

文章编号: 1006-2467(2024)01-0011-08

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2022.130

考虑主体信用的配电网分布式绿电交易方法

吴清¹, 贾乾罡², 严正², 钟准¹, 郭颂¹, 李志勇¹

(1. 海南电网有限责任公司, 海口 570100; 2. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 发展分布式可再生能源是推动能源转型的关键手段, 组织市场化交易能够促进分布式可再生能源生产和消纳。然而, 可再生能源出力的不确定性使其容易在市场交割时出现偏差, 进而为配电系统安全运行带来压力, 但现有市场化交易机制仍难以激励市场主体主动减少偏差。为此, 通过量化信用成本来引导分布式绿电的诚信交割行为。同时, 考虑分布式绿电主体的策略性报价行为, 建立考虑主体信用的分布式绿电市场化交易模型。然后, 提出基于最优响应法的迭代算法来计算绿电市场的纳什均衡点。算例结果表明: 所提市场机制能够以激励相容的方式引导用户的诚信行为, 在降低交割偏差的同时提高绿电市场社会福利。

关键词: 分布式发电; 绿电交易; 信用值; 纳什均衡

中图分类号: TM732

文献标志码: A

Green Energy Trading in Distribution Network Considering Credit Value

WU Qing¹, JIA Qiangang², YAN Zheng², ZHONG Zhun¹, GUO Song¹, LI Zhiyong¹

(1. Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570100, China; 2. Key Laboratory of Power Transmission and Conversion of the Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Developing distributed renewable energy is vital to energy system transformation, while organizing market trading will promote the production and consumption of distributed renewable energy. However, the uncertainty of renewable energy output causes deviations during market delivery, which threatens the security of distribution system operation. It is still difficult for existing market-based trading mechanisms to motivate market players to reduce the deviations. Therefore, this paper gives guidance to the honest delivery behaviors of distributed green energy producers by quantifying credit costs. Considering the strategic bidding behaviors of distributed green energy producers, it establishes a market model taking the credit costs into account. Then, it proposed an iterative algorithm based on the optimal response theory to calculate the Nash equilibria of the green energy market. The results of the case study show that the market mechanism proposed can give guidance to the integrity behavior of green energy producers in an incentive-compatible way, reducing the delivery deviation while improving social welfare.

Keywords: distributed energy resource; green market trading; credit value; Nash equilibrium

收稿日期: 2022-04-27 修回日期: 2022-09-06 录用日期: 2022-09-22

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(自趋优智慧园区微网系统示范及实训平台研究与建设, HNKJXM20180209)

作者简介: 吴清(1971-), 教授级高级工程师, 从事电力系统自动化研究。

通信作者: 严正, 教授, 博士生导师; E-mail: yanz@sjtu.edu.cn.

“十四五”时期是我国新能源快速发展的时期,也是新能源消纳利用难度大幅增加的时期^[1].设计合理的分布式能源消纳机制对于加快构建新型能源体系,实现“双碳”目标有着至关重要的作用.为此,国家发改委和国家能源局印发《能源领域深化“放管服”改革优化营商环境实施意见》《完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》等相关文件.文件明确了“推动开展分布式发电就近交易,落实相关价格政策”,坚持“深化能源领域体制改革,充分发挥市场在资源配置中的决定性作用,构建公平开放、有效竞争的能源市场体系”,从政策层面鼓励分布式绿电^[2],即用风光等可再生能源以零二氧化碳排放所生产的电力就近交易.

当前,学术界已对分布式可再生能源就近交易方案展开众多研究.文献[3]中提出一种点对点交易下兼具储能共享和电能自营模式的储能聚合商交易模型.文献[4]中提出一种基于非对称纳什谈判的多微网电能共享运行优化策略.文献[5]中提出一种基于区块链技术的产消用户端对端电能交易方法.文献[6]中提出一种基于区块链、去中心化的配电侧多微网电能交易模型.文献[7]中提出一种商业园区运营商多能交易博弈优化决策模型.文献[8]中提出一种分层市场架构以实现分散的局域交易与传统集中式批发交易的有效衔接.文献[9]中提出一种基于强化学习的能源产消者的最优交易策略.文献[10]中提出面向虚拟电厂能量管理的点对点市场交易机制与模型.文献[11]中分析区块链技术在分布式可再生能源交易中绿电追溯、绿证交易、碳交易、绿证与碳资产联合市场方向的关键技术适用性.上述研究为配电网中分布式可再生能源就近交易机制的设计提供了指导和参考.但是,分布式可再生发电资源出力存在固有的不确定性^[12],在实际电能交割的过程中,需要市场运营商调用备用、调频等辅助服务以保证系统的安全运行,且电能交割的偏离程度越大,市场运营商需要采购的辅助服务越多,所产生的市场外部成本越高^[13].现有的分布式能源市场化交易机制仍缺少针对发电不确定性的监管措施,难以充分激励分布式发电资源生产者准确交割.

为鼓励电能产消者准确交割电能,市场运营商需要制定合理的规则来引导发电主体的交割行为.文献[14]中针对分布式能源的不确定性构造履约信用函数并建立信用奖惩激励机制.文献[15]中将分布式能源生产者的履约情况作为交易标的组织分布

式电能交易市场.文献[16]中建立基于区块链的分布式能源产消者声誉系统并组织分布式电能交易市场.但是,发电主体之间存在竞争,其博弈行为深刻地影响彼此的收益.上述文献并未从博弈论的角度分析引入信用值后市场均衡的变化情况,不能充分证明信用值为分布式能源发电和社会福利带来的影响.

综上所述,本文提出考虑主体信用的分布式绿电市场化交易方法:①提出考虑主体信用的分布式绿电交易机制,以激励相容的方式鼓励配电网中绿电生产者的诚信交割行为,促进整个市场的良性发展.在该机制下,分布式绿电主体提高信用值在增大市场社会福利的同时,也将给自身带来更高利润;②建立考虑主体信用的绿电市场出清模型,并提出基于最优响应法的市场纳什均衡点^[17]求解算法.算例结果证明:该市场机制能够引导用户的诚信行为,在降低市场总交割偏差的同时,提高市场社会福利.

1 考虑主体信用的分布式绿电交易机制

1.1 市场构架

分布式绿电交易市场参与者包括配电市场运营商(Distribution Market Operator, DMO)、配电系统运营商(Distribution System Operator, DSO)、分布式绿电生产者(Green Energy Supplier, GES)及分布式绿电消费者(Green Energy Consumer, GEC).其中,DMO负责市场的组织和信用值计算,并配合DSO实现市场出清.

考虑主体信用的分布式绿电交易机制运行流程如图1所示.DMO和DSO的目标是最大化社会福利,即所有GEC的效用减去所有GES的成本^[18-19];GES的目标是出售绿电来最大化自身利润;GEC的目标是购买绿电来满足其自身需求^[20].

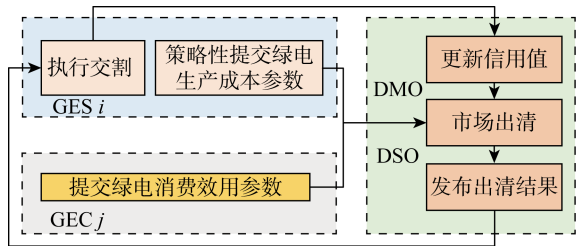


图 1 考虑主体信用的分布式绿电交易流程
Fig. 1 Green energy trading process considering credit value

绿电市场的运行流程如下:

(1) GES i 向 DMO 策略性提交自身的绿电成本系数和出力上下限; GEC j 向 DMO 提交自身真实的绿电效用系数和绿电需求上下限。

(2) DMO 得到 GES 的绿电生产成本和信用值,以及 GEC 的绿电效用。然后,以最大化社会福利为目标,配合 DSO 出清分布式绿电市场,得到 GES i 的出售量和 GEC j 的购买量,并将结果返回给绿电生产者。

(3) GES i 根据 DMO 发布的市场出清结果,执行绿电交割,市场主体将按各市场主体的报价结算^[21]规则结算。然后,DMO 根据 GES i 的交割结果更新对应的信用值。

1.2 信用值的定义和计算

DSO 需要调用备用、调频等辅助服务来弥补 GES 在电能交割时的偏差,且辅助服务调用成本随着偏差的增大而增加。为此,引入信用值来评价 GES 的绿电交割行为。信用值计算过程包括以下两个步骤。

(1) 信用值初始化: DMO 设定 GES i 的信用值 O_i^{gG} 初始值为 1。

(2) 信用值更新: DMO 根据 GES i 的绿电交割次数 M_i 和每次交割的偏离程度更新信用值,

$$O_i^{\text{gG}} = \exp\left(-\frac{1}{M_i} \sum_n \alpha_{i,n}\right) \quad (1)$$

式中: $\alpha_{i,n}$ 为 GES i 第 n 次交割的偏离程度, $0 \leq \alpha_{i,n} \leq 1$ 。

由式(1)可知,若 GES i 的交割行为均无偏差,则其信用值为 1;若 GES i 的交割行为存在偏差,则其信用值随着偏差的增加而下降,随着偏差的减少而上升。信用值将决定 GES i 在绿电市场出清问题中的信用成本。

在第 n 次交易结算中, GES i 在市场交割中的偏离程度 $\alpha_{i,n}$ 的计算方式为

$$\alpha_{i,n} = \begin{cases} \frac{|P_{i,n}^{\text{gG}*} - P_{i,n}^{\text{gG}}|}{P_{i,n}^{\text{gG}}}, & \frac{|P_{i,n}^{\text{gG}*} - P_{i,n}^{\text{gG}}|}{P_{i,n}^{\text{gG}}} > \mu \\ 0, & \frac{|P_{i,n}^{\text{gG}*} - P_{i,n}^{\text{gG}}|}{P_{i,n}^{\text{gG}}} \leq \mu \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{i,n}^{\text{gG}*}$ 为 GES i 第 n 次实际绿电交割量; $P_{i,n}^{\text{gG}}$ 为 GES i 第 n 次绿电市场出清的约定出售量。第 n 次交易结算中绿电交割电量偏离约定值的比例 $\gamma_{i,n}$ 小于某一阈值 μ 即为准确交割, $\gamma_{i,n} = \frac{|P_{i,n}^{\text{gG}*} - P_{i,n}^{\text{gG}}|}{P_{i,n}^{\text{gG}}}$ 。

假设 μ 为 0.1, 图 2 显示不同交割电量偏离约

定值的比例(γ_i)下, GES i 交割偏离程度(α_i)和信用值变化的过程。

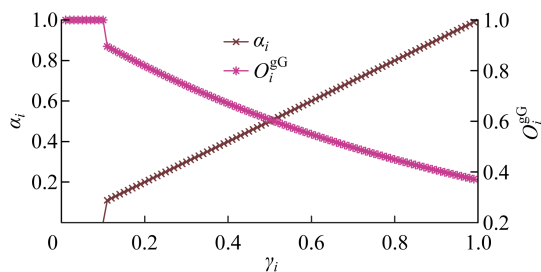


图 2 GES i 交割偏离程度和信用值的变化过程

Fig. 2 Changing process of deviation and credit value of GES i

2 考虑主体信用的分布式绿电交易机制

2.1 绿电生产者模型

GES i 参与分布式绿电交易的目标为最大化自身利润:

$$\max F_i^{\text{gG}} \quad (3)$$

$$F_i^{\text{gG}} = R_i^{\text{gG}} - C_i^{\text{gG}} \quad (4)$$

式中: F_i^{gG} 为 GES i 的利润; R_i^{gG} 为 GES i 的出售绿电收入; C_i^{gG} 为 GES i 的单位绿电生产成本。

GES i 的绿电生产成本为^[22]

$$C_i^{\text{gG}} = c_i^{\text{gG}} P_i^{\text{gG}} \Delta t \quad (5)$$

式中: c_i^{gG} 为 GES i 单位绿电的生产成本; P_i^{gG} 为 GES i 绿电市场出清的约定出售量; Δt 为执行绿电交割的时段长度。

考虑 GES i 的策略性报价行为,其收益为

$$R_i^{\text{gG}} = c_{i,s}^{\text{gG}} P_i^{\text{gG}} \Delta t \quad (6)$$

式中: $c_{i,s}^{\text{gG}}$ 为 GES i 在市场中策略性提交的成本参数。

GES i 策略性报价的区间为

$$c_{i,\min}^{\text{gG}} \leq c_{i,s}^{\text{gG}} \leq c_{i,\max}^{\text{gG}} \quad (7)$$

式中: $c_{i,\max}^{\text{gG}}$ 和 $c_{i,\min}^{\text{gG}}$ 分别为 GES i 的策略性报价上下限。不同 GES 在市场中存在非合作博弈关系,其报价行为将深刻地影响彼此收益。

2.2 绿电消费者模型

根据配电网中工商业用户对绿电的实际需求,仿照电能消费者效用函数^[23],给出 GEC j 的绿电消费效用函数:

$$U_j^{\text{gL}} = [d_j^{\text{gL}} P_j^{\text{gL}} - l_j^{\text{gL}} (P_j^{\text{gL}})^2] \Delta t \quad (8)$$

式中: d_j^{gL} 和 l_j^{gL} 分别为 GEC j 绿电消费效用的一次项和二次项系数; P_j^{gL} 为 GEC j 的绿电购买量。式(8)表示在一定范围内,随着绿电消费量增加,绿电

消费者的效用增加,且边际效用递减。

2.3 考虑主体信用的绿电市场出清问题

DMO 收集所有 GES 和 GEC 提交的成本系数和效用系数后,计算不同 GES 的信用值。DMO 针对 GES i 的信用值,在其成本函数中加入信用成本, GES i 信用成本的计算方式如下:

$$V_i^{\text{G}} = \varphi(1 - O_i^{\text{G}})(P_i^{\text{G}})^2 \Delta t \quad (9)$$

式中: φ 为信用成本的系数。

DMO 配合 DSO 执行市场出清的目标函数为最大化社会福利 S_{total} ,即最小化社会成本 C_{total} :

$$C_{\text{total}} = \sum_{i \in \Xi} (R_i^{\text{G}} + V_i^{\text{G}}) - \sum_{j \in \Psi} U_j^{\text{GL}} \quad (10)$$

$$S_{\text{total}} = -C_{\text{total}} \quad (11)$$

$$\min_{P_i^{\text{G}}, P_j^{\text{GL}}} C_{\text{total}} \quad (12)$$

式中: Ξ 为配电网中 I 个 GES 的集合, I 为 GES 总数; Ψ 为配电网中 J 个 GEC 的集合, J 为 GEC 总数。

不同于一般的集中式市场出清^[24],信用成本函数将促进 GES 提高出力预测的精度,鼓励其诚信交割。GES i 信用值降低时,其信用成本将增加,这将导致两种情况:①GES i 在相同报价下中标的绿电销售量降低;②GES i 在相同中标量的情况下报价将降低。两种情况都将导致其利润的下降。因此, GES i 为了取得更高收益,需要提高自身的出力预测精度,从而提高信用值,以降低其信用成本。

市场出清问题的等式约束为绿电发用平衡约束:

$$\sum_{i \in \Xi} P_i^{\text{G}} = \sum_{j \in \Psi} P_j^{\text{GL}} \quad (13)$$

市场出清优化问题的不等式约束包括 GES 的绿电出力上下限约束和 GEC 的绿电消费上下限约束,可表述为下列形式:

$$P_{i,\min}^{\text{G}} < P_i^{\text{G}} < P_{i,\max}^{\text{G}} \quad (14)$$

$$P_{j,\min}^{\text{GL}} < P_j^{\text{GL}} < P_{j,\max}^{\text{GL}} \quad (15)$$

式中: $P_{i,\min}^{\text{G}}$ 和 $P_{i,\max}^{\text{G}}$ 分别为 GES i 绿电出售量的下限和上限; $P_{j,\min}^{\text{GL}}$ 和 $P_{j,\max}^{\text{GL}}$ 分别为 GEC j 绿电购买量的下限和上限。

忽略线路网损,配电网线路的潮流约束可以表述为下列形式^[25]:

$$P_{xy} = \sum_{z \in \Phi} P_{yz} - \sum_{i, j \in \Phi} (P_i^{\text{G}} - P_j^{\text{GL}}) \quad (16)$$

式中: P_{xy} 和 P_{yz} 分别为线路 xy 和线路 yz 传输的有功功率; Φ 为节点 y 的子节点集合。

配电网的传输线功率限制如下:

$$-P_{xy,\max} \leq P_{xy} \leq P_{xy,\max} \quad (17)$$

式中: $P_{xy,\max}$ 为配电网线路 xy 的有功功率传输

上限。

DMO 在配合 DSO 出清市场之后,将求解得到的绿电销售量 P_i^{G} 返回给 GES i ,并将绿电购买量 P_j^{GL} 返回给 GEC j 。

3 市场纳什均衡求解算法

在纳什均衡点,任何一位市场参与者单方面改变自己的报价策略都不会提高自身的收益。因此,从纳什均衡的定义出发,基于最优响应理论^[26],提出计算市场纳什均衡点的迭代求解算法,具体流程如图 3 所示。

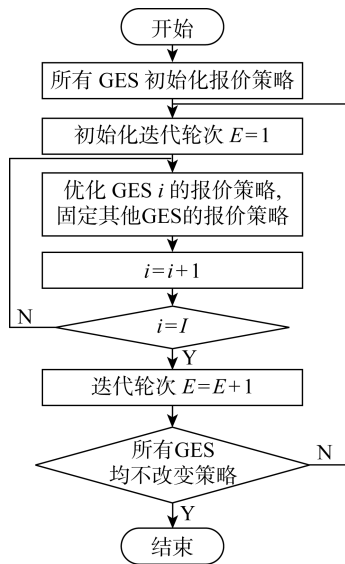


图 3 绿电交易市场纳什均衡迭代求解算法

Fig. 3 Iterative algorithm for solving Nash equilibria in green energy trading

在迭代算法中,每个 GES 依次更新自身的报价策略^[27]。在 GES i 优化报价策略的时候,固定其他 GES 的报价策略。经过多次迭代,直到市场达到纳什均衡。其中,GES 初始化报价策略的方式为随机初始化。

在迭代过程中,GES i 的策略优化规则如下:

(1) GES i 的报价策略空间 $[c_{i,\min}^{\text{G}}, c_{i,\max}^{\text{G}}]$ 离散化为包含 K_i 个报价策略的集合 Γ ,便于后续 GES i 提交和更新报价策略。其中,离散化间隔为 $\frac{c_{i,\max}^{\text{G}} - c_{i,\min}^{\text{G}}}{K_i}$ 。

(2) GES i 将报价策略 $c_{i,s}^{\text{G}} \in \Gamma$ 提交给 DMO。

(3) DMO 收集所有 GES 的报价之后,配合 DSO 出清市场并将出清结果 P_i^{G} 返回给 GES i ,将 P_j^{GL} 返回给 GEC j 。

(4) GES i 计算得到不同报价策略下的收益,

选择最优的报价策略并在本轮迭代中固定该策略。

该迭代算法能够实现快速求解纳什均衡点的目的。实际运行中,GES 报价过程中可能存在同时更改策略的情况,市场在这种情况下仍可以更快的速度收敛到相同的纳什均衡^[28]。

4 算例分析

算例选取 IEEE13 节点配电网系统,包含 5 个 GES(节点 2、4、6、9、12)和 12 个 GEC(节点 2~13),配电系统的拓扑结构如图 4 所示。

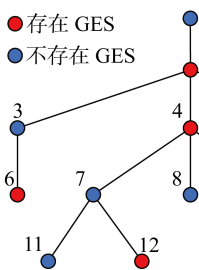


图 4 IEEE13 节点系统

Fig. 4 IEEE13-bus radial distribution power system

网络拓扑参数、所有 GES 和 GEC 的真实成本和效用函数参数如表 1 所示。表中: λ 为现货电力价格。

表 1 算例参数

Tab. 1 Parameters of case study

参数	数值
$c_i^G/(\text{美元} \cdot \text{MW}^{-1})$	29.75/11.87/27.46/12.78/13.99
$c_{i,\min}^G, c_{i,\max}^G/$ ($\text{美元} \cdot \text{MW}^{-1}$)	0/60
$d_i^L/(\text{美元} \cdot \text{MW}^{-1})$	42.96/49.74/60.24/68.85/64.15/61.55 67.74/53.25/65.90/64.12/80.83/75.79
$l_i^L/(\text{美元} \cdot \text{MW}^{-2})$	0.32/0.79/0.55/0.26/0.10/0.30 0.45/0.71/0.33/0.13/0.49/0.47
$P_{i,\min}^G, P_{i,\max}^G/\text{MW}$	0/30
$P_{i,\min}^{GL}, P_{i,\max}^{GL}/\text{MW}$	0/50
$P_{xy,\max}/\text{MW}$	20
K_i	30
$\lambda/(\text{美元} \cdot \text{MW}^{-1})$	30
φ	1
μ	0.1
$\Delta t/\text{min}$	5

算例设置了如下两个场景:场景 1 改变所有 GES 的信用值,测试市场的纳什均衡点变化情况;场景 2 从 GES 2 的角度出发,分析其提升预测精度、降低交割偏差前后的市场出清结果,模拟其参与

该市场出清的演化进程。

(1) 场景 1. 图 5 展示了绿电市场的纳什均衡点。由图 5(a)可知,大部分 GES 的报价随着信用值的提高而逐渐降低。由图 5(b)可知,所有 GES 的绿电销售量随着信用值的增加而增加。由此可知,本文机制下,信用值高的 GES 可以获得更多交易红利。

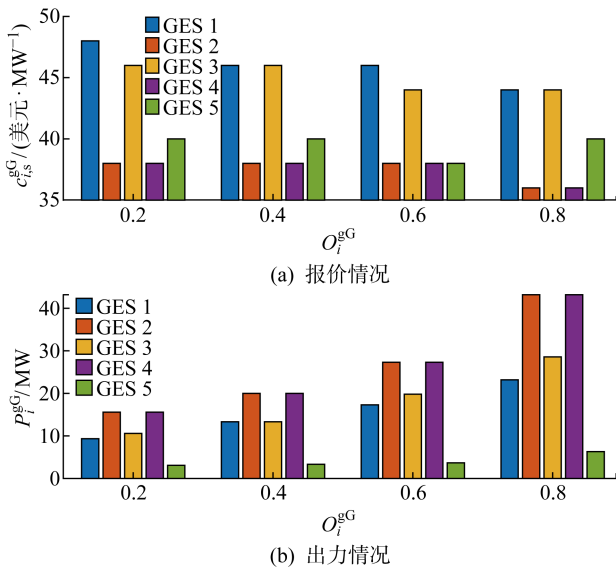


图 5 不同信用值下的市场均衡结果变化

Fig. 5 Nash equilibria of green electricity trading at different credit values

图 6 展示了绿电市场中每个 GES 的收益情况和社会总福利的变化情况。由图 6(a)可知,所有 GES 的利润随着信用值的增加而提高。由图 6(b)可知,整个绿电市场的社会福利随着所有 GES 信用值

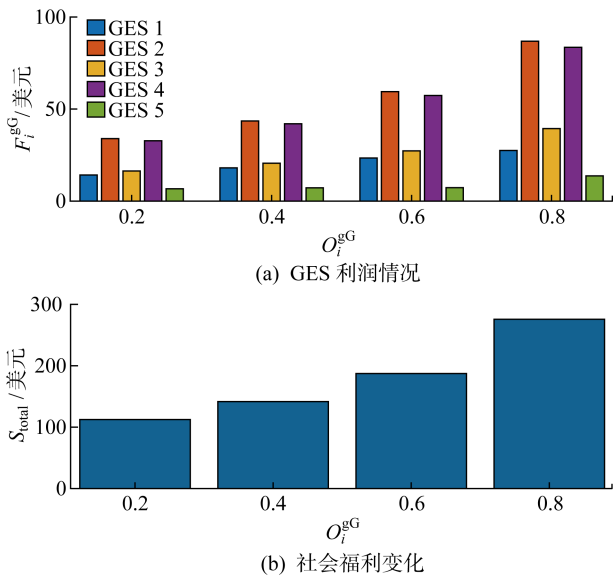


图 6 市场效益分析

Fig. 6 Analysis of market benefit of GES in the whole market

的提高而增大,即每个 GES 提高信用值的行为不仅能够促使各自获得更高利润,也能够增大集体利益.因此,所提出的分布式绿电交易机制可以实现分布式绿电交易的激励相容性.

(2) 场景 2. 以 GES 2 为例,改变绿电交割的偏差比例,分析其信用值的变化以及市场出清结果的纳什均衡演化过程.

图 7 展示了 GES 2 的市场出清结果演化情况. 图 7(a) 设定 GES 2 的绿电电量交割偏差比例(γ)变化情况. 假设 GES 2 在参与交易过程中逐步提升其预测精度,在前 10 次、11~20 次、21~30 次、31~40 次、41~100 次的市场交割的偏差范围分别是 ± 0.5 、 ± 0.4 、 ± 0.3 、 ± 0.2 和 ± 0.1 ,每次交割的实际偏差值在对应偏差范围内抽样产生. 图 7(b) 显示 GES 2 的信用值变化情况. 在参与市场交易初期,由于交割偏差较大,GES 2 的信用值先下降,然后随着交割偏差的降低逐渐回升. 图 7(c) 显示 GES 2 的利润变化情况. GES 2 的利润先随着信用值降低而下降,然后随着信用水平的恢复而逐渐回升.

由此可见,对 GES 而言,提高信用值能够提高自身利润;同时,对于系统而言,GES 的行为也有助于降低交割偏差.

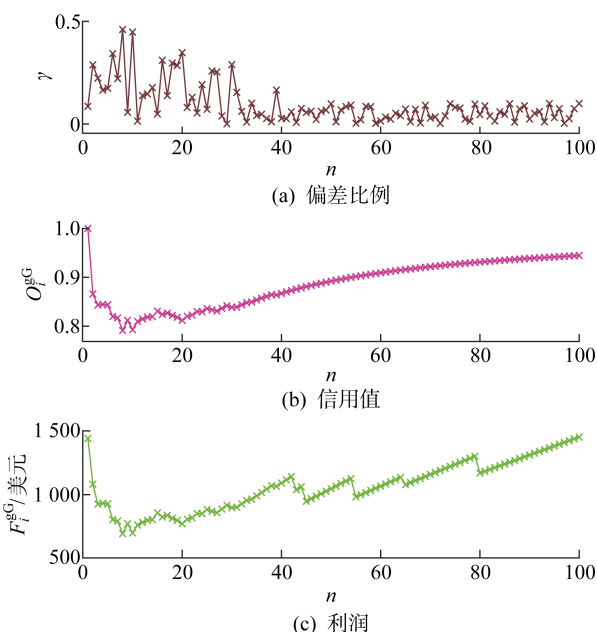


图 7 GES 2 市场演化结果

Fig. 7 Market evolution results of GES 2

5 结语

提出一种考虑主体信用的配电网绿电交易市场方法. 首先,提出考虑主体信用的分布式绿电交易机制,引导分布式绿电主体的诚信交割行为. 然后,建

立考虑主体信用的绿电市场出清数学模型,并提出基于最优响应的迭代算法以计算市场的纳什均衡点. IEEE13 节点配电网算例证明所提绿电交易方法能够以激励相容的方式引导用户的诚信行为,在降低交割偏差的同时提高市场社会福利和市场成员个体利益,促进分布式绿电市场的良性发展.

未来研究将集中于以下几个方面:研究基于非理性人假设的 GES 报价行为,以及所导致的市场均衡变化情况;考虑 GEC 的策略性报价行为,研究整个市场的均衡变化情况;研究更加高效的迭代算法,提升市场纳什均衡点求解效率;将绿电交易与需求响应结合,形成面向新型电力系统的需求响应机制.

参考文献:

- [1] 新华社. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. (2021-03-13) [2023-01-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm. Xinhua News Agency. Outline of the 14th Five-Year Plan (2021—2025) for national economic and social development and Vision 2035 of the People's Republic of China [EB/OL]. (2021-03-13) [2023-01-10]. http://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm.
- [2] 王栋, 李达, 冯景丽, 等. 考虑绿色属性的多微网间电能可信自治交易方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(23): 1-10.
WANG Dong, LI Da, FENG Jingli, *et al.* Trustworthy and autonomous electricity trading method among multiple microgrids considering green property [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(23): 1-10.
- [3] 张巍, 卢襄. 点对点交易下储能聚合商共享自营多模式交易模型[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 15-23.
ZHANG Wei, LU Xiang. Sharing and self-operating multi-mode trading model of energy storage aggregators with peer-to-peer trade [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(2): 15-23.
- [4] 吴锦领, 楼平, 管敏渊, 等. 基于非对称纳什谈判的多微网电能共享运行优化策略[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2711-2723.
WU Jinling, LOU Ping, GUAN Minyuan, *et al.* Operation optimization strategy of multi-microgrids energy sharing based on asymmetric Nash bargaining [J]. *Power System Technology*, 2022, 46(7): 2711-2723.
- [5] 胡钰, 李华强, 李山山, 等. 基于区块链的产消用户

- 端对端电能交易方法[J]. **电力自动化设备**, 2022, 42(1): 101-108.
- HU Yu, LI Huaqiang, LI Shanshan, *et al.* Peer-to-peer power trading method for proconsumers based on blockchain [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2022, 42(1): 101-108.
- [6] 马腾, 刘洋, 许立雄, 等. 基于区块链的配电侧多微电网电能去中心化交易模型[J]. **电网技术**, 2021, 45(6): 2237-2247.
- MA Teng, LIU Yang, XU Lixiong, *et al.* Energy decentralized transaction model of multi-microgrid in distribution side based on blockchain[J]. **Power System Technology**, 2021, 45(6): 2237-2247.
- [7] 赵银波, 高红均, 王仲, 等. 考虑用户电能替代的商业园区运营商多能交易博弈优化决策[J]. **电网技术**, 2021, 45(4): 1320-1331.
- ZHAO Yinbo, GAO Hongjun, WANG Zhong, *et al.* Optimal decision of multi-energy trading game for commercial park operators considering user-side electricity substitution [J]. **Power System Technology**, 2021, 45(4): 1320-1331.
- [8] 赵天辉, 王建学, 陈洋. 面向综合能源交易的新型城镇分层市场架构和出清算法[J]. **电力系统自动化**, 2021, 45(4): 73-80.
- ZHAO Tianhui, WANG Jianxue, CHEN Yang. Hierarchical market structure and clearing algorithm for integrated energy trading of new-type towns[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2021, 45(4): 73-80.
- [9] 王丹, 刘博, 贾宏杰, 等. 基于强化学习的产消用户端对端电能交易决策[J]. **电力系统自动化**, 2021, 45(3): 139-147.
- WANG Dan, LIU Bo, JIA Hongjie, *et al.* Peer-to-peer energy transaction decision of prosumers based on reinforcement learning[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2021, 45(3): 139-147.
- [10] 单俊嘉, 胡俊杰, 吴界辰. 面向虚拟电厂能量管理的点对点市场交易机制与模型[J]. **电网技术**, 2020, 44(9): 3401-3408.
- SHAN Junjia, HU Junjie, WU Jiechen. Peer-to-peer market trading mechanism and model for virtual power plant energy management[J]. **Power System Technology**, 2020, 44(9): 3401-3408.
- [11] 李幸芝, 韩蓓, 李国杰, 等. 分布式绿色能源碳交易机制及碳数据管理的挑战[J]. **上海交通大学学报**, 2022, 56(8): 977-993.
- LI Xingzhi, HAN Bei, LI Guojie, *et al.* Challenges of distributed green energy carbon trading mechanism and carbon data management [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2022, 56(8): 977-993.
- [12] 李林晏, 韩爽, 乔延辉, 等. 面向高比例新能源并网场景的风光-电动车协同调度方法[J]. **上海交通大学学报**, 2022, 56(5): 554-563.
- LI Linyan, HAN Shuang, QIAO Yanhui, *et al.* A wind-solar-electric vehicles coordination scheduling method for high proportion new energy grid-connected scenarios[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2022, 56(5): 554-563.
- [13] 范帅, 危怡涵, 何光宇, 等. 面向新型电力系统的需求响应机制探讨[J]. **电力系统自动化**, 2022, 46(7): 1-12.
- FAN Shuai, WEI Yihan, HE Guangyu, *et al.* Discussion on demand response mechanism for new power systems[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2022, 46(7): 1-12.
- [14] 路尧, 胡健, 张晓杰, 等. 基于DPoA共识机制的分布式电力交易信用激励[J]. **电力自动化设备**, 2022, 42(1): 116-123.
- LU Yao, HU Jian, ZHANG Xiaojie, *et al.* Credit incentives of distributed power transaction based on DPoA consensus mechanism[J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2022, 42(1): 116-123.
- [15] MORSTYN T, MCCULLOCH M D. Multiclass energy management for peer-to-peer energy trading driven by prosumer preferences[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2019, 34(5): 4005-4014.
- [16] WANG T H, GUO J, AI S P, *et al.* RBT: A distributed reputation system for blockchain-based peer-to-peer energy trading with fairness consideration[J]. **Applied Energy**, 2021, 295: 117056.
- [17] 刘俊, 王超, 陈津苑, 等. 基于博弈论的城镇能源互联网多市场主体收益模型[J]. **电力系统自动化**, 2019, 43(14): 90-96.
- LIU Jun, WANG Chao, CHEN Jinchun, *et al.* Game theory based profit model for multiple market entities of urban energy Internet [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2019, 43(14): 90-96.
- [18] CHEN S J, ZHANG L, YAN Z, *et al.* A distributed and robust security-constrained economic dispatch algorithm based on blockchain[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2022, 37(1): 691-700.
- [19] CHEN S J, MI H N, PING J, *et al.* A blockchain consensus mechanism that uses Proof of Solution to optimize energy dispatch and trading[J]. **Nature Energy**, 2022, 7(6): 495-502.
- [20] PING J, YAN Z, CHEN S J. A privacy-preserving blockchain-based method to optimize energy trading [J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2023, 14(2):

1148-1157.

[21] MAZZI N, KAZEMPOUR J, PINSON P. Price-taker offering strategy in electricity pay-as-bid markets[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2018, 33(2): 2175-2183.

[22] BLUMSACK S. Basic economics of power generation, transmission and distribution[DB/OL]. (2022-01-01) [2023-06-26]. <https://www.e-education.psu.edu/eme801/node/530>.

[23] CUNNINGHAM L B, BALDICK R, BAUGHMAN M L. An empirical study of applied game theory: Transmission constrained Cournot behavior[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2002, 17(1): 166-172.

[24] 袁智强, 侯志俭, 宋依群, 等. 考虑输电约束古诺模型的均衡分析[J]. **中国电机工程学报**, 2004, 24(6): 73-79.

YUAN Zhiqiang, HOU Zhijian, SONG Yiqun, *et al.* Analysis of equilibrium of cournot model with considering transmission constraints[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2004, 24(6): 73-79.

[25] SONG Y, ZHENG Y, LIU T, *et al.* A new formulation of distribution network reconfiguration for reducing the voltage volatility induced by distributed generation[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2020, 35(1): 496-507.

[26] LI T, SHAHIDEHPOUR M. Strategic bidding of transmission-constrained GENCOs with incomplete information[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2005, 20(1): 437-447.

[27] JIA Q G, LI Y Y, YAN Z, *et al.* Reactive power market design for distribution networks with high photovoltaic penetration[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2023, 14(2): 1642-1651.

[28] CHEN S J, XU C K, YAN Z, *et al.* Accommodating strategic players in distributed algorithms for power dispatch problems[J]. **IEEE Transactions on Cybernetics**, 2022, 52(11): 12594-12603.

(本文编辑:王历历)