

# 基于通用博弈模型的电力市场均衡对比分析

李清清, 周建中, 莫莉, 罗志猛, 张勇传

(华中科技大学 水电与数字化工程学院, 湖北省 武汉市 430074)

## Contrastive Analysis on Electricity Market Equilibrium Based on General Game Model

LI Qing-qing, ZHOU Jian-zhong, MO Li, LUO Zhi-meng, ZHANG Yong-chuan

(College of Hydroelectric and Digitalization Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

**ABSTRACT:** Utilizing the general game model, it is researched whether the impact of competitors' bidding behavior on market equilibrium is taken into account or not during drafting bidding strategy of generation companies (gencos). By means of establishing general game model of gencos in day-ahead market, the market clearing result is solved; and then the optimal strategies of gencos are derived while two conditions that the competitors' behavior is taken into account or not, and it is pointed out that the market equilibrium under the two conditions corresponds to the equilibrium outcomes of Cournot model and supply function model, so the monotonicity of clearing results such as market clearing price, gencos' trading quantity of electricity and income to gencos' strategy parameters is proved; thus the variation trends of various market clearing outcomes under the variation of gencos' strategic parameters are determined, and accordingly the market equilibrium in different condition is compared under the symmetrical generation cost case and leader-follower case. Results of calculation example verify corresponding conclusions.

**KEY WORDS:** general game model; market equilibrium; optimal strategy; change trend; leader-follower structure

**摘要:** 根据通用博弈模型研究发电商在制定竞价策略时是否考虑竞争对手行为对市场均衡的影响。通过建立日前市场发电商的通用博弈模型, 求解出市场出清结果, 继而推导发电商在不考虑和考虑竞争对手行为 2 种情况下的最优策略, 指出这 2 种情况下的市场均衡分别对应 Cournot 模型和供给函数模型的均衡结果, 证明了市场出清电价、发电商的上网电量和收益等出清结果对发电商策略参数的单调性, 从而确定发电商策略参数变化时各种市场出清结果的变化趋势, 并据

此在成本对称和领导-跟随者 2 种常见成本结构下对不同情况下的市场均衡进行对比。算例验证了上述结论。

**关键词:** 通用博弈模型; 市场均衡; 最优策略; 变化趋势; 领导者-跟随者结构

## 0 引言

在竞价上网的电力市场环境下, 发电商为了获得最大收益, 会根据市场信息对自身策略进行优化。当所有发电商都没有动机单方面改变自身竞价策略时, 即均认为自身已获得最大收益时, 电力市场达到均衡。市场均衡及其变化规律蕴含了丰富而直观的决策支持信息, 是电力市场中的各种利益主体和系统主体制定各种市场优化运营策略的基础, 因此亟须深入研究。

目前, 各种竞争博弈模型被广泛应用于电力市场均衡研究<sup>[1-3]</sup>, 主要包括 Cournot 模型<sup>[4]</sup>、Stackelberg 模型<sup>[5]</sup>和供给函数模型<sup>[6-14]</sup>等。文献[1-2]介绍了通过求解博弈均衡制定发电商最优竞价策略的方法。文献[3]较全面地分析了各种电力市场博弈均衡模型, 并总结了 Cournot 模型和供给函数模型在市场不完善性分析、市场仿真和风险分析等方面的应用。文献[4]通过推导 Cournot 模型的均衡解, 对市场均衡状态下各种出清结果的极限和变化趋势等特性进行了分析。文献[5]利用 Stackelberg 模型对现货市场中有决策先后顺序的水火电博弈过程进行建模, 并推导了不同条件下模型的均衡解。在供给函数模型中, 线性供给函数模型在电力市场均衡求解及其特性分析方面应用广泛。文献[6]指出了线性供给函数相对 Cournot 模型、多主体仿真等模型在电力市场建模分析中的优势, 并建立了线性供给函数的基本理论。文献[7]验证了线性供给函数的存在性、唯一性和稳定性。文献[8]指出, 当考虑容量限

**基金项目:**“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2008BAB29B08); 国家自然科学基金项目(50539140); 科技部水利部公益性行业科研专项(200701008)。

Key Project of the National Eleventh-Five Year Research Program of China(2008BAB29B08); Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50539140).

制时存在多个市场均衡,并给出稳定均衡点的求解方法。文献[9-10]分析了发电侧市场中输电约束和发电商竞价行为(市场力)对电价和发电商收益的影响。文献[11]通过对不同远期合约比例下发电商最优竞价策略的求解,得出了远期合约能抑制发电商在现货市场行使市场力的结论。文献[12-13]建立了发电企业供给函数博弈模型,并得出需求价格弹性越大、市场均衡价格越低的结论。文献[14]利用线性供给函数模型讨论了重复竞价模式下发电商学习对市场均衡的影响。

上述文献利用不同均衡模型对电力市场均衡进行分析,但对不同均衡模型及其结果的异同进行分析的研究较少。因此,本文建立现货市场发电商的通用博弈模型,通过求解在不同情况下发电商的最优竞价策略,得出与各种典型博弈模型一致的市场均衡结果,继而根据通用博弈模型分析发电商考虑竞争对手行为对竞价结果及对不同成本结构下市场均衡的影响。

### 1 日前市场通用博弈模型

考虑电力库模式的日前市场主体包括交易中心和发电商,其中交易中心代表电力用户购电,发电商通过竞争获取上网电量。电力库模式现货市场的交易流程如图1所示。

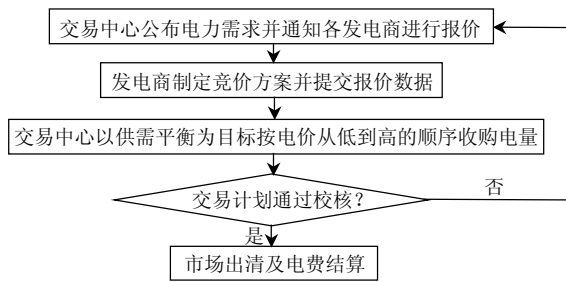


图1 电力库模式现货市场的交易流程

Fig. 1 The transaction process of power pool type day-ahead electricity market

第*i*个独立发电商的收益函数为

$$U_i(q_i) = Pq_i - C_i(q_i) \quad (1)$$

式中:*i*为发电商编号,*i*=1,2,...,*n*; *P*为市场出清电价; *U<sub>i</sub>*和 *q<sub>i</sub>*分别为第*i*个发电商的收益和上网电量; *C<sub>i</sub>*为第*i*个发电商的成本函数,表示为

$$C_i(q_i) = a_i + b_i q_i + 0.5c_i q_i^2 \quad (2)$$

式中:*c<sub>i</sub>*和 *b<sub>i</sub>*为发电商可变成本系数, *c<sub>i</sub>*>0, *b<sub>i</sub>*>0; *a<sub>i</sub>*为发电商固定成本参数, *a<sub>i</sub>*>0。发电商的竞价策略表示为

$$p_{bi} = \alpha_i q_i + b_i \quad (3)$$

式中:*p<sub>bi</sub>*为第*i*个发电商的报价; *a<sub>i</sub>*为第*i*个发电商的策略参数, *α<sub>i</sub>*>0。

在价格-需求函数中考虑电力需求价格弹性,将其表示为

$$P(q_1 + q_2 + \dots + q_n) = \gamma + \beta(q_1 + q_2 + \dots + q_n) \quad (4)$$

式中:*γ*为最高电价, *γ*>*b<sub>i</sub>*,其中*i*=1,2,...,*n*; *β*为表征需求价格弹性的系数, *β*<0。交易中心以供需平衡进行市场出清后,所有发电商以市场出清电价结算,其上网电量为

$$q_i = (P - b_i) / \alpha_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得市场出清电价,即

$$P = \left( \frac{\gamma}{\beta} - \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{\alpha_i} \right) / \left( \frac{1}{\beta} - \sum_{i=1}^n \frac{1}{\alpha_i} \right) \quad (6)$$

联立式(1)(5)(6)可得

$$U_i = \left[ \frac{\gamma - b_i}{\beta} - \sum_{j=1}^n \frac{b_j - b_i}{\alpha_j} \right]^2 \left( \alpha_i - \frac{1}{2} c_i \right) - a_i \quad (7)$$

对式(7)求导并令导数为0,可得第*i*个发电商取得最优报价策略的必要条件,即

$$\frac{\partial U_i}{\partial \alpha_i} = \frac{\left( \frac{\gamma - b_i}{\beta} - \sum_{j=1}^n \frac{b_j - b_i}{\alpha_j} \right)^2}{\left( \frac{\alpha_i}{\beta} - \sum_{j=1}^n \frac{\alpha_i}{\alpha_j} \right)^3} \cdot \left[ (\alpha_i - c_i) \left( \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{\alpha_j} - \frac{1}{\beta} \right) - 1 \right] = 0 \quad (8)$$

根据式(8)推导出发电商最优策略参数,即

$$\alpha_i^* = c_i - \frac{1}{\frac{1}{\beta} - \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{\alpha_j}} \quad (9)$$

各发电商采用式(9)所示的最优策略参数时,均能获得最大收益,因此没有单方面改变策略的动机,即当所有发电商策略参数同时满足式(9)时,市场达到均衡。

### 2 考虑竞争对手行为对市场出清结果的影响

发电商在制定最优竞价策略时,会根据不同市场条件,选择是否考虑竞争对手行为的影响。不同选择将对应不同的市场出清结果。

在信息缺失或决策成本过高的情况下,发电商在制定竞价决策时会忽略竞争对手的影响。此时,式(9)可化为

$$\alpha_{i,c}^* = c_i - \beta \quad (10)$$

式中  $\alpha_{i,c}^*$  为第  $i$  个发电商不考虑竞争对手行为时的最优策略参数，下标  $c$  表示发电商不考虑竞争对手行为的情况。

将式(10)代入式(5)~(7)即可求解出相应的市场出清电价、各发电商的上网电量和收益。当所有发电商的策略参数都满足式(10)，即所有发电商在制定最优决策时均不考虑竞争对手影响时，市场均衡与 Cournot 模型得出的结果一致<sup>[4]</sup>。

在交易中心发布信息比较全面，发电商能够对竞争对手策略做出精确估计的情况下，发电商在制定决策时会考虑竞争对手的影响。在这种情况下，发电商可以根据式(9)得到最优竞价策略，即

$$\alpha_{i,s}^* = c_i - \frac{1}{\frac{1}{\beta} - \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{\alpha_j}} \quad (11)$$

式中  $\alpha_{i,s}^*$  为发电商考虑竞争对手行为时的最优策略参数，下标  $s$  表示发电商考虑竞争对手行为的情况。

将式(11)代入式(5)~(7)可得发电商考虑竞争对手行为情况下的市场出清电价、各发电商上网电量和收益。当所有发电商的报价参数都满足式(11)，即所有发电商制定最优决策时均考虑竞争对手影响时，这种情况下的市场均衡与供给函数模型得出的结果一致<sup>[6]</sup>。

对比式(10)(11)可知

$$\alpha_{i,s}^* < \alpha_{i,c}^* \quad (12)$$

针对 2 种情况下市场均衡的差异，通过确定通用模型中市场出清电价、各发电商上网电量和收益等出清结果对发电商策略参数的单调性，分析发电商是否考虑竞争对手行为对市场出清结果的影响。

为不失一般性，以第  $i$  个发电商为研究对象，

设  $M = \frac{b_i - \gamma}{\beta} - \sum_{k=1}^n \frac{b_i - b_k}{\alpha_k}$ ，求解出的各市场出清结果对其策略参数的导数如下：

$$\frac{\partial P}{\partial \alpha_i} = \frac{M}{\alpha_i^2 \left( \frac{1}{\beta} - \sum_{k=1}^n \frac{1}{\alpha_k} \right)^2} \quad (13)$$

$$\frac{\partial q_j}{\partial \alpha_i} = \frac{M}{\alpha_i^2 \alpha_j \left( \frac{1}{\beta} - \sum_{k=1}^n \frac{1}{\alpha_k} \right)^2}, \quad j \neq i, j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial \alpha_i} = \frac{2q_j \left( \alpha_j - \frac{1}{2} c_j \right) M}{\alpha_i^2 \alpha_j \left( \frac{1}{\beta} - \sum_{k=1}^n \frac{1}{\alpha_k} \right)^2}, \quad j \neq i, j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial \alpha_i} = \frac{M \left( \frac{1}{\beta} - \sum_{k=1, k \neq i}^n \frac{1}{\alpha_k} \right)}{\alpha_i^2 \left( \frac{1}{\beta} - \sum_{k=1}^n \frac{1}{\alpha_k} \right)^2} \quad (16)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial \alpha_i} = \frac{M^2 \left[ (\alpha_i - c_i) \left( \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{\alpha_j} - \frac{1}{\beta} \right) - 1 \right]}{\left( \frac{\alpha_i}{\beta} - \sum_{j=1}^n \frac{\alpha_i}{\alpha_j} \right)^3} \quad (17)$$

为确定  $M$  的性质，将式(6)变形为

$$P - b_i = -M / \left( \frac{1}{\beta} - \sum_{k=1}^n \frac{1}{\alpha_k} \right) \quad (18)$$

由  $P - b_i > 0$ ，可得  $M > 0$ 。因此，式(13)~(15)的导数均大于 0，而式(16)所示的导数小于 0。由此可知，市场均衡下的出清电价、其他发电商的上网电量和收益均为某一发电商策略参数的递增函数，而该发电商上网电量为其策略参数的递减函数。

进一步可推导出式(17)所示导数在  $\alpha_i$  的取值区间  $(\alpha_{i,s}^*, \alpha_{i,c}^*]$  中为负，即在此区间，第  $i$  个发电商收益为其策略参数的递减函数。结合  $\alpha_{i,s}^* < \alpha_{i,c}^*$  可知，当任一发电商考虑其他竞争对手策略，而其他发电商竞价策略保持不变时，市场出清电价、其他发电商的上网电量和收益有所降低，而该发电商的上网电量和收益增加。

### 3 考虑竞争对手行为对市场均衡的影响

#### 3.1 市场均衡随策略参数变化的规律

对比所有发电商考虑和不考虑竞争对手行为 2 种情况，市场均衡变化是由所有发电商策略参数变化的叠加效果产生的。所有发电商均考虑竞争对手影响时，策略参数满足式(11)，且  $\alpha_{i,s}^* < \alpha_{i,c}^*$ ，其中  $i = 1, 2, \dots, n$ ，又根据式(13)可知，所有发电商策略参数变化时市场出清电价的变化趋势相同。因此，相比所有发电商不考虑竞争对手的情况，所有发电商均在最优竞价决策中考虑竞争对手行为会导致市场出清电价下降，与此相应，所有发电商的总上网电量增加。

然而，在市场均衡条件下，单个发电商的上网电量和收益一方面随自身策略参数增加而减小，另一方面随其他发电商策略参数的增加而增加，难以确定 2 种因素的叠加效果。为了进一步研究所有发电商是否考虑竞争对手行为对市场均衡的影响，下面分 2 种成本结构进行讨论。

### 3.2 成本对称结构

当日前市场中,发电商均为同种类型机组,且市场“优胜劣汰”的选择过程使留在市场中的发电商成本相差不大,市场可近似为成本对称结构。这种结构可能出现在我国火电机组比重很大的电力市场中,如华东区域电力市场和浙江省电力市场。

假设成本对称结构下各发电商成本函数系数均为

$$\begin{cases} c_i = c \\ b_i = b, & i=1,2,\dots,n \\ a_i = a \end{cases} \quad (19)$$

结合式(5)~(7)和(14)~(17)可知,市场内所有发电商策略参数、上网电量和收益及其相关导数都相同,其变化趋势也相同。因此,由于相比所有发电商不考虑竞争对手的情况,所有发电商考虑竞争对手影响时,市场总上网电量增加,故各发电商的上网电量均增加。

在成本对称结构下,式(7)可转变为

$$U^E = \frac{(\alpha^E - \frac{1}{2}c)(\gamma - b)^2}{(\alpha^E - n\beta)^2} - a \quad (20)$$

式中 $U^E$ 和 $\alpha^E$ 分别为成本对称结构下各发电商的收益和策略参数,上标E代表成本对称结构。

根据式(20), $U^E$ 对 $\alpha^E$ 求偏导可得

$$\frac{\partial U^E}{\partial \alpha^E} = \frac{-(\alpha^E - c + n\beta)(\gamma - b)^2}{(\alpha^E - n\beta)^3} \quad (21)$$

当 $\alpha^E < c - n\beta$ 时,式(21)大于0,即在区间 $(\alpha_{i,s}^*, \alpha_{i,c}^*)$ 中, $U^E$ 为 $\alpha^E$ 的递增函数。因此,在成本对称结构下,相比所有发电商不考虑竞争对手影响的情况,所有发电商均考虑竞争对手影响时,策略参数减小,因此均衡状态下的发电收益减少。

综合可得,在成本对称结构下,相比所有发电商不考虑竞争对手的情况,所有发电商考虑竞争对手影响时,市场均衡下的出清电价下降,各发电商上网电量上升,而其发电收益减少。

### 3.3 领导-跟随者结构

在日前市场中,一个发电商作为领导者,而其他发电商作为跟随者的情况比较常见,2种可能的原因为:发电商通过技术改革,使其单位发电成本减小,从而处于领导者地位;发电商由于发电能源类型不同,发电成本较低,如水电的短期发电成本小于火电,在竞价中具有领先优势。

为不失一般性,假设第1个发电商为领导者,

设其发电成本函数系数满足下式:

$$\begin{cases} c_1 = kc \\ b_1 = b \\ a_1 = a_1 \end{cases} \quad (22)$$

式中 $k$ 为比例系数, $0 < k < 1$ 。其他发电商成本函数的系数满足下式:

$$\begin{cases} c_i = c \\ b_i = b, & i=2,3,\dots,n \\ a_i = a \end{cases} \quad (23)$$

记 $\alpha_l^D$ 和 $\alpha_f^D$ 分别为领导者和跟随者的策略参数,其中上标D表示领导-跟随者结构,下标l和f分别表示领导者和跟随者。在领导-跟随者结构下,所有跟随者的上网电量和收益及其导数均相同,因此变化趋势一致。

分别记 $q_{l,c}^D$ ( $q_{f,c}^D$ )和 $q_{l,s}^D$ ( $q_{f,s}^D$ )为领导-跟随者结构下领导者(跟随者)在不考虑和考虑竞争对手行为情况下的上网电量,其中,下标c和s分别代表不考虑竞争对手和考虑竞争对手2种情况。则有

$$q_{l,c}^D - q_{l,s}^D = M_1[(\alpha_{l,s}^D - \alpha_{l,c}^D) - (n-1)\beta(\frac{\alpha_{l,s}^D}{\alpha_{f,s}^D} - \frac{\alpha_{l,c}^D}{\alpha_{f,c}^D})] \quad (24)$$

$$q_{f,c}^D - q_{f,s}^D = M_2[(\alpha_{l,s}^D - \alpha_{l,c}^D) - \beta(\frac{\alpha_{f,s}^D}{\alpha_{l,s}^D} - \frac{\alpha_{f,c}^D}{\alpha_{l,c}^D})] \quad (25)$$

式中:

$$M_1 = \frac{\gamma - b}{[\alpha_{l,c}^D - (n-1)\beta\frac{\alpha_{l,c}^D}{\alpha_{f,c}^D} - \beta][\alpha_{l,s}^D - (n-1)\beta\frac{\alpha_{l,s}^D}{\alpha_{f,s}^D} - \beta]}$$

$$M_2 = \frac{\gamma - b}{[\alpha_{f,c}^D - \frac{\alpha_{f,c}^D}{\alpha_{l,c}^D}\beta - (n-1)\beta][\alpha_{f,s}^D - \frac{\alpha_{f,s}^D}{\alpha_{l,s}^D}\beta - (n-1)\beta]}$$

可推导出 $M_1 > 0$ ,  $M_2 > 0$ ,又因为

$$\frac{\alpha_{l,s}^D}{\alpha_{f,s}^D} = \frac{kc + \frac{1}{\frac{n-1}{\alpha_{f,s}^D} - \frac{1}{\beta}}}{c + \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{l,s}^D} + \frac{n-2}{\alpha_{f,s}^D} - \frac{1}{\beta}}} < \frac{kc + \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{l,s}^D} + \frac{n-2}{\alpha_{f,s}^D} - \frac{1}{\beta}}}{c + \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{l,s}^D} + \frac{n-2}{\alpha_{f,s}^D} - \frac{1}{\beta}}} < \frac{kc - \beta}{c - \beta} = \frac{\alpha_{l,c}^D}{\alpha_{f,c}^D} \quad (26)$$

所以 $q_{l,c}^D < q_{l,s}^D$ ,即相比所有发电商不考虑竞争对手影响的情况,所有发电商考虑竞争对手影响时,市场均衡状态下领导者的上网电量增加。由于式(25)的符号难以确定,所有跟随者的上网电量可能增加或减少。

综上分析可得,在领导-跟随者成本结构下,

相比所有发电商不考虑竞争对手的情况，所有发电商考虑竞争对手影响时，在市场均衡状态下，出清电价下降，领导者的上网电量增加，跟随者的上网电量变化跟参数取值有关，变化趋势不确定，但必须保证总上网电量增加。

#### 4 算例分析

假设日前市场中有 5 个发电商参与，各发电商成本函数参数如表 1 所示。市场价格函数  $P = 500 - 0.05(q_1 + q_2 + \dots + q_5)$ ，其中电价和电量的单位分别为元/(MW·h)和 MW·h。

表 1 发电商成本函数参数

Tab. 1 Generation cost function coefficients of generators

| 发电商编号 | $c$ /(USD/(MW) <sup>2</sup> ) | $b$ /(元/MW) | $a$ /元 |
|-------|-------------------------------|-------------|--------|
| 1     | 0.18                          | 150         | 1000   |
| 2     | 0.21                          | 150         | 1500   |
| 3     | 0.24                          | 150         | 3000   |
| 4     | 0.28                          | 150         | 850    |
| 5     | 0.20                          | 150         | 900    |

针对发电商考虑竞争对手行为对市场出清结果的影响，对以下 4 种情况进行分析：1) 所有发电商均不考虑竞争对手的影响；2) 发电商 1 考虑竞争对手的影响，而其他发电商不考虑竞争对手的影响；3) 发电商 1~4 考虑竞争对手的影响，而发电商 5 不考虑竞争对手的影响；4) 所有发电商均考虑竞争对手的影响。4 种情况下的市场出清结果如表 2 所示。

表 2 不同情况下的市场出清结果

Tab. 2 Market clearing results under different cases

| 出清结果          | 情况 1   | 情况 2   | 情况 3   | 情况 4   |      |
|---------------|--------|--------|--------|--------|------|
| 电价/(元/MW·h)   | 331.00 | 329.00 | 325.33 | 323.75 |      |
| 上网电量/<br>GW·h | 发电商 1  | 0.79   | 0.85   | 0.84   | 0.83 |
|               | 发电商 2  | 0.70   | 0.69   | 0.73   | 0.73 |
|               | 发电商 3  | 0.62   | 0.62   | 0.65   | 0.65 |
|               | 发电商 4  | 0.55   | 0.54   | 0.59   | 0.56 |
|               | 发电商 5  | 0.72   | 0.72   | 0.70   | 0.76 |
| 发电收益/<br>万元   | 发电商 1  | 8.57   | 8.63   | 8.27   | 8.12 |
|               | 发电商 2  | 7.36   | 7.20   | 7.06   | 6.93 |
|               | 发电商 3  | 6.32   | 6.18   | 6.03   | 5.92 |
|               | 发电商 4  | 5.63   | 5.51   | 5.36   | 5.26 |
|               | 发电商 5  | 7.77   | 7.60   | 7.29   | 7.33 |

对比表 2 的结果可知，与情况 1 相比，情况 2 下发电商 1 的上网电量和收益均增加，而市场出清电价、其他发电商的上网电量和收益均减小，这是因为发电商 1 在情况 2 下考虑竞争对手行为的影响，其策略参数小于情况 1 下的取值。同理，与情况 4 相比，情况 3 下发电商 5 不考虑竞争对手的影响，其策略参数偏大，从而导致相比情况 4 和情况 3，发电商 5 的上网电量和收益均减小，而市场出

清电价、其他发电商的上网电量和收益均增大。上述结果验证了第 2 节中导数的性质和相关结论。

对成本对称和领导者-跟随者 2 种成本结构下发电商的发电成本如下：在成本对称结构下，发电商成本函数参数均为  $c = 0.22$ ， $b = 150$ ， $a = 1450$ ，该结果是表 1 中 5 个发电商成本函数参数的平均值；在领导-跟随者结构下，领导者为发电商 1，其成本函数参数为  $c = 0.15$ ， $b = 200$ ， $a = 5000$ ，其余发电商成本函数参数与成本对称结构下的取值相同。2 种成本结构下，所有发电商考虑和不考虑竞争对手影响情况下的市场均衡如表 3 所示。

表 3 不同成本结构下的市场均衡

Tab. 3 Market equilibriums under different generation cost structures

| 出清结果            | 成本对称情况 |        | 领导-跟随者情况 |        |      |
|-----------------|--------|--------|----------|--------|------|
|                 | 不考虑    | 考虑     | 不考虑      | 考虑     |      |
| 市场出清价格/(元/MW·h) | 331.73 | 324.64 | 325.81   | 317.82 |      |
| 上网电量/<br>GW·h   | 发电商 1  | 0.67   | 0.70     | 0.88   | 0.94 |
|                 | 发电商 2  | 0.67   | 0.70     | 0.65   | 0.68 |
|                 | 发电商 3  | 0.67   | 0.70     | 0.65   | 0.68 |
|                 | 发电商 4  | 0.67   | 0.70     | 0.65   | 0.68 |
|                 | 发电商 5  | 0.67   | 0.70     | 0.65   | 0.68 |
| 合计              | 3.35   | 3.50   | 3.48     | 3.66   |      |
| 发电收益/<br>万元     | 发电商 1  | 7.10   | 6.69     | 9.16   | 8.63 |
|                 | 发电商 2  | 7.10   | 6.69     | 6.64   | 6.17 |
|                 | 发电商 3  | 7.10   | 6.69     | 6.64   | 6.17 |
|                 | 发电商 4  | 7.10   | 6.69     | 6.64   | 6.17 |
|                 | 发电商 5  | 7.10   | 6.69     | 6.64   | 6.17 |

由表 3 可知，在成本对称情况下，所有发电商都考虑竞争对手的影响时，市场均衡下的总上网电量和各发电商的上网电量分别为 3.50 和 0.7 GW·h，其值比不考虑竞争对手影响的情况有所增大，而市场出清电价和各发电商的收益分别为 324.64 元/MW·h 和 6.69 万元，均小于所有发电商不考虑竞争对手影响时的取值。

在领导-跟随者情况下，所有发电商均考虑竞争对手的影响时，市场出清电价为 317.82 元/MW·h，低于所有发电商不考虑竞争对手行为时的市场出清电价(325.81 元/MW·h)，而领导者的上网电量为 0.94 GW·h，高于所有发电商不考虑竞争对手行为时的上网电量(0.88 GW·h)。

市场均衡状态下，2 种成本结构下各种出清结果的变化趋势符合第 3 节相应的结论。

#### 5 结论

1) 本文建立了日前市场发电商的通用博弈模型，指出所有发电商考虑和不考虑竞争对手行为 2 种情况下的最优竞价策略和市场均衡结果分别与

供给函数模型和 Cournot 模型相同, 推导了通用博弈模型中各种市场出清结果对发电商策略参数的单调性, 得出了单一发电商在最优竞价策略中考虑竞争对手行为会使市场出清电价、其他发电商的上网电量和收益降低, 而自上网电量和收益增加的结论, 并据此在不同成本结构下分析了发电商考虑竞争对手行为对市场均衡的影响。

2) 利用该模型可进一步分析需求价格特性和发电商成本特性对市场均衡的影响。此外, 在模型中考虑输电约束、中长期合约等因素是下一步需研究解决的问题。

## 参考文献

- [1] David A K, Wen Fushuan. Strategic bidding in competitive electricity markets: a literature survey[C]. The 2000 Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, United states, 2000.
- [2] 雷兵, 王秀丽, 高璞, 等. 独立发电商在日前市场的竞价策略分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 8-14.  
Lei Bing, Wang Xiuli, Gao Ying, et al. Analysis on bidding strategy of independent power producer in day-ahead market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 8-14(in Chinese).
- [3] 栾凤奎, 曾鸣, 刘宝华, 等. 电力市场均衡模型述评[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 110-116.  
Luan Fengkui, Zeng Ming, Liu Baohua, et al. Survey of equilibrium model in electricity market modeling research[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2008, 20(1): 110-116(in Chinese).
- [4] Ruiz C, Conejo A J, Garcia-Bertrand R. Some analytical results pertaining to Cournot models for short-term electricity markets[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(10): 1672-1678.
- [5] 李清清, 周建中, 莫莉, 等. 基于序贯博弈模型的发电商竞价策略分析[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 85-89.  
Li Qingqing, Zhou Jianzhong, Mo Li, et al. Analysis on generators' bidding strategy based on sequential game model[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 85-89(in Chinese).
- [6] Baldick R, Grant R, Kahn E. Theory and applications of linear supply function equilibrium in electricity markets[J]. Journal of Regulatory Economics, 2004(25): 143-167.
- [7] Liu Youfei, Ni Yixin, Wu Fuli. Existence, uniqueness, stability of linear supply function equilibrium in electricity markets[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, Denver, USA, 2004.
- [8] Baldick R, Hogan W W. Capacity constrained supply function equilibrium models of electricity markets: stability, non-decreasing constraints, and function space iterations[R]. Berkeley, California: University of California Energy Institute, 2002.
- [9] Bompard E, Lu W, Napoli R. Network constraint impacts on the competitive electricity markets under supply-side strategic bidding [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1): 160-170.
- [10] 吕文娥, 江秀臣. 电力市场中阻塞及市场力对市场结果的影响 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 66-73.  
Lü Wene, Jiang Xiuchen. Impacts of congestion and market power on market outcomes in competitive electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 66-73(in Chinese).
- [11] Yuan Zhiqiang, Liu Dong, Jiang Chuanwen. Analysis of equilibrium about bidding strategy of suppliers with future contracts[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(3): 1016-1020.
- [12] 胡军峰, 李春杰, 赵会茹, 等. 基于博弈论的电力需求价格弹性与发电市场均衡关系[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 89-94.  
Hu Junfeng, Li Chunjie, Zhao Huiru, et al. The relationship between price elasticity of demand and generation market equilibrium analysis based on game theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 89-94(in Chinese).
- [13] 张晓东, 高波. 基于供给函数均衡模型的区域电力现货市场模拟分析[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 80-84.  
Zhang Xiaodong, Gao Bo. Simulation of area spot market based on supply function equilibrium model[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 80-84(in Chinese).
- [14] Liu Youfei, Ni Yixin, Wu Fuli. Impacts of suppliers' learning behavior on market equilibrium under repeated linear supply function bidding[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(1): 44-50.



李清清

收稿日期: 2010-03-19。

作者简介:

李清清(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场, E-mail: kaiser\_lee@163.com;

周建中(1959—), 男, 教授, 研究方向为人工智能与电力系统自动化等, 本文通信作者, E-mail: prof.zhou.hust@263.net;

莫莉(1980—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力市场。

(责任编辑 杜宁)