供补偿^[3]。澳大利亚能源市场运营商2013年已将需求响应纳入了电力零售市场,2020年又设计了需求响应参与电力批发市场的框架,并将于2021年10月在澳大利

亚国家电力市场正式实施^[4]。在国内,随着售电侧改革的推进,目前浙江、山东、广东等省份都相继出台了需求响应实施方案,从而推动需求侧资源参与市场交易,缓解电力供需矛盾和保障电网的安全稳定运行^[5]。近年来,更有学者提出诸如虚拟电厂^[6-7]、可交易能源系统^[8]、需求侧能量共享^[9]、第三方主体参与调峰^[10]等新型的需求侧市场化运营模式。

广东省电力负荷具有峰谷差大、负荷波动剧烈的特点,满足电力供需的动态平衡一直是广东电网电力调度的一大难题。广东省的电力用户具有相当可观的调节潜力^[11],需要有效的市场机制去引导利用。广东省现货市场在现阶段对用户侧采用报量不报价的参与方式^[12],通过日前市场出清价格引导用户需求弹性,是一种被动的用户响应方式。随着广东省现货市场的建设,市场主体逐步壮大,使需求响应可以主动参与市场竞价^[13]。从目前的电力市场建设来看,广东省现货市场环境下的需求响应机制无论是与国外成熟的现货市场,还是与山

收稿日期:2021-06-18;修回日期:2021-09-15

基金项目:广东省重点领域研发项目(2019B111109002);广东电网有限责任公司科技项目(036000KK52180031)

东、浙江等电力市场中的需求侧竞价机制相比,均有所不同。本文介绍了广东现货市场环境下需求响应交易的组织机制,提出并分析了需求响应与发电机组同台竞价的出清模式与定价机制,并通过实际算例分析市场主体的市场行为和影响,以期广东省需求响应的市场化实施提供具体的思路。

1 广东省需求响应市场化交易机制

1.1 需求响应的交易品种

需求响应按照响应类型可分为削峰需求响应和填谷需求响应;按照交易时序可分为日前需求响应和日内需求响应,并分别与现货市场联合出清。

1.2 需求响应的启动条件

需求响应的启动可以采用紧急情况 and 常态化参与现货市场2种方式进行。

在市场初期采用紧急情况启动。紧急情况包括因电网备用容量不足等导致电力供应缺口或当火电机组出力达最小技术出力仍不能匹配负荷需求时,满足启动条件则启动需求响应。

1.3 需求响应的交易流程

需求侧市场主体包括大用户和需求响应代理商。日前需求响应与日前现货市场协同出清,其交易流程如图1所示。

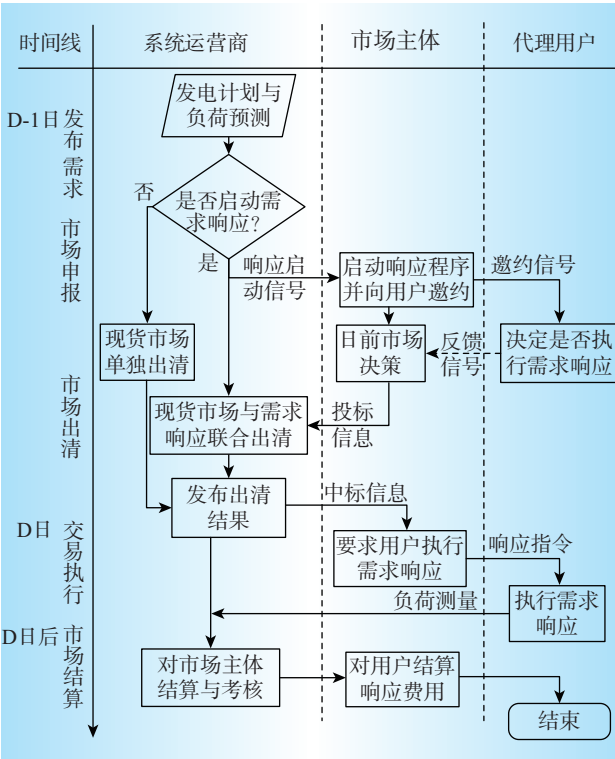


图1 日前需求响应交易组织流程图

Fig. 1 Flowchart of day-ahead DR transaction

(1) 发布阶段。在运行日前一(D-1日),当

系统运营机构预测到电力供应缺口时,需要决定是否启动需求响应,并向需求侧市场主体发布需求响应信息,包含需求时段、需求地区预测等。

(2) 申报阶段。需求侧市场主体在收到发布信息后,需要向系统运营商申报响应价格和响应容量。需求响应的代理商也会同时向代理用户发出邀约响应信号。代理商可根据用户反馈的响应能力进行市场投标方案的决策。需求侧市场主体采用分段报量报价的方式,最多可以分2段,报价曲线随响应量增加单调递增。

(3) 出清阶段。系统运营商对现货市场与需求响应联合优化出清,并公布出清结果,包括各时段响应容量、响应时段和出清价格等,然后向各市场主体发送中标响应容量和响应时段等。

(4) 执行阶段。运行日(D日),需求侧市场主体按照中标结果在约定的时段执行需求响应,其中大用户直接执行,代理商向代理用户发送响应执行信号。

(5) 结算阶段。响应结束后,系统运营商基于用户的响应执行情况,按照需求响应出清价格对市场主体结算。当响应存在偏差时,系统运营商会市场主体进行偏差考核,而代理商是否对代理用户考核取决于响应合同的约定方式。

1.4 需求响应的测量方式

需求响应负荷为基线负荷与实际测量负荷之差,按小时统计。基线负荷指未实施需求响应时用户的用电负荷,作为判定需求响应执行效果的依据。基线负荷一般采用过去同类型日期负荷曲线的平均值来确定。对于储能等类型负荷,可以直接采用计量负荷作为响应负荷。

1.5 需求响应的资金来源

削峰需求响应的各时段总收益由该时段需求地区市场用户用电量进行分摊;填谷需求响应参照“两个细则”深度调峰价格进行补偿,由发电侧按该时段上网电量比例分摊。

2 广东省需求响应的出清与定价机制

2.1 基于现货市场的需求响应出清模式

在广东省需求响应机制设计中,需求响应不仅作为可竞价的交易品种,而且作为“虚拟发电”与发电机组同平台竞价,与现货市场联合优化出清。需求响应可能采取的出清模式如下。

2.1.1 自主竞价模式

在自主竞价模式下,用户可以申报“量-价”曲线,包括各时段可响应容量和对应的价格。需求响

应用户与其他机组具有相等地位,在美国 PJM 等成熟的现货市场中长期采用这种模式。

自主竞价模式赋予需求侧市场主体较大的自主性,当需求侧成为边际机组时,也使其具有了现货市场的定价权利。但由于需求侧并不像发电机组一样有真实的物理成本,因此需求侧市场主体更可能通过抬高市场价格的方式获得额外利润,并影响其他发电机组的收益。

2.1.2 价格接受者模式

在价格接受者模式下,需求侧市场主体没有定价权,而是作为价格接受者。在实际模型中可将需求响应用户视为计划机组并优先出清。

价格接受者模式能够保证需求侧市场主体以最大容量中标,并且不会影响发电侧市场价格。然而这种模式剥夺了需求侧的报价权利,使得需求侧主动参与现货市场的积极性降低。

2.1.3 2次出清模式

综合以上思路,在广东省现货市场的需求响应交易机制设计中,提出了2次出清模式,即首先由需求侧与发电机组联合优化出清,得到需求侧联合优化的市场出清价格;然后基于需求侧中标结果修改负荷侧的边界条件,并再次对发电机组出清,得到仅包含发电机组优化的市场出清价格。因此,2次出清模式实现了需求侧与发电机组的分别定价。

2.2 2次出清模式的市场出清模型

2次出清模式中,首先要求解包含需求侧竞价的安全约束机组组合(security-constrained unit commitment, SCUC)问题。SCUC问题目标函数如式(1)所示

$$\min \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} [C_{i,t}^g(P_{i,t}^g) + C_{i,t}^u] + \sum_{j=1}^{N_r} C_{j,t}^r(P_{j,t}^r) \right\} \quad (1)$$

式中: T 为总时段数; N_g 为发电机组总台数; N_r 为需求侧参与主体数; $P_{i,t}^g$ 和 $P_{j,t}^r$ 分别为发电机组与需求侧响应出力; $C_{i,t}^g(P_{i,t}^g)$ 和 $C_{i,t}^u$ 分别为发电机组的运行费用和启动费用; $C_{j,t}^r(P_{j,t}^r)$ 为需求响应费用,其中机组运行费用 $C_{i,t}^g(P_{i,t}^g)$ 和需求响应费用 $C_{j,t}^r(P_{j,t}^r)$ 都是机组或需求侧申报的各段出力区间内电价的分段线性函数,具体表达式如式(2)、式(3)所示

$$C_{i,t}^g(P_{i,t}^g) = \sum_{m=1}^{M_g} c_{i,t,m}^g P_{i,t,m}^g \quad (2)$$

$$C_{j,t}^r(P_{j,t}^r) = \sum_{m=1}^{M_r} c_{i,t,m}^r P_{i,t,m}^r \quad (3)$$

式中: $c_{i,t,m}^g$ 和 $P_{i,t,m}^g$ 、 $c_{i,t,m}^r$ 和 $P_{i,t,m}^r$ 分别为发电机组和需求侧主体 i 在 t 时刻第 m 段的报价和出力; M_g 和

M_r 分别为发电机组和需求侧主体的最大报价段数。

系统负荷平衡约束如式(4)所示

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t}^g + \sum_{j=1}^{N_r} P_{j,t}^r = D_t \quad (\lambda_t^p) \quad (4)$$

式中: D_t 为时段 t 系统负荷减去其他外省联络线的净流入功率; λ_t^p 为拉格朗日乘子,其物理意义为现货市场的电能量价格(不含阻塞情况下)。

现货市场出清中涉及的其他变量以及约束条件未全部列出。

在第一次出清后,重新基于需求侧中标结果修正相应母线节点的负荷预测曲线并对发电侧进行第二次出清,得到仅包含发电机组组合的 SCUC 模型目标函数如式(5)所示

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} [C_{i,t}^g(P_{i,t}^g) + C_{i,t}^u] \quad (5)$$

系统负荷平衡约束如式(6)所示

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{i,t}^g = D_t - \sum_{j=1}^{N_r} \tilde{P}_{j,t}^r \quad (\lambda_t^s) \quad (6)$$

式中: $\tilde{P}_{j,t}^r$ 为需求侧中标容量,等式右侧代表修正后的系统负荷边界; λ_t^s 为第二次出清的电能量价格。

完成出清流程后,对于发电机组,以第二次出清价格 λ_t^s 作为结算依据,而需求侧结算价格 λ_t 为

$$\lambda_t = \max\{\lambda_t^p, K \cdot \lambda_t^s\} \quad (7)$$

式中: K 为收益因子,现阶段 K 取3。

2.3 不同出清机制下的需求响应定价模式分析

上节讨论了需求响应参与下的市场出清模型。在给定发电供应曲线和负荷预测的基础上,不同出清机制的定价和市场主体收益如图2所示。

在自主竞价模式下需求侧与发电机组同台竞价并且基于相同电能量价格结算。当需求侧成为边际机组时,需求侧主体为了追求更大利润而选择报高价,会抬高发电侧的整体价格,使其他用户受损。

采用价格接受者模式时,完全由发电机组定价,虽然可以避免需求侧主体影响市场价格,但同样会削弱需求侧资源参与市场的积极性,并且不能区分不同需求侧资源的价值,削弱需求侧竞价对资源优化配置的作用。

2次出清模式下,能够解决需求侧自主竞价和参与现货市场出清的矛盾。首先,需求侧竞价的机制能够发挥作用,需求侧资源也会按照从低到高的报价顺序出清,从而抑制部分市场主体随意报价的行为,鼓励其合理报价;其次,发电侧的定价仍由发电机组报价曲线决定,即需求侧市场主体无法抬高发电侧价格。该机制保证了需求侧在自主竞价和不影响市场其他主体利益2方面取得平衡。

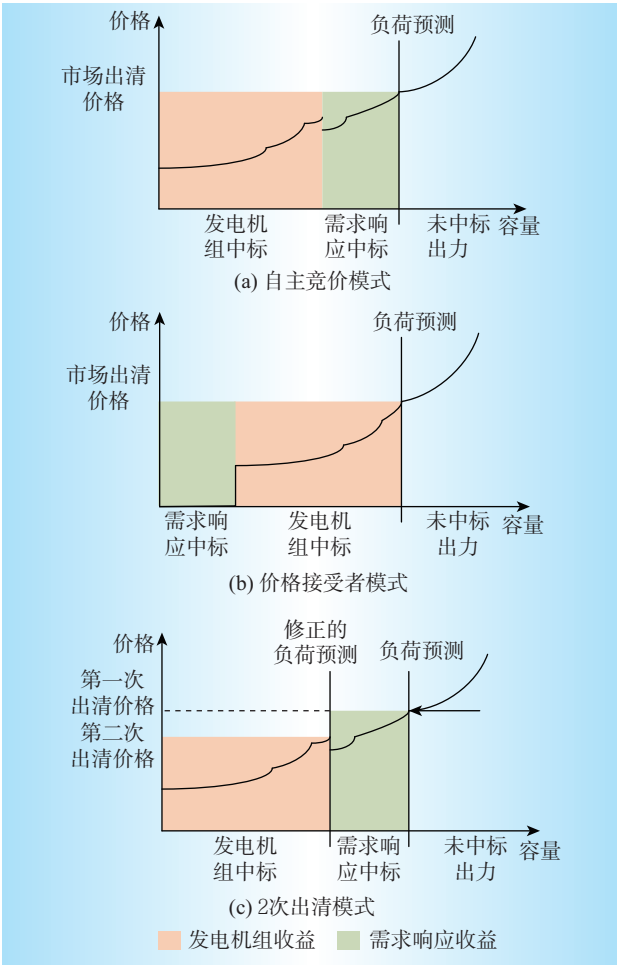


图2 不同出清机制下的市场定价与市场主体收益

Fig. 2 Market pricing and market actors' profit with different market clearing mechanisms

3 市场算例分析

本文采用广东省现货市场的实际算例来分析需求侧选择不同报价行为时市场主体的效益变化。图3为广东省现货市场试结算运行期间某日的日前市场出清数据。同时,假设需求侧参与现货市场并与其他发电机组统一出清,并忽略网架结构等约束。

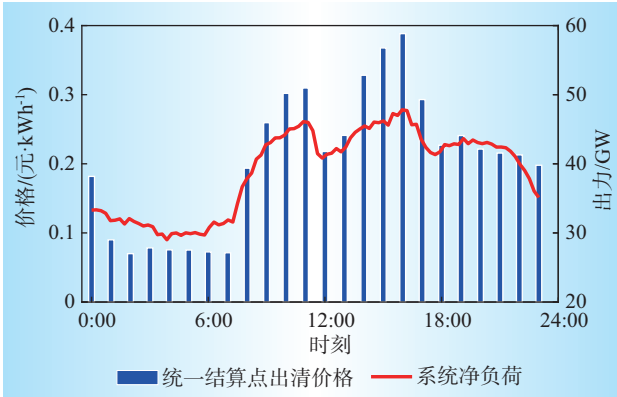


图3 广东省现货市场试运行某日的日前市场出清数据

Fig. 3 Day-ahead energy market clearing data for one test-run day in Guangdong spot market

本文假设共有1 200 MW的需求侧资源参与日前市场,分别属于5家需求侧市场主体A1、A2、A3、A4、A5,各市场主体拥有的用户可调负荷以及对用户可调负荷的补偿金额如表1所示。

表1 需求侧市场主体的可调负荷资源

Table 1 Interruptible load capacity of DR market actors

市场主体	可调负荷/MW	补偿金额/(元·kWh ⁻¹)
A1	240	0.30
A2	200	0.25
A3	280	0.26
A4	200	0.28
A5	180	0.25

图3中,16:00时的出清价格最高,为0.388元/kWh,因此需求侧市场主体可以在16:00投标。基于发电机组在16:00—17:00时段4个15 min节点的报价数据,模拟16:00系统供给曲线如图4所示。从图4可见,大部分出力的报价在0.2~0.3元/kWh的区间内。

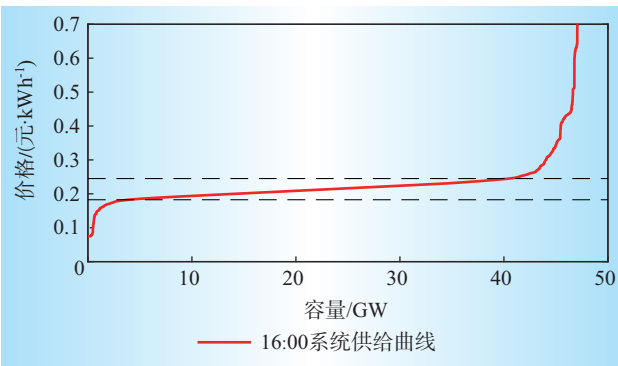


图4 模拟的16:00系统供给曲线

Fig. 4 Simulated system supply curve at 16:00

假设市场主体分别采用保守型和持留型2种策略进行投标,其中保守型对容量没有持留,并按照真实成本报价;持留型选择抬高报价并在容量上有一定持留。不同策略投标方案如表2所示。

表2 需求侧市场主体的投标容量-价格对

Table 2 Bids of capacity-price pairs by DR market actors

市场主体	保守型策略场景		持留型策略场景	
	投标容量/ MW	投标价格/ (元·kWh ⁻¹)	投标容量/ MW	投标价格/ (元·kWh ⁻¹)
A1	240	0.30	200	0.37
A2	200	0.25	160	0.36
A3	280	0.26	200	0.36
A4	200	0.28	150	0.35
A5	180	0.25	150	0.36

考虑需求侧是否参与及不同投标策略场景下,发电侧的96节点日前市场出清曲线如图5所示。可以看出在需求侧的参与下,系统减少尖峰时段的发电侧出力,提高了系统运行的经济性。

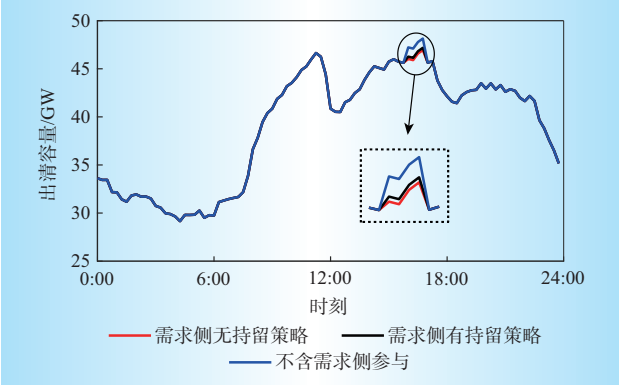


图5 不同场景下市场出清电量情况
Fig. 5 Market clearing results for different scenarios

接下来聚焦到需求侧中标的16:00时刻,该时段市场出清结果如表3所示。可以看到不同场景下出清价格有一定差异,这是因为在需求侧参与现货市场的情况下,一部分发电机组的容量会被替代,导致发电侧出清容量下降,出清价格降低。而需求侧在不同策略下的出清容量不同,也使得系统出清价格略有差异。16:00时不同需求侧市场主体的净收益情况(即市场收益减去补偿费用)如图6所示。市场出清后16:00时用户侧的总费用(包括发电机组和需求响应费用)如图7所示。

表3 需求响应参与的日前市场16:00时出清结果

Table 3 Day-ahead market clearing results for 16:00 with the participation of DR

出清机制	投标策略	需求响应出清价格/(元·kWh ⁻¹)	需求响应出清电量/MWh	发电机组平均出清价格/(元·kWh ⁻¹)	发电机组平均出清电量/MWh
自主竞价模式	保守型	0.332	1 200	0.332	46 246
	持留型	0.370	960	0.370	46 486
价格接受者	保守型	0.332	1 200	0.332	46 246
	持留型	0.346	960	0.346	46 486
两次出清模式	保守型	0.332	1 200	0.332	46 246
	持留型	0.370	960	0.346	46 486

从算例结果可见,需求侧的持留策略会让市场出清价格明显提高。在自主竞价模式和2次出清模式下,由于此时需求侧成为边际机组,需求侧主体会更倾向持留策略的报价,通过影响出清价格来获得更高收益。在价格接受者模式下,由于需求侧主体不能影响价格,因此在其投标时段选择更多容量中标的策略更有利。从图7可以看出,在自主竞价模式下,如果需求侧选择持留策略,系统总费用会明显高于其他场景。这是因为在自主竞价模式中,有可能由需求侧来定价,此时如果需求侧抬高价格,系统的总费用会显著增加,并影响用户利益。

而价格接受者模式和2次出清模式都是由发电机组中的边际机组来定价,对出清价格影响较小。综上所述,2次出清模式是3种机制中唯一能够同时兼顾需求侧自主竞价和对市场影响较小的方式。

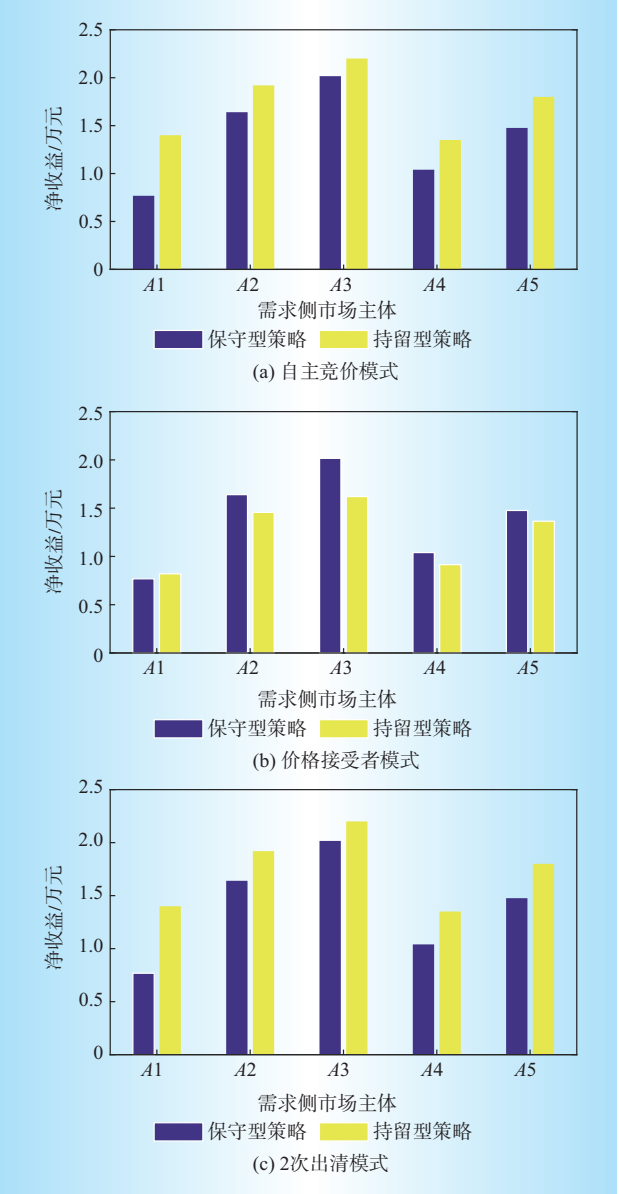


图6 不同场景下16:00需求侧净收益情况
Fig. 6 Net profits of DR at 16:00 for different scenarios

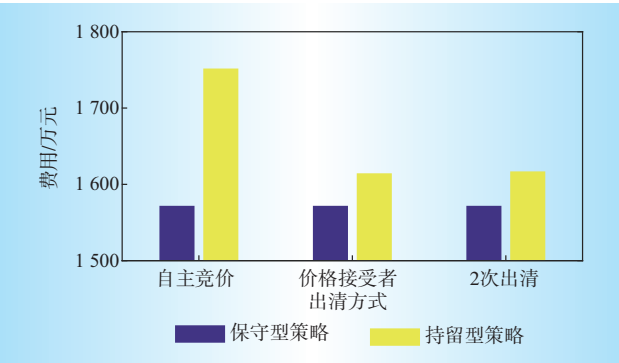


图7 不同场景下16:00系统总费用
Fig. 7 System overall costs at 16:00 for different scenarios

4 结束语

随着广东省电力现货市场机制的不断完善,将需求侧资源纳入现货市场交易具有深远的发展前景。本文首先介绍了广东现货市场环境下的需求响应机制的交易品种、启动条件、交易流程、测量方式和资金来源等。然后,针对需求响应和发电机组同台竞价的情形,探讨了广东省需求响应的2次出清模式与其他出清机制的差异,并分析了相应的定价机制。最后,基于广东电网实际数据进行了模拟仿真,结果表明通过2次出清模式能够避免需求响应竞价行为影响市场价格,有利于稳定现货市场的正常运行秩序。本文对需求响应机制的分析将会为广东省进一步完善市场化需求响应的实施提供参考借鉴。D

参考文献:

- [1] PATERAKIS N G, ERDINÇ O, CATALÃO J P S. An overview of demand response: key-elements and international experience[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017(69): 871-891.
- [2] 沈运帷,李扬,高赐威,等. 需求响应在电力辅助服务市场中的应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(22): 151-161. SHEN Yunwei, LI Yang, GAO Ciwei, et al. Application of demand response in ancillary service market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(22): 151-161.
- [3] 姜勇,李婷婷,王蓓蓓,等. 美国需求响应参与PJM批发电力市场运行及对我国的启示(下)[J]. 电力需求侧管理, 2015, 17(1): 62-64. JIANG Yong, LI Tingting, WANG Beibei, et al. The demand response to participate in the PJM wholesale electricity market operation and enlightenment to our country[J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(1): 62-64.
- [4] 刘军会,刘鑫,李虎军,等. 国外需求响应市场化实施模式及启示[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(2): 95-100. LIU Junhui, LIU Xin, LI Hujun, et al. Marketization implementation mode and enlightenment of foreign demand response participating in electricity[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2): 95-100.
- [5] 郝洁,高赐威. 基于需求侧竞价的安徽省激励型电力需求响应机制研究及应用[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(2): 63-67. HAO Jie, GAO Ciwei. Research and application of incentive power demand response mechanism in Anhui province based on demand side bidding[J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2): 63-67.
- [6] 徐天奇,田业,高鑫,等. 新能源全消纳并网友好型虚拟发电厂优化调度研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(2): 33-38. XU Tianqi, TIAN Ye, GAO Xin, et al. Optimal dispatching of virtual power plant with new energy power generation full consumption and friendly integration into power grids[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 33-38.
- [7] 王睨,张华君,张少华. 风电和电动汽车组成虚拟电厂参与电力市场的博弈模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 155-162. WANG Xian, ZHANG Huajun, ZHANG Shaohua. Game model of electricity market involving virtual power plant composed of wind power and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 155-162.
- [8] 陈启鑫,王克道,陈思捷,等. 面向分布式主体的可交易能源系统:体系架构、机制设计与关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(3): 1-7. CHEN Qixin, WANG Kedao, CHEN Sijie, et al. Transactional energy for distributed agents: architecture, mechanism and technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(3): 1-7.
- [9] 陈玥,刘锋,魏韡,等. 需求侧能量共享:概念、机制与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 1-11. CHEN Yue, LIU Feng, WEI Wei, et al. Energy sharing at demand side: concept, mechanism and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 1-11.
- [10] 史沛然,李彦宾,江长明,等. 第三方独立主体参与华北电力调峰市场规则设计与实践[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 168-174. SHI Peiran, LI Yanbin, JIANG Changming, et al. Rule design and practice for third-party independent entities participating in electric power peak regulation auxiliary service market of north China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 168-174.
- [11] 魏小曼,余昆,陈星莺,等. 基于Affinity propagation和K-means算法的电力大用户细分方法分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 15-19, 35. WEI Xiaoman, YU Kun, CHEN Xingying, et al. Analysis of power large user segmentation based on Affinity propagation and K-means algorithm[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1): 15-19, 35.
- [12] 王一,马子明,谭跃凯,等. 广东日前电力市场方案设计与市场仿真[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1): 10-14. WANG Yi, MA Ziming, TAN Yuekai, et al. Day-ahead power market design and market simulation in Guangdong province[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1): 10-14.
- [13] 陈雨果,张轩,罗钢,等. 用户报量不报价模式下电力现货市场需求响应机制与方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(9): 179-186. CHEN Yuguang, ZHANG Xuan, LUO Gang, et al. Demand response mechanism and approach of electricity spot market in bidding mode without price on user side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(9): 179-186.

作者简介:

关玉衡(1991),男,吉林吉林人,博士研究生,高级工程师,研究方向为调度运行、电力市场、需求侧响应;

何宇俊(1987),男,通信作者,湖北咸宁人,博士,助理研究员,研究方向为电力市场、能源互联网、需求侧响应。

(责任编辑 徐文红 顾婷婷)