

DOI: 10.7667/PSPC151729

# 含分布式电源接入的市场多主体博弈分析

李刚, 刘继春, 魏震波, 刘俊勇, 刘洋, 李丹, 唐虎

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 研究能源互联网发展背景下含有分布式电源(distributed generation, DG)接入的电力市场中的多主体博弈问题。首先, 利用多代理(multi-agents)技术, 在由发电商、供电商与多类型用户组成的市场中, 搭建了多主体博弈框架。其次, 针对该框架下的市场各主体特点, 分别采用统一市场出清价格(market clearing price, MCP)和按报价支付(pay as bid, PAB)的市场机制, 构建了最优供应函数决策模型、最优投标电价决策模型以及考虑投标风险的最优投标电量决策模型。并且, 基于效用函数, 考虑弹性负荷(具有分布式发电或可中断能力)用户的购售能力, 建立了最优购电和最优 DG 发电量决策模型。最终, 实现了市场各博弈主体的利益均衡化目的。仿真结果表明, 基于多代理技术的博弈能够实现市场各主体的合理收益, 不同主体组合的市场博弈结果存在较明显差异。充分挖掘弹性负荷调节能力可有效提高分布式清洁能源发电渗透率。以上结果符合工程实际与设计需求, 验证了所提模型的合理性与有效性。

**关键词:** 分布式电源; 多代理(multi-agent); 博弈; 强化学习算法

## Analysis of game among multi-agents in electrical power market with integration of distributed generation

LI Gang, LIU Jichun, WEI Zhenbo, LIU Junyong, LIU Yang, LI Dan, TANG Hu

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** This paper researches the game among multi-agents in electric power market with integration of distributed generation under the background of energy internet. First, it builds a game framework which is consisted by generation companies, power suppliers and multiple types of users using multi-agent technique. And then, it adopts the uniform market clearing price and payment as bidding to create a series of models including optimal bidding electricity decision model. These models serve for generators and users who have abilities to electricity with grid according to their features. At the same time, optimal decision model is modeled for customers who can use distributed generation and elastic load to adjust their demands based on the utility function. The interest equalization of the market is successfully achieved through the game theory in our proposed simulations. The experimental results show that all market participants can get reasonable revenue, whilst the outcomes are various in different cooperation scenarios. The results also prove that increasing the flexibility of the load regulation can significantly improve penetration of distributed clean energy.

**Key words:** distributed generation; multi-agent; game; reinforcement learning algorithm

## 0 引言

“能源互联网”被定义为由分布式能量采集装置、分布式能量储存装置和各种类型负载构成的新型电力网络<sup>[1-2]</sup>。它的提出使得以清洁能源为主的分布式能源的高渗透率成为可能。然而, 电网中大量 DG 的接入不仅需要强大的技术支撑, 同时也要建

立良好的市场环境和参与方式<sup>[3-5]</sup>。因此, 研究分布式能源市场参与方式以及参与后对市场的影响, 对促进能源互联网发展具有重要意义。

近年来, 运用博弈论来研究各市场主体之间的相互影响关系, 以模拟市场在不同情况下的形态特征是热点。其主要研究成果可概括为以下 4 类:

第一类, 发电商之间的竞价策略模型研究。主要有古诺模型(基于产量的竞争)、伯川模型(基于价格的竞争)及供应函数模型等。在该类研究中, 博弈

方利用概率论、数理统计和模糊数学等方法预测竞争对手的成本分布和报价策略,并在考虑输电约束、需求函数、风险偏好、期货合同以及系统发生故障等其他因素的基础上,研究单个发电商的最优反应。如文献[6]提出了考虑输电网约束的有限理古诺博弈动态模型;文献[7]则针对实际运营电力市场的需求,研究发电商在期货市场与现货市场的联合竞争问题,建立了一个考虑输电约束的两阶段古诺博弈模型;在此基础上,文献[8]基于多代理技术构建了发电侧的古诺模型博弈仿真平台。文献[9]在考虑双边风险因素与网络阻塞情况下,构建了市场多主体之间的谈判博弈模型。

第二类,配电公司的能量获取模型研究。配电公司策略性的调整每个时段的电量需求将会影响市场电价,并导致发电公司收益发生变化,因此也就会促使发电公司策略性调整报价,从而构成了发电公司与配电公司博弈的基础。该类研究主要集中在配电公司如何利用分布式能源(配电公司拥有)、可中断负荷、期货、储能、分时电价等调节电量需求手段得到与发电公司博弈的最优策略。如文献[10-12]研究了在配电公司拥有可中断负荷时,配电公司收益最大化的能量获取策略模型;文献[13]则考虑了配电公司同时拥有的分布式电源和可中断负荷时,配电公司最优能量获取策略模型。

第三类,发电侧、配电侧、用户侧博弈研究。这类研究主要是通过构建不同的博弈因子来实现上述三个环节的博弈。如文献[14]通过对用户侧实施分时电价来实现博弈;文献[15]通过配电侧大规模电池储能来实现博弈。

第四类,当用户拥有 DG,且彼此之间可以自由进行电能交易时,对不同属性用户售电、购电、用电的博弈策略研究。如文献[16]研究了在“能源互联网”环境下用户广泛拥有 DG,且彼此之间电能允许自由交易时的博弈情况。

总的来说,上述成果为本次研究提供了一定参考,但其中存在问题如下:第1类和第4类研究仅仅考虑了发电侧或用户侧各参与方的博弈,忽略了市场其他参与主体的策略行为;第2类研究通常将供电公司和用户进行捆绑处理,以便于研究供电公司与发电商之间的博弈行为,但忽略了用户与供电公司之间的博弈;第3类研究虽然完善了电力市场中博弈的参与主体,但其博弈因子往往由供电商把控,处理方式过于传统,不能很好契合电力市场逐步放开的新形势,特别是在“能源互联网”环境下大量分布式能源参与市场竞争的实际情况。

综上问题和分析,本文以“能源互联网”发展

背景为依托<sup>[16]</sup>,计及市场各主体(发电商、供电商与用户)特性,新增考虑弹性负荷用户特性,且加入 DG 博弈元素,模拟各主体间的博弈,并借助 Multi-Agent 技术对上述博弈过程进行实现。最后,利用仿真计算校验所提方法和模型的合理性与有效性。

### 1 基于 Multi-Agent 的市场博弈框架

Multi-Agent<sup>[17-19]</sup>是指多个代理通过协作完成共同目标任务的计算系统,其中每个代理成员的目的和行为是相对独立的,彼此的矛盾与冲突通过竞争与磋商等手段协调解决。它适用于多角度或多参与者的实体求解问题。本文基于 Multi-Agent 技术构建市场博弈框架模型,其信息交互如图 1 所示。

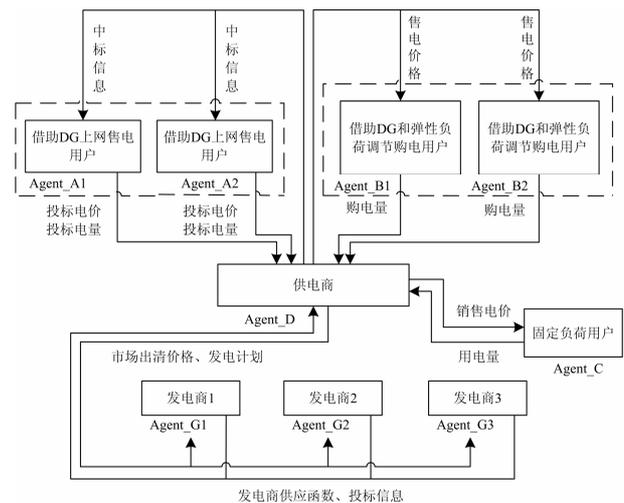


图 1 电力市场博弈框架

Fig. 1 Game framework of electric power market

图中, Agent\_G 为发电商代理; Agent\_D 为供电商代理; Agent\_A、Agent\_B、Agent\_C 为用户代理。

该市场中各博弈主体及其关系设计如下:

1) 各方博弈及其交互设计。

总体上各 Agent 以利益最大化为目标,具体博弈与交互制定如下所述。

(1) 发电商代理。Agent\_G 对竞争对手的竞价策略和 Agent\_D 在发电侧的需求策略作出预测,根据预测结果结合自身发电成本生成由最优供应函数构成的竞价策略,并报送 Agent\_D。

(2) 供电商代理。Agent\_D 接收 Agent\_G、Agent\_A 以及 Agent\_C 报送的信息,并对 Agent\_B 的购电策略做出预测,根据预测结果和接收信息生成由最优出清电价和最优销售电价以及 Agent\_A 中标决策构成的策略,并对策略信息进行发布。

(3) 用户代理。为了表征不同类型用户的策略特点, 首先需要对配置 DG 后的用户属性进行分类处理, 如表 1 所示。

表 1 用户分类

Table 1 Classification of the user

类型	属性配置	收益目标
A	DG	将多余的电能出售给供电商得到额外的收益
B	DG 或弹性负荷	通过调控自身负荷和 DG 发电量使自身的用电成本最低
C	普通负荷	保证供电的可靠性

(a) Agent\_A, A 类用户代理。根据对自身 DG 发电量的预测评估生成最优投标电量, 随后依据最优投标电量和发电侧出清电价的历史数据以及同类竞争对手的历史中标信息生成最优投标电价, 从而生成由投标电量和投标电价构成的投标策略, 并报送 Agent\_D。

(b) Agent\_B, B 类用户代理。根据 Agent\_D 发布的信息, 结合自身 DG 发电量与弹性负荷情况, 作出最优购电决策。

(c) Agent\_C, C 类用户代理。Agent\_C 将固定用电量信息报送 Agent\_D。

## 2) 市场机制选择。

当前市场主流竞价机制主要有 MCP 和 PAB 机制两种<sup>[8]</sup>。本文中发电商采用 MCP 模式, 而 A 用户采用 PAB 模式, 原因在于:

(1) 国内发电竞价 MCP 模式是主流, 较分布式电源相对稳定。

(2) 能源互联网模式下的 A 类用户, 由于其发电容量相对较小, 且具有较强的分散性和随机性特点, 宜采用 PAB 模式。

## 2 市场博弈模型

### 2.1 发电商的博弈模型

发电公司作为集中式发电单元, 通过日前市场竞争向配电公司出售电能<sup>[13]</sup>。假设 Agent\_G<sub>i</sub> 成本函数为<sup>[20]</sup>

$$C_{G_i} = b_i q_{G_i}(p_m) + c_{G_i} q_{G_i}^2(p_m) / 2 \quad (1)$$

式中:  $q_{G_i}(p_m)$  为 Agent\_G<sub>i</sub> 发电量函数;  $p_m$  为市场出清价格;  $b_i$ 、 $c_i$  为 Agent\_G<sub>i</sub> 的成本系数。

则 Agent\_G<sub>i</sub> 的目标函数为

$$\max \pi_{G_i} = p_m q_{G_i}(p_m) - C_{G_i} \quad (2)$$

假设 Agent\_G<sub>i</sub> 对 Agent\_D 在发电侧的需求策略

的预测是关于  $Q_G(p_m)$  的需求电量函数, 有

$$\sum_{i=1}^{I_\Omega} q_{G_i}(p_m) = Q_G(p_m) \quad (3)$$

式中,  $I_\Omega$  为参与市场竞争的发电商数量。

根据博弈论纳什均衡条件, 得到 Agent\_G<sub>i</sub> 的最优策略应满足:

$$\begin{cases} \frac{\partial \pi_{G_i}}{\partial p_m} = \frac{\partial [p_m q_{G_i}(p_m) - C_{G_i}]}{\partial p_m} = 0 \\ \frac{\partial q_{G_i}(p_m)}{\partial p_m} = \frac{\partial [Q_G(p_m) - q_{G_{-i}}(p_m)]}{\partial p_m} = \varphi_i - \phi_i \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $q_{G_{-i}}(p_m)$  为除发电商  $i$  外, 其他发电商总的发电量;  $\varphi_i$  为 Agent\_D 对发电侧需求电量相对于  $p_m$  的微增响应电量;  $\phi_i$  为 Agent\_G<sub>i</sub> 所有竞争对手关于  $p_m$  的微增响应电量。

由式(4)得 Agent\_G<sub>i</sub> 向 Agent\_D 报送的最优供应函数, 即关于 MCP 的电量决策为

$$q_{G_i}(p_m) = \frac{[b_i - p_m][\varphi_i - \phi_i]}{1 - c_i[\varphi_i - \phi_i]} \quad (5)$$

### 2.2 供电商的博弈模型

作为发电商与用户的“中间人”, Agent\_D 的博弈模型是由与购电侧调度决策电量有关的市场出清电价和 A 类用户中标电价以及用户侧的销售电价组成, 故其决策量是电价。前者是在保证系统运行安全的状态下获取成本最低的发电计划; 后者需要结合购电成本和电能销售收益一并考虑, 且其中电能销售收益由销售电量和销售价格两部分决定。因此, Agent\_D 的期望收益目标函数为

$$\begin{cases} \max \pi_D = p Q_U(p) - [p_m \sum_{i=1}^{I_\Omega} q_{G_i}(p_m) + \sum_{w \in J_\Omega} p_{A_w} Q_{A_w}] \\ Q_U(p) = \zeta_B(p_B - p) + Q_B + Q_C \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $p_{A_w}$ 、 $Q_{A_w}$  分别为中标 A 类用户  $w$  的中标价格和中标电量;  $p_B$ 、 $Q_B$  为 Agent\_B 的基准电价和基准负荷常数;  $\zeta_B$  为 Agent\_D 对 Agent\_B 购电策略做出的关于需求价格弹性的预测值;  $J_\Omega$  为参与市场竞争的 A 类用户数量;  $Q_C$  为 Agent\_C 的固定需求电量;  $p$  为 Agent\_D 的售电价格。

Agent\_D 根据期望收益目标函数确定销售电价和 A 类用户投标电价以及发电侧市场出清电价, 从而构成其最优决策。上述目标还需满足系统约束—功率平衡约束和发电量约束, 即

$$\sum_{i=1}^{I_\Omega} q_{G_i}(p_m) + \sum_{w \in J_\Omega} Q_{A_w} = Q_U(p_s) \quad (7)$$

$$q_{G_i}^{\min} \leq q_{G_i}(p_m) \leq q_{G_i}^{\max} \quad (8)$$

## 2.3 用户博弈模型

### 2.3.1 A 类用户博弈模型

由于 DG 实际发电量可能大于或小于投标电量，将导致系统的供需不平衡，引起市场交易成本的升高<sup>[21]</sup>，且会给电网带来电压暂降、频率波动、功率不匹配等问题<sup>[22]</sup>。同时，在完全竞争电力市场环境下，必须保证各竞争主体严格依据市场环境和自身条件制定投标电量与电价。因此，设计如下三条措施以引导 A 类用户选择合理投标发电量和投标电价。

- 1) 当实际发电量大于投标量时，禁止该用户直接将该部分电能输入电网；
- 2) 当实际发电量小于竞标电量时，该用户需要支付一定费用，用于向市场购买备用型辅助服务；
- 3) 当用户报价高于市场实际出清电价时，即认为该用户投标不中。

Agent\_A 的收益与自身的投标电价、投标电量、实际发电量和可能承担的投标风险成本有关。其期望收益的目标函数如下

$$\max \pi_{A_j} = p_{A_j} Q_{A_j} - p_p \sum_{s=1}^{S_\Omega} \rho_{A_j}^s \Delta Q_{A_j}^s - C_{A_j}(Q_{A_j}) \quad (9)$$

式中： $\rho_{A_j}^s$  为对 Agent\_A<sub>j</sub> 出现场景  $s$  的概率； $p_{A_j}$ 、 $Q_{A_j}$  分别为 Agent\_A<sub>j</sub> 的投标电价与投标电量； $S_\Omega$  为场景个数， $p_p$  为因随机波动所需支付的惩罚性电价； $C_{A_j}$  为 Agent\_A<sub>j</sub> 的 DG 发电成本函数； $\Delta Q_{A_j}^s$  为 Agent\_A<sub>j</sub> 发电量在场景  $s$  下的随机波动量，它的计算方法如下：

$$\Delta Q_{A_j}^s = \begin{cases} 0 & Q_{A_j}^s \geq Q_{A_j} \\ Q_{A_j} - Q_{A_j}^s & Q_{A_j}^s < Q_{A_j} \end{cases} \quad (10)$$

式中， $Q_{A_j}$  为 Agent\_A<sub>j</sub> 在场景  $s$  下的实际发电量。

根据上文中第 3 条设计，Agent\_A<sub>j</sub> 的投标电价须小于或等于最终的发电侧市场出清价格，否则投标不中。显然，在投标电价等于发电侧市场出清价格时，Agent\_A<sub>j</sub> 能获得最大收益。因此，在投标时 Agent\_A<sub>j</sub> 需要对市场出清价格进行动态预测，同时对前次博弈过程中获得利润的其他同类用户进行模拟学习，并根据学习和预测到的知识，调整本次投标电价，以保证中标，实现利益最大化。因此，设计预测与模仿学习特性的回归函数为

$$p_{A_j} - p'_{A_j} = \lambda_0 + \lambda_1(p'_m - p'_{A_j}) + \lambda_2(p'_{A_{\max}} - p'_{A_j}) + \lambda_3[p'_{A_{\text{ave}}} - p'_{A_j}] \quad (11)$$

式中： $p'_m$  为上一轮博弈的出清电价，也为 Agent\_A<sub>j</sub> 在上一轮博弈的最优投标电价； $p'_{A_{\max}}$  为上一轮博弈中 A 类用户最高的中标电价，对应 Agent\_A<sub>j</sub> 模仿最优行为； $p'_{A_{\text{ave}}}$  为上一轮所有 A 类中标用户的平均投标价格，对应 Agent\_A<sub>j</sub> 模仿平均行为； $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  为对应的相关系数，它们的不同取值反映了 Agent\_A<sub>j</sub> 对待 3 种学习效应的心理态度。

最终，Agent\_A<sub>j</sub> 可以通过式(11)求解得到最优投标电价  $p_{A_j}$ ，然后根据式(9)、式(10)求解出最优投标电量  $Q_{A_j}$ ，即得到最优投标策略  $\{p_{A_j}, Q_{A_j}\}$ 。

### 2.3.2 B 类博弈模型

本文只考虑以储能、天然气等高发电成本的可控型 B 类用户，忽略以光伏、风能等低发电成本的不可控型 B 类用户，原因在于低发电成本 B 类用户的 DG 往往处于满发状态，其实际属性等同于 C 类用户。B 类用户看成是具有需求价格弹性的用户，其用电量严格依据配电商的售电电价与自身 DG 发电情况，所以与其对应的决策量是电量。B 类用户根据 Agent\_D 发布售电价格，以用电效益最大为目标，优化该期购电计划和自身 DG 发电量。Agent\_B<sub>k</sub> 在不同用电量下效用函数可以表述为如下二次形式

$$\begin{cases} g(Q_{B_k}) = Q_{B_k} (\xi_k^{-1} Q_{B_k}^{\text{exp}} + p_{B_k}^{\text{exp}}) - \frac{1}{2} (Q_{B_k})^2 \xi_k^{-1} \\ Q_{B_k} = Q_{B_k}^{\text{buy}} + Q_{B_k}^{\text{DG}} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $Q_{B_k}^{\text{exp}}$  和  $p_{B_k}^{\text{exp}}$  分别为 Agent\_B<sub>k</sub> 的期望负荷和期望用电价格常数； $Q_{B_k}$  为 Agent\_B<sub>k</sub> 的实际用电量，是其购电量  $Q_{B_k}^{\text{buy}}$  与自身 DG 发电量  $Q_{B_k}^{\text{DG}}$  之和； $\xi_k$  为 Agent\_B<sub>k</sub> 的用电价格敏感系数。

Agent\_B<sub>k</sub> 的用电效益目标函数为

$$\max \pi_{B_k} = g(Q_{B_k}) - p Q_{B_k}^{\text{buy}} - C_{B_k}(Q_{B_k}^{\text{DG}}) \quad (13)$$

DG 发电量约束

$$Q_{B_k}^{\min \text{DG}} \leq Q_{B_k}^{\text{DG}} \leq Q_{B_k}^{\max \text{DG}} \quad (14)$$

Agent\_B<sub>k</sub> 在满足 DG 发电量约束条件下，根据式(12)、式(13)决策购买电量  $Q_{B_k}^{\text{buy}}$  与自身 DG 发电量  $Q_{B_k}^{\text{DG}}$ ，即得到最优用电策略  $\{Q_{B_k}^{\text{buy}}, Q_{B_k}^{\text{DG}}\}$ 。

### 2.3.3 C 类博弈模型

由于 C 类用户没有可以用来调控负荷需求的可变负荷或 DG，因此其用电策略固定。

## 3 仿真计算与流程

本文在基于 JAVA 语言 JADE 的开发平台上构建了市场博弈仿真模型。由于 Agent\_G、Agent\_D

以及 Agent\_A 在生成自身最优策略时无法准确得到本轮博弈过程中反映竞争对手策略或市场环境的相关参量, 需要进行预测处理, 因此本文在这三类 Agent 中嵌入强化学习算法<sup>[23]</sup>, 并调用商业规划软件 Lingo 对 Agent\_G、Agent\_D、Agent\_A 以及 Agent\_B 内的数学模型进行求解。具体步骤如图 2。

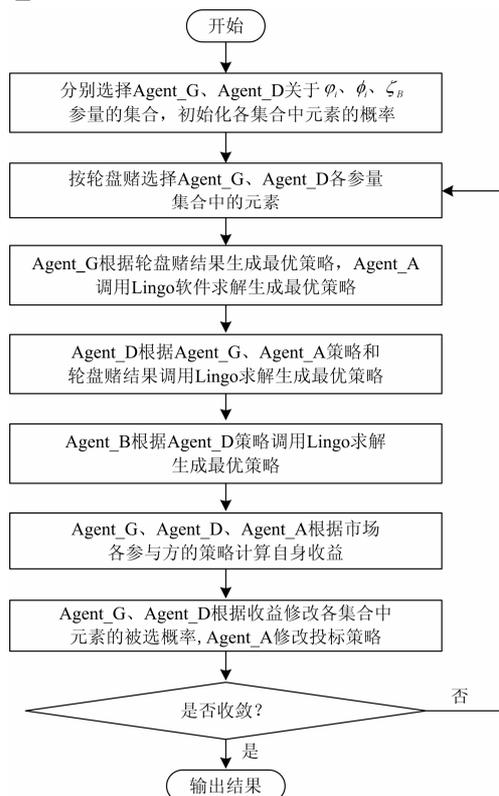


图 2 仿真求解流程图

Fig. 2 Calculation flow chart of simulation

## 4 算例分析

### 4.1 场景计算

如图 3 所示, 以文献[11]所设计的 8 节点系统为例进行市场模拟。在该系统中,  $G_2$ 、 $G_5$ 、 $G_7$  为发电商,  $DG_2$ 、 $DG_5$ 、 $DG_6$  为可忽略发电成本的 PV 和风机型 A 类用户, 节点 3、4、8 为 B 类用户,  $L_1$ 、 $L_2$  为需求电量 30 MWh 的 C 类用户, 供电商的基准电价为 45 \$/MWh, 基准电量为 200 MWh, 发电商与 B 类用户的运行参数具体如表 2、表 3 所示。

表 2 发电商基本参数

Table 2 Basic parameter of generation company

发电商	$c/$ (\$/(MWh) <sup>2</sup> )	$b/$ (\$/MWh)	$q_{min}/$ MWh	$q_{max}/$ MWh
$G_2$	0.16	24.62	0	62
$G_5$	0.22	23.35	0	58
$G_7$	0.166	21.39	0	80

表 3 B 类用户基本参数

Table 3 Basic parameter of class B

B 类用户	类型	成本/ (\$/MWh)	发电量/ MWh	期望电价/ (\$/MWh)	期望用电量/ MWh
$DG_3$ 、 $L_3$	储能	50	0 至 5	45	58
$DG_4$ 、 $L_4$	储能	0	0 至 8	52	63
$DG_8$ 、 $L_8$	储能	25	0 至 10	55	65

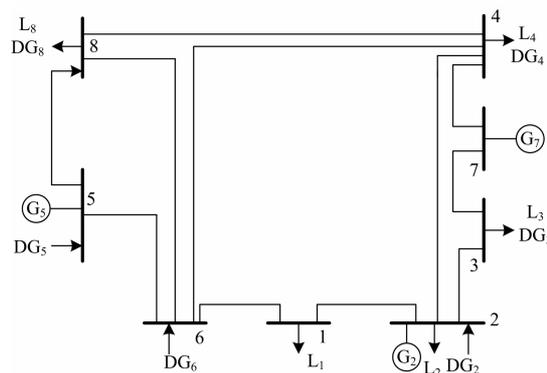


图 3 8 节点系统图

Fig. 3 Eight-bus system network

研究认为 PV 和风机预测误差满足正态分布<sup>[24-25]</sup>, 因此可以通过随机抽样产生相应样本。假设  $DG_2$ 、 $DG_5$ 、 $DG_6$  的预测发电量分别为 8 MWh、6 MWh、8 MWh, 采用拉丁超立方抽样方法分别生成方差为 20% 的原始场景集<sup>[26]</sup>, 每个场景集中的场景数量为 1 000 个, 如图 4 所示。

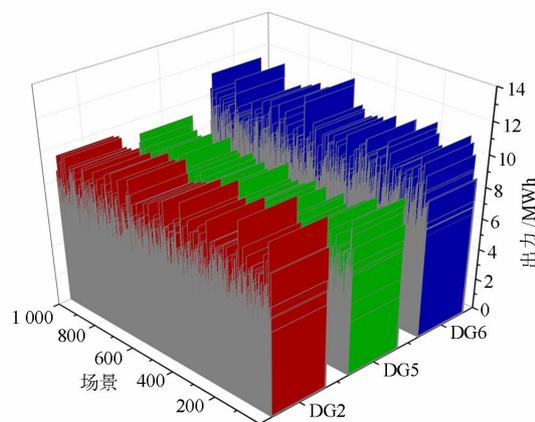


图 4 A 类用户发电量场景集

Fig. 4 Output power scenarios of class A

采用文献[21]所提方法对原始场景集进行削减, 削减结果如表 4 所示。

考虑到发电商间存在合作博弈可能, 因此需要进行分类讨论。

### 4.2 发电商非合作博弈

根据研究经验, 设定 Agent\_G 强化学习算法遗

表 4 削减后的 A 类用户发电量场景集

场景集	DG <sub>2</sub> /MWh	DG <sub>5</sub> /MWh	DG <sub>6</sub> /MWh
场景 1	9.1	6.9	8.9
场景 2	6.8	5.3	7.3
场景 3	6.3	4.2	9.3
场景 4	7.9	4.7	8.1
场景 5	8.4	5.8	7.8

忘系数为 0.05, 经验参数为 0.95; Agent\_D 对应的参数分别为 0.021、0.979。DG<sub>2</sub>、DG<sub>5</sub>、DG<sub>6</sub>的初始投标电价分别为 40 \$/MWh、35 \$/MWh、30 \$/MWh。 $\lambda_0$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$  分别取为 0.260、1.330、0.078、0.194; 通过仿真求解, 得到发电侧市场出清电价与 A 类用户投标电价的博弈曲线, 如图 5 所示。并求解出在惩罚电价为 100 \$/MWh 时, A 类用户最优的投标电量依次为 7.1 MWh、5.3 MWh、7.7 MWh。

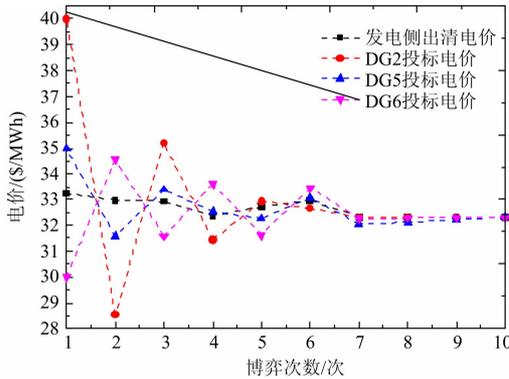


图 5 市场出清电价与用户投标电价  
Fig. 5 Game results of MCP and PAB

可以看出, 在第一次博弈中, 由于 DG<sub>2</sub>、DG<sub>5</sub> 的投标电价过高, 出现了投标不中的情况, 而 DG<sub>6</sub> 虽然中标, 但投标电价稍稍偏低, 其利润还有上升的空间。因此, 在第二次博弈中上述三方分别吸取第一次博弈中的经验教训, 调整自身策略以谋求最大利润。具体博弈行为为: DG<sub>2</sub>、DG<sub>5</sub> 在第二次博弈中大幅度降低其投标电价, 避免出现在前次博弈中投标不中的情况, 尤其是 DG<sub>2</sub> 降幅达到了 11.5 \$/MWh, 虽然这样调整达到了中标的目的, 但其投标电价远低于发电侧市场出清电价(即最优投标电价), 严重影响其应有的收益, 不是最优策略; 而 DG<sub>6</sub> 对于前次投标电价稍稍偏低的情况做出了调整, 但调整幅度过大, 以至于投标不中。在经过 7 轮上述博弈后, A 类用户的投标电价趋于最优, 即收敛于发电侧市场出清电价的均衡值。

其次, 对供电商和 B 类用户参与市场博弈结果

进行分析如图 6、图 7 所示。

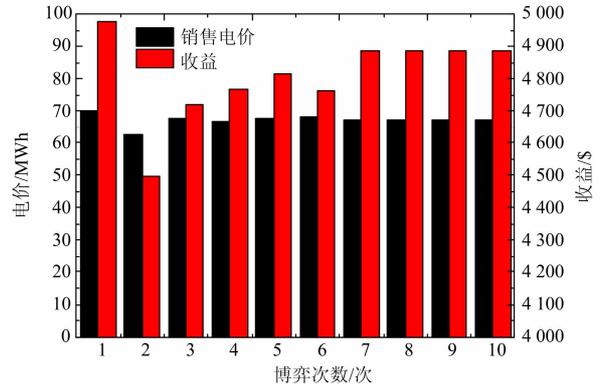


图 6 供电商参与市场的博弈结果  
Fig. 6 Game results of power supply business

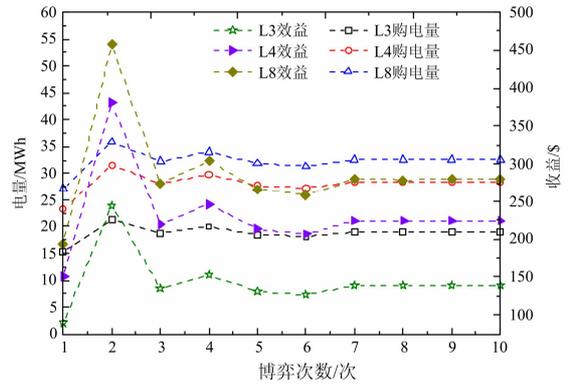


图 7 B 类用户参与市场的博弈结果  
Fig. 7 Game results of class B

可以看出, 在第一次博弈时, 销售电价最高供电商的收益最大, 对应于 B 类用户的购电量最小效益最低; 而在第二次博弈时, 销售电价最低而供电商的收益最小, 对应于 B 类用户的购电量最大效益最高。通过前两次博弈可以得出本文所提的上述博弈模型符合市场博弈规律。同样, 可以从两图看出, 在第 7 次博弈时, 两类市场参与方的策略初步达到均衡。在本阶段博弈过程中, 本文假设当销售电价高于 B 类用户 DG 的单位发电成本时, B 类用户投 DG, 因此, DG<sub>3</sub>、DG<sub>4</sub>、DG<sub>8</sub> 都为满发。

进一步, 对发电商参与每次博弈的发电量与收益进行分析, 结果如表 5 所示。

可以看出, 均衡解所对应的发电商利润与发电量的大小关系依次为 G<sub>7</sub> 最大、G<sub>5</sub> 次之、G<sub>2</sub> 最小; 且对比表 2 可知, 出现上述现象是因为 G<sub>7</sub> 发电成本系数最低、G<sub>5</sub> 次之、G<sub>2</sub> 最高。然而 G<sub>7</sub> 发电成本系数虽最低, 但其发电量远低于满发状态, 这是因为发电成本是关于发电量的二次函数, 所以当 G<sub>7</sub> 发电量高于其他发电商时, 即使其成本系数很低,

也会出现其单位发电成本高于其他发电商的情况, 因此供电商会对  $G_7$  出清电量进行限制。

表 5 发电商参与市场竞争的博弈结果

Table 5 Game results of generation company

次数	$G_2$ 利润/\$	$G_5$ 利润/\$	$G_7$ 利润/\$	$G_2$ 发电量/MWh	$G_5$ 发电量/MWh	$G_7$ 发电量/MWh
1	215.62	210.74	394.27	39.41	34.95	52.73
2	191.14	202.54	375.91	38.13	33.96	51.48
3	203.32	200.77	379.68	39.75	35.82	53.74
4	175.76	176.85	360.96	36.40	32.98	61.78
5	192.60	191.52	364.88	38.38	34.65	52.28
6	204.17	201.37	380.37	39.40	35.36	53.22
7	173.83	175.18	339.13	36.31	32.93	50.2
8	173.80	175.20	339.15	36.30	32.95	50.2
9	174.00	175.20	339.00	36.31	32.95	50.2
10	174.00	175.20	339.00	36.31	32.95	50.2

#### 4.3 发电商合作博弈

在完全自由竞争的市场环境里, 发电商可以通过对所属机组联合优化调度, 形成合作联盟, 从而降低彼此的发电成本, 同时减小在博弈过程中对市场评估的误差, 提高策略的精准度, 进而达到双赢的目的。在本文所提算例中, 构成不同联盟的基本参数如表 6 所示。

表 6 不同联盟下发电商的基本参数

Table 6 Basic parameter of generation company under different leagues

联盟组成	c \$(MWh)^2\$	b \$/MWh	$q_{min}/$ MWh	$q_{max}/$ MWh
$G_2$ 、 $G_5$	22.12	0.13	0	120
$G_2$ 、 $G_7$	20.33	0.19	0	142
$G_5$ 、 $G_7$	19.79	0.24	0	138
$G_2$ 、 $G_5$ 、 $G_7$	21.42	0.16	0	200

计算不同联盟下市场出清电价的博弈结果如图 8 所示。结合图 5 可以看出,  $G_5$  与  $G_7$  联盟对发电侧的影响最小, 而  $G_2$  与  $G_5$  联盟对发电侧的影响最大,

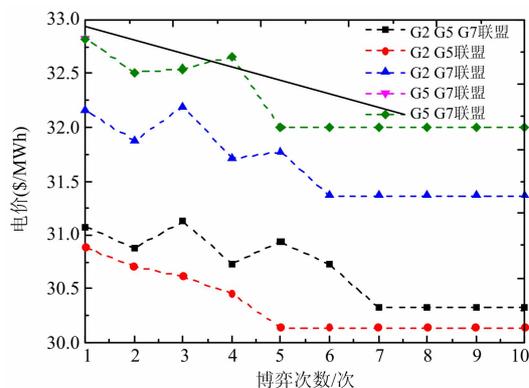


图 8 不同联盟下市场出清电价博弈结果

Fig. 8 Game results of MCP under different leagues

这说明发电商不同合作策略下对整个发电侧市场的影响是不同的, 因此发电商需要在考究自身利益的情况下, 选择最佳合作对象。

对上述不同博弈次数下的联盟收益进行计算, 结果如表 7 所示。

表 7 不同联盟下发电商参与市场竞争的博弈结果

Table 7 Game results of generation company under different leagues unit: \$

次数	利润						
	$G_2$ 、 $G_5$ 联盟	$G_7$	$G_2$ 、 $G_7$ 联盟	$G_5$	$G_5$ 、 $G_7$ 联盟	$G_2$	$G_2$ 、 $G_5$ 、 $G_7$ 联盟
1	535.5	252.8	698.2	169.0	682.2	195.9	813.8
2	514.9	243.4	698.2	158.3	649.7	181.2	781.3
3	515.0	243.0	701.5	170.1	653.1	182.7	823.2
4	491.4	233.3	650.7	153.2	668.0	189.6	763.4
5	455.0	217.6	657.3	155.3	597.0	157.9	797.2
6	455.0	217.6	611.9	140.8	597.0	158.0	763.5
7	455.0	217.6	611.9	140.9	597.0	158.0	698.1
8	455.0	217.6	611.9	140.9	597.0	158.0	698.0
9	455.0	217.6	611.9	140.9	597.0	158.0	698.0
10	455.0	217.6	611.9	140.9	597.0	158.0	698.0

对比表 5 可以看出, 不同联盟下最终总的均衡收益与三者各自为政时总的均衡收益的差额依次分别为 105.8 \$、98.9 \$、84 \$、9.8 \$, 这说明任意两发电商组成联盟, 都会使彼此的利润得到较大提升, 而所有发电商组成的大联盟反而不能起到提高收益的作用。因此, 发电商在选择合作时, 更偏向于两方合作, 对于不能明显增加收益的三方合作, 即使达成联盟, 也会在随后的博弈中破裂, 重新回归两方合作状态, 这是由合作博弈所提出的个体理性所决定的, 而对于哪两家发电商能组成稳定联盟, 就要依据形成联盟后具体的利润分配方案而定。

## 5 结论

本文建立了传统发电商、供电商以及具有分布式发电能力用户的博弈模型。对拥有 DG 后不同属性的用户, 进行了分类处理, 并给出了不同类别用户参与市场博弈的最优策略, 同时也给出了传统发电商和供电商在该市场结构下的最优博弈策略。通过仿真模拟分析, 可以得出以下结论:

1) 市场各参与主体, 能够在本文所提市场结构和规则下, 采用上述博弈模型所得出的最优博弈策略参与市场竞争, 并获得合理的收益。

2) 发电商可以与竞争对手的合作, 形成联盟参与市场博弈。选择不同合作对象能改变自身收益, 对市场博弈结果产生直接影响。

3) 通过市场调控手段(利益驱使), 可以调动用户参与分布式清洁能源建设的积极性, 进而影响能

源发展的经济效益与社会效益, 为当前电力市场发展提供参考。

### 参考文献

- [1] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 702-713.  
CHA Yabing, ZHANG Tao, HUANG Zhuo, et al. Analysis of energy internet key technologies[J]. China Science: Information Science, 2014, 44(6): 702-713.
- [2] 林川, 赵海, 刘晓, 等. 能源互联网路由策略研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 37-44.  
LIN Chuan, ZHAO Hai, LIU Xiao, et al. Research on routing strategy for intergrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 37-44.
- [3] 郭红霞, 白浩, 刘磊, 等. 统一电能交易市场下的虚拟电厂优化调度模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 136-145.  
GUO Hongxia, BAI Hao, LIU Lei, et al. Optimal scheduling model of virtual power plant in a unified electricity trading market[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 136-145.
- [4] 赵珊珊, 张东霞, 印永华, 等. 风电的电价政策及风险管理策略[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 142-145.  
ZHAO Shanshan, ZHANG Dongxia, YIN Yonghua, et al. Pricing policy and risk management strategy for wind power considering wind integration[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 142-145.
- [5] 罗旭, 马珂. 美国德克萨斯州电力可靠性委员会在风电调度运行管理方面的经验和启示[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 140-146.  
LUO Xu, MA Ke. Experience and enlightenment in operations of wind generation in ERCOT grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 140-146.
- [6] 杨洪明, 赖明勇. 考虑输电约束的电力市场有限理性古诺博弈的动态演化研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 71-79.  
YANG Hongming, LAI Mingyong. Research on dynamics of cournot game with bounded rationality considering transmission constraints in power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 71-79.
- [7] 王瑞庆, 李渝曾, 张少华. 考虑输电约束的期权市场与现货市场联合均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 35-39.  
WANG Ruiqing, LI Yuzeng, ZHANG Shaohua. Joint equilibrium analysis of option and spot markets considering transmission constrain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 35-39.
- [8] 杨光, 俞集辉. 电力市场中发电商的策略性竞价行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.  
YANG Guang, YU Jihui. Study on strategic bidding behavior of generation companies in electricity markets[D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.
- [9] YU N, TEFATSION L, LIU C. Financial bilateral contract negotiation in wholesale electricity markets using Nash bargaining theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 251-267.
- [10] PALMA-BEHNKE R, VARGAS L S, JOFRE A. A distribution company energy acquisition market model with integration of distributed generation and load curtailment options[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1718-1727.
- [11] 李海英, 李渝曾, 张少华. 具有分布式发电和可中断负荷选择的配电公司能量获取模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 88-93.  
LI Haiying, LI Yuzeng, ZHANG Shaohua. An energy acquisition model for a distribution company with distributed generation and interruptible load options[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 88-93.
- [12] LI H, LI Y, LI Z. A multi-period energy acquisition model for a distribution company with distributed generation and interruptible load[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(2): 588-596.
- [13] 杨彦, 陈皓勇, 张尧, 等. 计及分布式发电和不完全信息可中断负荷选择的电力市场模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 15-24.  
YANG Yan, CHEN Haoyong, ZHANG Yao, et al. An electricity market model with distributed generation and interruptible load under incomplete information[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 15-24.
- [14] 李俊, 刘俊勇, 谢连芳, 等. 发电侧与供电侧分时电价动态博弈联动研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 16-19.  
LI Jun, LIU Junyong, XIE Lianfang, et al. Dynamic game linkage of TOU pricing between generating side and retail side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 16-19.
- [15] 崔强, 王秀丽, 刘祖永. 市场环境下计及储能电站运行的联动电价研究及其效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 62-68.  
CUI Qiang, WANG Xiuli, LIU Zuyong. Study on linkage electricity price and benefit analysis considering energy storage station operation in market environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 62-68.
- [16] SU W, HUANG A Q. Proposing an electricity market framework for the energy internet[C] // Power and Energy Society General Meeting (PES), 2013 IEEE.

- IEEE, 2013: 1-5.
- [17] 李文云, 蒋亚坤, 雷炳银, 等. 基于 Multi-Agent 系统的含分布式电源电网能源优化管理[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 21-27.  
LI Wenyun, JIANG Yakun, LEI Bingyin, et al. MAS based energy management strategies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 21-27.
- [18] 李中雷, 宋蕙慧, 曲延滨. 基于母线 Agent 的微电网孤岛协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 370-376.  
LI Zhonglei, SONG Huihui, QU Yanbin. A coordinate control strategy of islanded microgrid based on bus agent[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 370-376.
- [19] 窦春霞, 李娜, 徐晓龙. 基于多智能体系统的微电网分散协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(7): 125-134.  
DOU Chunxia, LI Na, XU Xiaolong. Multi-agent system based decentralized coordinated control strategy for micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(7): 125-134.
- [20] 文旭, 郭琳, 王俊梅. 面向节能减排的电力系统发购电计划研究述评[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 136-144.  
WEN Xu, GUO Lin, WANG Junmei. Overview of power dispatch and purchasing plan in power system from energy-saving and emission-reducing[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 136-144.
- [21] 李丹, 刘俊勇, 刘友波, 等. 考虑风储参与的电力市场联动博弈分析[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1001-1007.  
LI Dan, LIU Junyong, LIU Youbo, et al. Electric power market linkage game including wind power and energy storage[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1001-1007.
- [22] 成思琪, 刘俊勇, 向月, 等. 微网中混储/柴协调运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 42-50.  
CHENG Siqi, LIU Junyong, XIONG Yue, et al. Research on optimal coordinated operation for microgrid with hybrid energy storage and diesel generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 42-50.
- [23] 华栋. 电力市场交易机制的实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.  
HUA Dong. Studies on trading mechanism of electricity market based on the simulation approach[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [24] 林少伯, 韩民晓, 赵国鹏, 等. 基于随机预测误差的分布式光伏配网储能系统容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 25-33.  
LIN Shaobo, HAN Minxiao, ZHAO Guopeng, et al. Capacity allocation of energy storage in distributed photovoltaic power system based on stochastic prediction error[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 25-33.
- [25] 高亚静, 李瑞环, 梁海峰, 等. 考虑间歇性电源与负荷不确定性情况下基于多场景技术的主动配电系统两步优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1657-1665.  
GAO Yajing, LI Ruihuan, LIANG Haifeng, et al. Two step optimal dispatch based on multiple scenarios technique considering uncertainties of intermittent distributed generations and loads in the active distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1657-1665.
- [26] 张放, 刘继春, 高红均, 等. 基于风电不确定性的电力系统备用容量获取[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 14-19.  
ZHANG Fang, LIU Jichun, GAO Hongjun, et al. Reserve capacity model based on the uncertainty of wind power in the power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 14-19.

收稿日期: 2015-09-26; 修回日期: 2016-03-28

作者简介:

李刚(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析及主动配电网; E-mail: LiGang9018@163.com

刘继春(1975-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, IEEE 会员, 研究方向为电力系统分析及电力市场;

魏震波(1978-), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为复杂系统及其理论、电力系统安全稳定分析与控制及电力市场。E-mail: weizhenbo@scu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)