

产消者参与调峰辅助服务市场的交易策略

陈海东¹, 乔宁¹, 张超¹, 张吉生¹, 申少辉²

(1. 国网宁夏电力有限公司, 银川 750001; 2. 北京科东电力控制系统有限公司, 北京 100194)

摘要:新型电力系统背景下,大量的分布式新能源接入,具备自主决策能力的产消者群体成为参与调峰辅助服务市场的新型主体。首先,考虑产消者辖内的各类弹性资源特性,提出产消者参与调峰辅助服务市场的决策模型。其次,基于产消者的趋利特性与不同产消者对经济收益的差异化心理,引入对中标概率的敏感因子,提出产消者最优报价模型。最后,以系统总调度成本最低为目标提出市场出清模型。算例表明,所提出的模型不仅有利于缓解系统调峰压力,还具有减小线路负载压力、改善节点电压的效果。

关键词:产消者;弹性资源;调峰辅助服务市场;市场交易

Trading strategy for participation of prosumers in the peak shaving ancillary service market

CHEN Haidong¹, QIAO Ning¹, ZHANG Chao¹, ZHANG Jisheng¹, SHEN Shaohui²

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750001, China; 2. Beijing Kedong Power Control System Co., Ltd., Beijing 100194, China)

Abstract: Under the background of the new power systems with a large number of distributed new energy sources connected, prosumers with autonomous decision-making ability have become a new type of subject participating in the peak shaving and load shifting ancillary service market. Firstly, considering the characteristics of various flexible resources within the control of the prosumers, a decision-making model is proposed for the prosumers to participate in the peak shaving ancillary service market, in order to form the prosumers' power generation plan for the next day. Secondly, based on the profit-seeking characteristics of prosumers and the psychological differences in economic benefits among different prosumers, an optimal bidding model for prosumers is proposed, which takes into account the sensitivity of the prosumers' winning probability to their bidding price. Finally, a market clearing model was proposed with the goal of minimizing the overall scheduling cost of the system. The study shows that proposed model not only facilitates the alleviation of system peak shaving pressure, but also has the effect of reducing line load pressure and improving node voltage.

Key words: prosumer; elastic resource; peak shaving auxiliary service market; market trading

0 引言

为解决能源危机及化石能源对环境的破坏,分布式新能源大量接入,在此背景下,越来越多的普通电力用户集发、用、储能资源于一体,成为具备生产-消费二重角色,并有自主决策能力的产消者^[1]。华北和华中地区已出台产消者作为新型主体参与电力调峰辅助服务市场的试行规则,以发挥各类弹性资源的调节作用,适应高比例新能源并网运行需要。如何充分发挥产消者辖内弹性资源的调峰作用成为研究热点。

目前已有不少学者针对产消者的市场化交易模型展开了研究。文献[2]采用连续拍卖机制搭建

了产消者点对点(peer to peer, P2P)日前市场交易框架,但交易中心需要对交易数据和交易过程进行实时维护与管理,数据计算量大,运行成本高。文献[3]引入区块链技术实现去中心化,提出了基于连续拍卖机制的电力交易模式,但存在产消者的隐私问题。文献[4]采用去中心化的网络系统,提出基于多段报价的产消者交易机制,有效降低了交易双方的信息暴露风险。

然而,大部分针对产消者的研究都集中在电量市场^[5-7],缺少对产消者参与辅助服务市场的交易模型研究。文献[8]建立了风储联合参与电量市场和调频市场的投标模型;文献[9]基于合约理论建立了产消者参与辅助调频市场的交易模型。但大部分文献基本局限于调频市场^[10-11]而不涉及调峰市场,且考虑的弹性资源局限于储能^[12-13]。文献

收稿日期:2024-01-02;修回日期:2024-03-31

基金项目:国网宁夏电力有限公司科技项目资助(5229 NX22001K)

[14]研究了用户调峰特性并对电价调峰模型进行了归纳,文献[15]构建了一种源荷联动的两阶段调峰模型,但这些终端用户参与调峰的模型中仅涉及用户的需求响应^[16-18]而未涉及用户侧发电资源。文献[19]构建了虚拟电厂参与调峰辅助服务市场的机制,但其着重于出清模型的构建,并不涉及被虚拟电厂聚合的弹性资源拥有者产消者的行为策略。

针对上述问题,本文基于提出一种产消者参与调峰辅助服务市场的交易模型,基于产消者的趋利特性对产消者决策和报价进行建模,并引入敏感因子模拟产消者对收益的差异化心理,最后以调度成本最低进行市场出清。

1 终端产消者交易策略

在参与调峰辅助服务市场前,产消者需要进行发电电量和报价的决策。本文研究的产消者辖内弹性资源包括微型燃气轮机、光伏和储能等弹性资源。基于这些弹性资源特性,本节对产消者的决策行为和报价行为进行了建模。

1.1 产消者决策模型

作为位于系统末端的用户,产消者所能获取的信息基本局限于历史交易信息。市场出清时,优先调用低报价产消者提供的弹性资源,作为位于系统末端的用户,产消者所能获取的信息基本局限于历史交易信息。市场出清时优先调用低报价产消者提供的弹性资源,成交价格为其报价,由于中标的产消者往往不止一个,因此同一时刻会存在多个成交价格,而竞价日前一日各时段的最低成交价格能够代表市场的供需情况,因此产消者以预期收益最大为目标进行次日发电计划决策时,往往以该值为直接参考依据,具体如下所示

$$\max F_i = \sum_{t=1}^{24} (p_t^{\text{bf}} P_{i,t} - C_{i,t}) \quad (1)$$

$$C_{i,t} = C_{i,t}^{\text{MT}} + C_{i,t}^{\text{ESS}} \quad (2)$$

式中: p_t^{bf} 为竞价日前一日 t 时段的市场最低成交价格; $P_{i,t}$ 为 t 时段产消者 i 可提供的调峰能力,即微型燃气轮机、光伏、储能的出力之和; $C_{i,t}^{\text{MT}}$ 为微型燃气轮机的运行成本; $C_{i,t}^{\text{ESS}}$ 为储能的运行成本。

产消者在制定次日发电计划决策时,需要受到各类弹性资源特性的约束。

(1) 微型燃气轮机

微型燃气运行成本为

$$C_{i,t}^{\text{MT}} = a_i + b_i P_{i,t}^{\text{MT}} + c_i (P_{i,t}^{\text{MT}})^2 \quad (3)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{MT}}$ 为产消者 i 在 t 时段微型燃气轮机的出力

值; a_i 、 b_i 、 c_i 为运行相关系数。

微型燃气轮机运行约束为

$$\underline{P}_i^{\text{MT}} \leq P_{i,t}^{\text{MT}} \leq \bar{P}_i^{\text{MT}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} P_{i,t-1}^{\text{MT}} - P_{i,t}^{\text{MT}} \leq r_{d,i} \Delta T \\ P_{i,t}^{\text{MT}} - P_{i,t-1}^{\text{MT}} \leq r_{u,i} \Delta T \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\bar{P}_i^{\text{MT}}$ 、 $\underline{P}_i^{\text{MT}}$ 分别为第 i 个产消者中微型燃气轮机有功出力上、下限; $r_{d,i}$ 、 $r_{u,i}$ 分别为机组的向下和向上爬坡率; ΔT 为一个时段。

(2) 光伏电站

光伏电站运行约束为

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{PV}} \leq \bar{P}_i^{\text{PV}} \quad (6)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 为光伏上网出力; $\bar{P}_i^{\text{PV}}$ 为根据历史数据和天气预报预测的光伏最大出力。

(3) 储能

储能运行成本为

$$C_{i,t}^{\text{ESS}} = \frac{n_{i,t}^{\text{eq}}}{N_{i,\text{fail}}} C_{i,\text{in}} + p_t^{\text{DSO}} P_{i,t}^c \quad (7)$$

式中: 左边项为计及储能运行寿命的储能建设成本分摊; 右边项为储能充电成本; $n_{i,t}^{\text{eq}}$ 为第 i 个产消者在 t 时段的储能等效循环次数; $C_{i,\text{in}}$ 为第 i 个产消者中储能的建设成本; $N_{i,\text{fail}}$ 为第 i 个产消者中储能 100% 循环深度下的最大可循环次数; p_t^{DSO} 为 t 时段向电网公司买电的成本, 即储能单位充电量的成本; $P_{i,t}^c$ 为产消者 i 在 t 时段的储能充电量

$$n_{i,t}^{\text{eq}} = 0.5 \left| \frac{E_{i,t}^{\text{ESS}} - E_{i,t-1}^{\text{ESS}}}{E_{i,\text{max}}} \right| \quad (8)$$

式中: $E_{i,t}^{\text{ESS}}$ 为第 i 个产消者中储能第 t 时段的容量状态; $E_{i,\text{max}}$ 为第 i 个产消者中储能的额定能量容量。

储能运行约束为

$$u_{i,t}^{\text{d}} + u_{i,t}^{\text{c}} \leq 1 \quad (9)$$

$$\begin{cases} u_{i,t}^{\text{d}} \underline{P}_i^{\text{d}} \leq P_{i,t}^{\text{d}} \leq u_{i,t}^{\text{d}} \bar{P}_i^{\text{d}} \\ u_{i,t}^{\text{c}} \underline{P}_i^{\text{c}} \leq P_{i,t}^{\text{c}} \leq u_{i,t}^{\text{c}} \bar{P}_i^{\text{c}} \end{cases} \quad (10)$$

$$E_{i,t+1}^{\text{ESS}} = E_{i,t}^{\text{ESS}} + \alpha_i^{\text{c}} P_{i,t}^{\text{c}} - \alpha_i^{\text{d}} P_{i,t}^{\text{d}} \quad (11)$$

$$E_{i,\text{min}} \leq E_{i,t}^{\text{ESS}} \leq E_{i,\text{max}} \quad (12)$$

式中: $u_{i,t}^{\text{d}}$ 、 $u_{i,t}^{\text{c}}$ 分别为储能放电、充电状态的 0-1 变量; $P_{i,t}^{\text{d}}$ 和 $P_{i,t}^{\text{c}}$ 为储能的放电量和充电量; $\bar{P}_i^{\text{d}}$ 、 $\underline{P}_i^{\text{d}}$ 分别为放电功率上、下限; $\bar{P}_i^{\text{c}}$ 、 $\underline{P}_i^{\text{c}}$ 分别为充电功率上、下限; $E_{i,t}^{\text{ESS}}$ 为储能第 t 时段的容量状态; α_i^{c} 、 α_i^{d} 分别为充、放电效率系数, 其取值范围为 $0 < \alpha_i^{\text{c}} < 1$ 、 $\alpha_i^{\text{d}} > 1$; $E_{i,\text{max}}$ 、 $E_{i,\text{min}}$ 分别为考虑储能寿命等因素的容量上、下限值。

1.2 产消者最优报价模型

制定次日发电计划后,各产消者兼顾经济收益

与中标概率,形成相应的申报价格。考虑到不同产消者的收益心理存在差异,设置每个产消者对中标概率的敏感因子为 λ_i ,该值与产消者报价的中标概率直接相关,敏感因子越高,则倾向于稳健报价,中标概率往往就高;敏感因子越低,则倾向于高收益报价,中标概率往往就低。在经过多次报价后,产消者统计意义上的历史中标概率往往趋近于一个稳定值,该值是产消者报价的特征体现,可将该稳定值作为敏感因子进行计算。

产消者以期望收益最大为目标,形成相应的最优报价,具体为

$$\max \pi_i = \hat{p}_{i,t} [1 - \lambda_i (1 - P(\hat{p}_{i,t}))] \quad (13)$$

约束条件为

$$\underline{\rho} \leq \hat{p}_{i,t} \leq \bar{\rho} \quad (14)$$

式中: $\hat{p}_{i,t}$ 为产消者 i 在 t 时段待求解的申报价格; $P(\hat{p}_{i,t})$ 为报价 $\hat{p}_{i,t}$ 成功交易的估计概率,通过计算该时段的历史最低成交价格低于该报价的概率来得; $\bar{\rho}$ 、 $\underline{\rho}$ 分别为辅助服务市场调峰价格上、下限。

2 调峰辅助服务市场出清及交易流程

2.1 市场出清模型

以总调度成本最小为优化目标出清。具体为

$$\min F_2 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in \Psi^N} \hat{p}_{i,t} P_{i,t}^{\text{out}} \quad (15)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{out}}$ 为第 i 个产消者在时段 t 的中标电力; Ψ^N 为产消者节点集合。

约束条件包括

(1) 调峰能力约束

$$P_{i,t}^{\text{out}} \leq P_{i,t} \quad (16)$$

每个产消者的中标电力应不超过其上报的该时段发电计划量。

(2) 功率调节速率约束

$$\begin{cases} P_{i,t-1}^{\text{MT}} - P_{i,t}^{\text{MT}} \leq r_{d,i} \Delta T \\ P_{i,t}^{\text{MT}} - P_{i,t-1}^{\text{MT}} \leq r_{u,i} \Delta T \end{cases} \quad (17)$$

(3) 调峰需求约束

$$\sum_{i \in \Psi^N} P_{i,t}^{\text{out}} = \min(P_t^{\text{peak}}, \sum_{i \in \Psi^N} P_{i,t}) \quad (18)$$

式中: P_t^{peak} 为系统调峰需求。

(4) 安全约束

$$\underline{U}_i^2 \leq v_{i,t} \leq \bar{U}_i^2 \quad \forall i \in \Psi^N, t \in T \quad (19)$$

$$-\bar{I}_{ij}^2 \leq l_{ij,t} \leq \bar{I}_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Psi^L, t \in T \quad (20)$$

式中: $\bar{U}_i$ 、 $\underline{U}_i$ 为节点 i 电压运行上、下限; $v_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的电压的平方; $\bar{I}_{ij}$ 为馈线 ij 的容量上限; $l_{ij,t}$ 为馈线 ij 在 t 时刻的流量的平方。

2.2 产消者调峰辅助服务市场交易流程

调峰辅助服务市场中,以1 h为一时段,产消者将次日发电计划、申报价格、功率调节速率约束上报后,由区域电力调度机构组织市场出清,形成考虑安全约束的出清结果并下放执行。具体的产消者调峰辅助服务市场交易流程如图1所示。

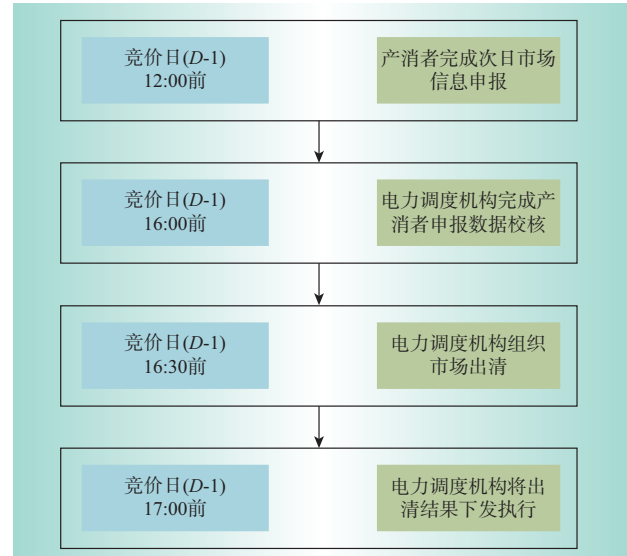


图1 产消者调峰辅助服务市场交易流程

Fig. 1 Trading process for prosumers' participation in peak shaving ancillary service market

3 算例

3.1 算例数据

本文以IEEE33节点配电系统为算例网络,电压等级为12.66 kV,算例网架如图2所示。其中,5、7、18、22、24和30节点接入了燃气轮机、光伏和储能等弹性资源,这6个节点既拥有弹性资源又带负荷,具备产消者的特征,因此在这6个节点设置产消者以参与调峰辅助服务市场。为便于描述,后续称节点5处的产消者为产消者5,依此类推。各产消者对中标概率的敏感因子见表1,屋顶光伏装机容量均为5 MW,储能容量均为1.5 MW,其余基本数据见表2。

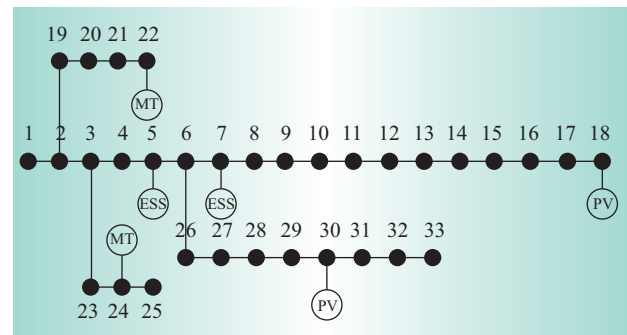


图2 算例网架

Fig. 2 Example grid

表1 各节点产消者敏感因子
Table 1 Sensitivity factor of prosumers at each node

λ_5	λ_7	λ_{18}	λ_{22}	λ_{24}	λ_{30}
0.6	0.2	0.8	0.5	0.7	0.6

表2 基本参数
Table 2 Basic parameters

参数	数值	参数	数值
$N_{i,\text{fail}}/\text{次}$	1 500	$\bar{P}_i^{\text{MT}}/\text{MWh}$	0.3
$C_{i,\text{in}}/\text{万元}$	200	$P_i^{\text{MT}}/\text{MWh}$	0
$\bar{P}_i^{\text{d}}/\text{MW}$	0.3	$r_{d,i}/\text{MW}$	0.1
P_i^{d}/MW	0	$r_{u,i}/\text{MW}$	0.1
$\bar{P}_i^{\text{e}}/\text{MW}$	0.3	$a_i/\text{元}$	0
P_i^{e}/MW	0	$b_i/(\text{元}\cdot\text{MWh}^{-1})$	200
α_i^{d}	1.1	$c_i/(\text{元}\cdot\text{MWh}^{-2})$	100
α_i^{e}	0.9		

3.2 产消者调峰辅助服务市场交易结果分析

基于本文第1节所述的产消者决策模型和最优报价模型,各产消者制定的发电计划堆叠图和各时段报价如图3和图4所示。

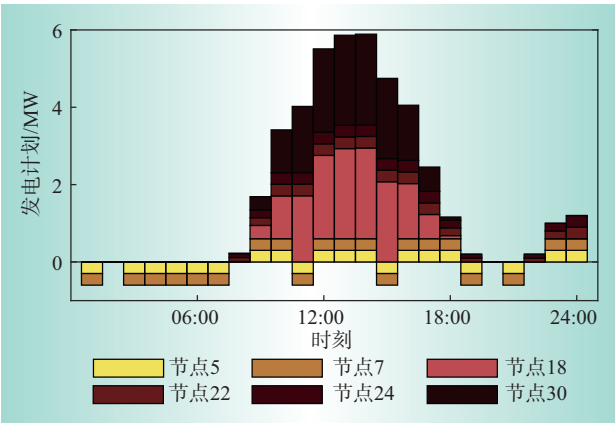


图3 各产消者次日发电计划
Fig. 3 Next-day generation plans of each prosumer

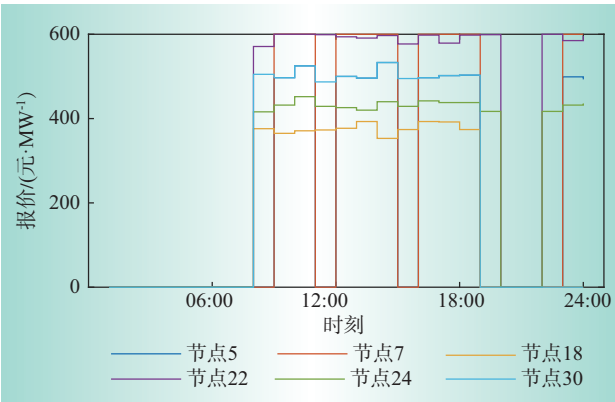


图4 各产消者报价
Fig. 4 Bidding prices of each prosumer

基于产消者决策的次日发电计划与申报价格,调峰辅助服务市场的出清结果如5所示。在调峰需

求较少的时段产消者7均未能中标,而敏感因子相对较低的产消者22也存在部分未能中标的时段。

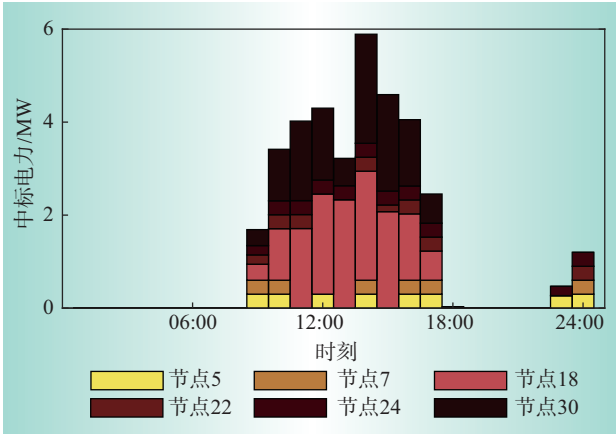


图5 各产消者中标电力
Fig. 5 Bid winning power of each prosumer

图6展示了各产消者单位电量平均收益。尽管产消者7的报价高于产消者22,但其发电计划更集中于调峰需求大的时段,因此中标概率与产消者22相近,同时较高的申报价格也使得其单位电量平均收益更高。然而,敏感因子最高的产消者18虽然中标比例最高,但其单位电量平均收益仍不如产消者5和产消者30,这与其过度注重中标概率而降低了申报价格有关。制定报价策略时,产消者应考虑将发电计划尽量集中于调峰需求大的时段,以提高中标概率;同时应当注意平衡期望经济收益与中标概率的关系,以获得稳定且相对较高的收益。

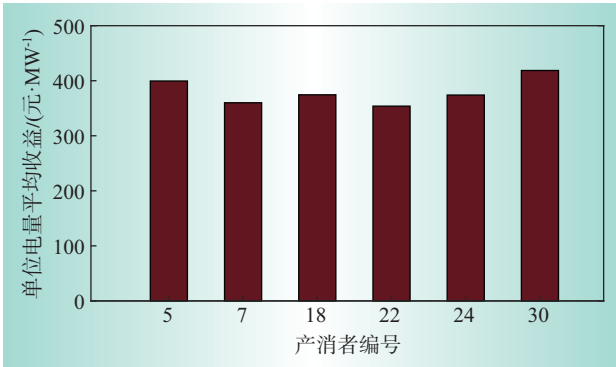


图6 各产消者单位电量平均收益
Fig. 6 Average revenue of per unit electricity of each prosumer

3.3 调峰效果对比

图7展示了本文所述交易模型的调峰效果。调峰前,该系统全网日峰值为42.28 MW,日谷值为25.06 MW,日峰谷差为17.22 MW。产消者参与调峰后,日峰值降为36.39 MW,日谷值为25.66 MW,日峰谷差降为10.73 MW,可见产消者参与调峰后,负荷波动趋于平缓,系统峰谷差明显降低。

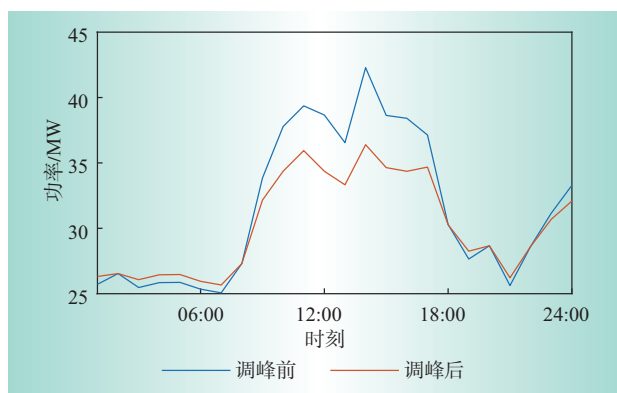


图7 调峰效果

Fig. 7 Peak shaving effect

在传统调峰市场中,调峰容量可能会由于线路的阻塞问题而无法调用。图8为产消者参与调峰与传统调峰市场下各线路负载的对比图。与传统调峰相比,产消者参与调峰后,线路负载率平均降低了20%,有效缓解了线路负载的压力,一定程度上解决了线路阻塞导致无法调用调峰容量的问题。

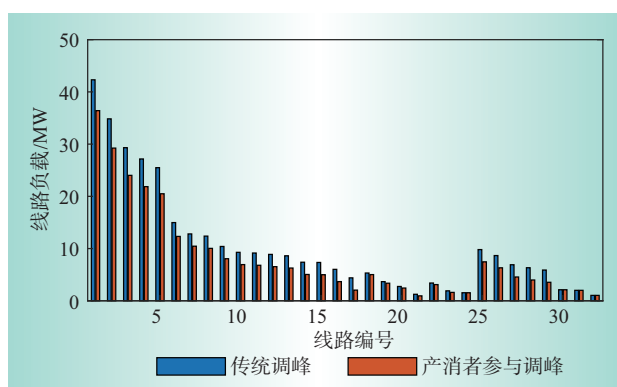


图8 线路负载对比

Fig. 8 Line load comparison

图9为产消者参与调峰与传统调峰市场下,各节点电压偏移量的对比图。可以看到,产消者参与调峰后,系统节点电压平均偏移率降低6.05%,最大偏移率降低23.16%。这说明,产消者参与调峰可以有效改善电力系统的节点电压。

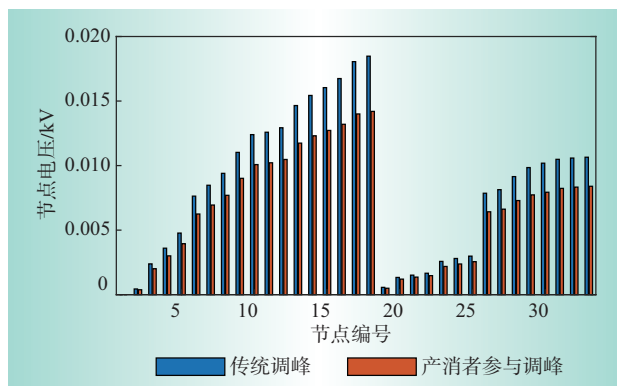


图9 节点电压对比

Fig. 9 Node voltage comparison

4 结束语

本文以产消者为经济利益主体建立了产消者参与调峰辅助服务市场的交易模型。基于产消者的趋利特性对产消者进行决策建模。其次,考虑不同产消者对收益的差异化心理,引入敏感因子,提出产消者最优报价模型。最后以总调度成本最低进行市场出清。算例分析结果表明,调动产消者参与调峰辅助服务市场不仅能有效缓解系统的调峰压力,平抑负荷波动,还具有降低线路负载、改善节点电压的效果,解决了传统调峰因线路阻塞无法调用调峰容量的问题。在未来的研究中,需要考虑产消者调峰辅助服务市场和传统调峰辅助服务市场之间的耦合关系,实现更完整的调峰辅助服务市场构建。D

参考文献:

- [1] 吴界辰,艾欣. 交互能源机制下的电力产消者优化运行[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(19): 1-18.
WU Jiechen, AI Xin. Optimal operation of power prosumers under the interactive energy mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(19): 1-18.
- [2] 张凡,高红均,吴子豪,等. 局域能源市场多产消者P2P交易框架设计[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(12): 17-25.
ZHANG Fan, GAO Hongjun, WU Zihao, et al. Design of a P2P trading framework for multiple prosumers in the local energy market [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(12): 17-25.
- [3] 王健,周念成,王强钢,等. 基于区块链和连续双向拍卖机制的微电网直接交易模式及策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(17): 5 072-5 084.
WANG Jian, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. Microgrid direct trading mode and strategy based on blockchain and continuous bidirectional auction mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(17): 5 072-5 084.
- [4] 高红均,张凡,刘俊勇,等. 考虑多产消者差异化特征的社区微网系统P2P交易机制设计[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(4): 1 455-1 470.
GAO Hongjun, ZHANG Fan, LIU Junyong, et al. Design of P2P transaction mechanism for community microgrid systems considering the differentiated characteristics of prosumers[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1 455-1 470.
- [5] 周亦洲,李想,沈思辰,等. 基于信息间隙决策理论的产消者多市场产品分布式交易[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 122-130.
ZHOU Yizhou, LI Xiang, SHEN Sichen, et al. Distribut-

- ed multi-market product transactions of prosumers based on information gap decision theory [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 122-130.
- [6] 艾欣,王坤宇,胡俊杰,等. 基于交互能源机制的产消者群分布式调度方法研究[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1766-1777.
- AI Xin, WANG Kunyu, HU Junjie, et al. Research on distributed scheduling method for prosumer groups based on Interactive energy mechanism [J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1766-1777.
- [7] 杨国桢,李晓露,柳劲松,等. 基于分布式分支界限算法的产消者联盟电能交易策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(3): 9-16.
- YANG Guozhen, LI Xiaolu, LIU Jinsong, et al. Electricity trading strategy for prosumer coalition based on distributed branch-and-bound algorithm [J]. Smart Power, 2023, 51(3): 9-16.
- [8] 王浩浩,陈嘉俊,朱涛,等. 计及储能寿命与调频性能的风储联合投标模型及算法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 208-217.
- WANG Haohao, CHEN Jiajun, ZHU Tao, et al. Wind storage joint bidding model and algorithm considering energy storage life and frequency modulation performance [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 208-217.
- [9] 马丽雅,刘文霞,孙浩男,等. 基于合约理论的产消者参与调频市场交易策略[J]. 电网技术, 2021, 45(4): 1347-1356.
- MA Liya, LIU Wenxia, SUN Haonan, et al. Contract theory based trading strategy for prosumer participation in FM market [J]. Power System Technology, 2021, 45(4): 1347-1356.
- [10] 李嘉媚,艾芊,殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 37-56.
- LI Jiamei, AI Qian, YIN Shuangrui. The market mechanism of virtual power plants participating in peak shaving and frequency regulation services and foreign experience reference [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37-56.
- [11] 孔飘红,蒋正威,杨力强,等. 基于风氢耦合的氢储能系统参与电力市场机制与风险量化模型设计[J]. 供用电, 2022, 39(1): 31-39.
- KONG Piaohong, JIANG Zhengwei, YANG Liqiang, et al. Mechanism and risk quantification model design of hydrogen storage system participation in power market [J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(1): 31-39.
- [12] 郭旭歆,高赐威,王朝亮,等. 基于中央空调虚拟储能模型的调峰策略研究[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(4): 42-46.
- GUO Xuxin, GAO Ciwei, WANG Chaoliang, et al. Research on peak shaving strategy based on virtual energy storage model of central air conditioning [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(4): 42-46.
- [13] 许高秀,王旭,邓晖,等. 考虑调频需求及风光出力不确定性的储能系统参与能量-调频市场运行策略[J]. 电网技术, 2023, 1-13.
- XU Gaoxiu, WANG Xu, DENG Hui, et al. An energy storage system participating in the energy frequency modulation market operation strategy considering the uncertainty of frequency modulation demand and wind power output [J]. Power System Technology, 2023, 1-13.
- [14] 党东升,韩松,周珏,等. 需求响应参与系统调峰研究综述[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(5): 13-17.
- DANG Dongsheng, HAN Song, ZHOU Jue, et al. Review of research on demand response participating in system peak shaving [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(5): 13-17.
- [15] 任景,薛晨,马晓伟,等. 源荷联动调峰辅助服务市场两阶段模型[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(18): 94-102.
- REN Jing, XUE Chen, MA Xiaowei, et al. A two-stage model for the peak shaving auxiliary service market of source load linkage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 94-102.
- [16] 周颖,石坤,李德智,等. 基于纵向修正 ARIMA 的负荷聚合商潜力计算及调峰策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 2-10.
- ZHOU Ying, SHI Kun, LI Dezhi, et al. Calculation of load aggregator potential and peak regulation strategy based on longitudinal modified ARIMA [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 2-10.
- [17] 任景,薛晨,马晓伟,等. 促进新能源消纳的用户侧调峰机制研究[J]. 电力需求侧管理, 2021, 23(2): 58-62.
- REN Jing, XUE Chen, MA Xiaowei, et al. Research on user side peak shaving mechanism to promote new energy consumption [J]. Power Demand Side Management, 2021, 23(2): 58-62.
- [18] 白泽洋,巨健,姜炎君,等. 电动汽车参与电网调峰的关键技术研究综述[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(6): 25-31.
- BAI Zeyang, JU Jian, JIANG Yanjun, et al. Review of key technologies for electric vehicle participation in grid peak shaving [J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(6): 25-31.
- [19] 高洪超,王宣元,邱小燕,等. 新型电力系统环境下的虚拟电厂辅助调峰市场机制及其商业模式设计[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 376-385.
- GAAO Hongchao, WANG Xuanyuan, QIU Xiaoyan, et al. Virtual power plant assisted peak shaving market mechanism and business model design in a new power system environment [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(3): 376-385.

作者简介:

陈海东(1986),男,宁夏银川人,硕士,高级工程师,研究方向为电力市场等;

申少辉(1983),男,通信作者,北京人,硕士,工程师,研究方向为电力市场、电力交易等。

(责任编辑 王 蕊)