

电力市场中的拍卖方式及竞标策略分析

张宇波¹, 任慧¹, 罗先觉²

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 首先对发电商在同一价格拍卖和差别价格拍卖方式下的博弈行为进行了分析, 分析结果表明发电商在不同的拍卖方式下改变其竞价策略, 最终会达到相同的效果, 即两种拍卖方式下的市场价格及市场购买力是相同的; 其次, 建立了这两种拍卖方式下的贝特兰德模型, 利用迭代方法求取了模型的纳什均衡解。通过仿真实例对上述结论进行了验证。

关键词: 电力市场; 拍卖; 同一价格拍卖; 差别价格拍卖; 贝特兰德模型; 纳什均衡

Analysis of auction modes and bidding strategies in electricity market

ZHANG Yu-bo¹, REN Hui¹, LUO Xian-jue²

(1. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Firstly, the games of generation companies under a uniform price auction (UPA) as well as a discriminatory price auction (DPA) are analyzed. As a result of analysis, the two auctions have the same effects on the electricity price and the purchasing power. Secondly, the Bertrand models of the two auctions are established and their Nash equilibriums are obtained by iteration. The above conclusion is tested by an example.

Key words: electricity market; auction; UPA; DPA; Bertrand model; Nash equilibrium

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)16-0007-04

0 引言

不同种类的拍卖方式都可以考虑应用到电力市场中去。目前几乎所有的电能拍卖都采用密封投标方式而不是公开叫价方式。争论最多的是电能的结算是按 UPA 结算方式还是 DPA 结算方式^[1,2]。

文献[2]中提到了人们对这两种拍卖方式在电力市场中应用的不同态度; 文献[3]中通过对三个机组的报价及收益进行分析认为利用 UPA 进行结算的电价高于 DPA 结算的电价, 但是电价增长速度慢; 文献[4]中作者得出结论: 以 DPA 进行电价结算比 UPA 方式更能够稳定电价, 减少电价波动, 但是不能够保证会降低电价。

本文对 UPA 和 DPA 两种不同拍卖方式下发电商的竞价策略进行了分析研究, 并建立了两种拍卖方式下的贝特兰德模型, 求取了该模型的纳什均衡解。通过对发电商竞价策略及纳什均衡结果的分析, 说明了两种拍卖方式下对市场电价及社会购买力的影响是相同的, 即两种拍卖方式最终达到相同效果。

1 UPA 和 DPA 方式下发电商竞价策略

电力市场中, 发电商是利益驱动型主体, 自身利润最大化是发电商经济运行的动力所在。因此, 在不同的拍卖方式下发电商会采取不同的竞标措施以期获得最大利润。

假设市场中有 N 个独立发电商, 发电商 i ($i=1, 2, \dots, N$) 总共有 N_i 个机组参与日前市场的竞价上网。假设机组在 h ($h=1, 2, \dots, H$) 时段的出力是均衡不变的, T 表示 h 时段持续时间。

设 h 时段发电商 i 机组 j ($j=1, 2, \dots, N_i$) 的发电成本为:

$$C_{ij}^h = a_{ij} + b_{ij}P_{ij}^h + c_{ij}P_{ij}^{h^2} \quad (1)$$

a_{ij} 、 b_{ij} 和 c_{ij} 表示发电商 i 机组 j 的发电成本系数, 均非负。

h 时段发电商 i 机组 j 的发电可变成本为:

$$VC_{ij}^h = b_{ij}P_{ij}^h + c_{ij}P_{ij}^{h^2} \quad (2)$$

式(1)对 P_{ij}^h 求导, 得机组的边际成本为:

$$MC_{ij}(P_{ij}^h) = b_{ij} + 2c_{ij}P_{ij}^h \quad (3)$$

根据式(3)可设机组在 h 时段的报价曲线为:

$$R_{ij}^h = u_{ij}^h + v_{ij}^h P_{ij}^h \quad (4)$$

假设发电商预测 h 时段的电价为 $\hat{\rho}^h$, 发电商以获取最大得益为目标进行报价的。发电商 i 在该时间段的得益用其创利额(总收入减去可变成本)表示为:

$$U_i^h = T \sum_{j=1}^{N_j} (\hat{\rho}^h P_{ij}^h - b_{ij} P_{ij}^h - c_{ij} P_{ij}^{h2}) \quad (5)$$

为了求取在预测电价下 h 时间段发电商的最大得益, 式(5)对 P_{ij}^h 求导并令其为 0 求得:

$$P_{ij}^{h*} = \frac{\hat{\rho}^h - b_{ij}}{2c_{ij}} \quad (6)$$

由式(6)得知, 在对某时间段的电价进行预测或已知情况下, 只要发电商中各个机组的得益最大, 发电商就能够获得最大得益。考虑到机组出力受最小出力 P_{ij}^{\min} 和最大出力 P_{ij}^{\max} 的限制。利用式(6)所求 P_{ij}^{h*} 不一定在机组出力的约束范围内; 另外, 当 $\hat{\rho}^h < b_{ij}$ 时, 机组无论出力为多少, 得益都会为负。因此, 报价一定要满足:

$$R_{ij}^h \geq b_{ij} + c_{ij} P_{ij}^h \quad (7)$$

机组得益为 0 时的出力记为 $P_{ij}^{h0} = \frac{\hat{\rho}^h - b_{ij}}{c_{ij}}$ 。

当 $\hat{\rho}^h \geq b_{ij} + c_{ij} P_{ij}^{\min}$ 时, 机组的得益见图 1。可以分为下面 4 种情况对发电商机组报价进行分析。

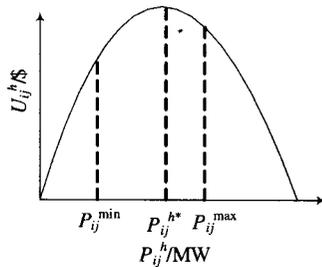


图 1 机组得益

Fig.1 Income of generating unit

1) 当 $P_{ij}^{\min} \leq P_{ij}^{h*} \leq P_{ij}^{\max}$, 机组出力为 P_{ij}^{h*} 时, 得益最大, 见图 1。为了使机组出力能够达到 P_{ij}^{h*} , 机组需要按边际成本报价, 因此式(4)的报价曲线可为:

$$R_{ij}^h = b_{ij} + 2c_{ij} P_{ij}^h \quad (8)$$

在这种情况下, 市场无论采用 UPA 还是 DPA 结算, 机组都得到相同的得益, 而市场对该机组的

购电成本也相同。

2) 当 $P_{ij}^{h*} \geq P_{ij}^{\max}$ 时, P_{ij}^{\max} 位于 P_{ij}^{h*} 左边, 所以机组出力为 P_{ij}^{\max} 时得益最大。如果仍按边际成本报价, 出力在 P_{ij}^{\max} 时, 报价会低于预测值 $\hat{\rho}^h$ 。但是若以 UPA 形式进行电价结算的话, 报价曲线仍可以按式(8)边际成本进行报价, 机组可以获得最大得益; 若以 DPA 形式结算的话, 仍以机组的边际成本进行报价, 机组的得益会减少, 因此发电商为了获得最大利润, 会提高该机组的报价, 以便机组出力为 P_{ij}^{\max} 时, 电价仍为 $\hat{\rho}^h$, 因此机组报价为:

$$R_{ij}^h = \hat{\rho}^h - 2c_{ij} P_{ij}^{\max} + 2c_{ij} P_{ij}^h \quad (9)$$

显然, 发电商通过不同的报价策略, 使得无论是以 UPA 还是 DPA 方式进行电价结算, 机组都获得相同得益, 市场的购电成本也相同, 而且以 UPA 方式进行市场结算时, 机组更能以其边际成本进行报价。

3) 当 $P_{ij}^{h*} \leq P_{ij}^{\min} \leq P_{ij}^0$ 时, P_{ij}^{\min} 位于 P_{ij}^{h*} 的右边, 机组出力为 P_{ij}^{\min} 时得益最大, 如果仍按边际成本报价的话, 在机组最小出力时, 报价将大于预测值, 机组将不能够安排发电, 为了使机组按最小出力被安排发电, 无论是以 UPA 还是 DPA 方式结算, 机组报价都应该为:

$$R_{ij}^h = \hat{\rho}^h - 2c_{ij} P_{ij}^{\min} + 2c_{ij} P_{ij}^h \quad (10)$$

4) 当 $P_{ij}^{\min} > P_{ij}^0$ 时, 机组按预测电价 $\hat{\rho}^h$ 报价得益为负, 因此机组可以按下式报价, 保证机组得益不为负, 但有可能不被安排发电, 此时:

$$R_{ij}^h = b_{ij} + c_{ij} P_{ij}^h \quad (11)$$

通过上面对机组报价策略的分析, 显然得出结论: 无论是以 UPA 方式还是 DPA 方式进行电价结算, 发电商为了获取最大得益其报价策略会有所不同, 最终会使发电商获得相同得益, 市场购电费用也相同。下面通过建立两种拍卖方式下的贝特兰德模型对结论进一步进行验证。

2 两种拍卖方式下发电商的贝特兰德模型及其纳什均衡解

贝特兰德模型是针对商家产品价格所建立的模型, 通过博弈行为最后各厂商所选择商品价格达到纳什均衡。

在双边拍卖方式中, 将 h 时段购电方投标所得曲线进行线性插补得线性反需求曲线函数为:

$$\rho^h(P_D^h) = \begin{cases} \rho_m^h - \alpha^h P_D^h & (0 \leq P_D^h \leq \rho_m^h / \alpha^h) \\ 0 & (P_D^h > \rho_m^h / \alpha^h) \end{cases} \quad (12)$$

ρ^h 表示 h 时段的实时电价; α^h 为大于 0 的系数; ρ_m^h 表示电价的上限; P_D^h 表示现货市场电力总需求。如果市场中直接利用上网电价购电, 则可以不考虑网损, 则 $P_D^h = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij}^h$ 。

设 $\bar{\rho}^h$ 为需求曲线和发电商竞标所得供给曲线的交点。当购电方获得各发电商各机组报价曲线 $R_{ij}^h(u_{ij}^h, v_{ij}^h)$ 后, 以购电费用最低为目标, 满足市场需求和发电供给的平衡, 即满足 $P_D^h = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij}^h$, 获得供需交点电价 $\bar{\rho}^h$ 。显然, $\bar{\rho}^h$ 是自变量为 R_{ij}^h 、 ρ_m^h 和 α^h 的函数。

在 UPA 方式下, 发电商中各机组的报价组合 $(R_{11}^{h*}, R_{12}^{h*}, \dots, R_{1N_1}^{h*}; \dots; R_{N1}^{h*}, R_{N2}^{h*}, \dots, R_{NN_N}^{h*})$ 若是纳什均衡, 则对每个发电商 i , 应是以下优化问题的解:

$$\max_{R_{i1}, \dots, R_{iN_i}} U_i^h = T[\bar{\rho}^h \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij}^h - \sum_{j=1}^{N_i} (b_{ij} P_{ij}^h + c_{ij} P_{ij}^{h2})] \quad (13)$$

$$\text{s.t. } \{P_{ij}^{\min} \leq P_{ij}^h \leq P_{ij}^{\max}\} \cup \{P_{ij}^h = 0\}$$

$$\bar{\rho}^h = \rho_m^h - \alpha^h \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij}^h; \quad R_{ij}^h = u_{ij}^h + v_{ij}^h P_{ij}^h$$

$$\text{当 } R_{ij}^h \leq \bar{\rho}^h \text{ 时, } P_{ij}^{\min} \leq P_{ij}^h \leq P_{ij}^{\max}$$

$$\text{当 } R_{ij}^h > \bar{\rho}^h \text{ 时, } P_{ij}^h = 0$$

$$R_{ij}^h \geq b_{ij} + c_{ij} P_{ij}^h$$

$$j=1, 2, \dots, N_i$$

达到纳什均衡时购电总费用为:

$$B = \rho^{h*} T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij}^{h*} \quad (14)$$

式 (14) 中: ρ^{h*} 为纳什均衡点购电电价, P_{ij}^{h*} 为纳什均衡点时机组的出力。

在按 DPA 方式进行交易时, 结算价格是各机组的报价, 仍然是只有报价 $R_{ij}^h \leq \bar{\rho}^h$ 的机组被安排发电。DPA 方式下发电商机组报价的纳什均衡应该是以下优化问题的解:

$$\max_{R_{i1}, \dots, R_{iN_i}} U_i^h = T \sum_{j=1}^{N_i} (P_{ij}^h R_{ij}^h - b_{ij} P_{ij}^h - c_{ij} P_{ij}^{h2}) \quad (15)$$

$$\text{s.t. } \{P_{ij}^{\min} \leq P_{ij}^h \leq P_{ij}^{\max}\} \cup \{P_{ij}^h = 0\}$$

$$\bar{\rho}^h = \rho_m^h - \alpha^h \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} P_{ij}^h; \quad R_{ij}^h = u_{ij}^h + v_{ij}^h P_{ij}^h$$

$$\text{当 } R_{ij}^h \leq \bar{\rho}^h \text{ 时, } P_{ij}^{\min} \leq P_{ij}^h \leq P_{ij}^{\max}$$

$$\text{当 } R_{ij}^h > \bar{\rho}^h \text{ 时, } P_{ij}^h = 0$$

$$R_{ij}^h \geq b_{ij} + c_{ij} P_{ij}^h$$

$$j=1, 2, \dots, N_i$$

达到纳什均衡点时购电总费用为:

$$B = T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} (P_{ij}^{h*} R_{ij}^{h*}) \quad (16)$$

式中: R_{ij}^{h*} 为在纳什均衡点按每个机组报价所得购电电价。

电力市场中发电商机组在 UPA 和 DPA 中所建立的贝特兰德模型与贝特兰德(1883)的双头垄断模型差别很大, 纳什均衡求解方法完全不同, 更加复杂。图 2 给出了电力市场中拍卖竞价的调整过程, 发电商每一拍卖周期都在根据以往市场电价及本身得益在调整报价, 最终市场将达到纳什均衡。

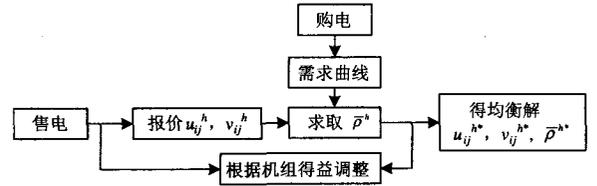


图 2 竞价调整过程

Fig.2 Adjust process for bidding

根据图 2 可以利用迭代方法求取贝特兰德模型的纳什均衡解。求解过程见图 3。

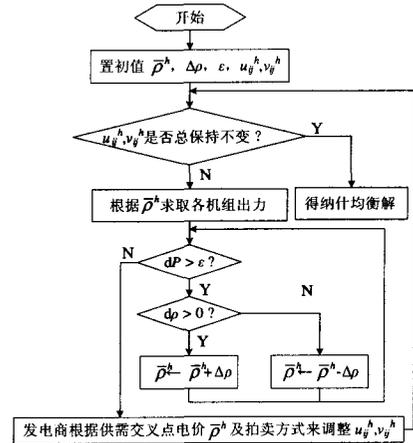


图 3 贝特兰德求解流程图

Fig.3 Solving flow chart for Bertrand model

表 1 发电商机组竞价纳什均衡结果

Tab.1 Results of Nash equilibrium for generation company units

均衡点	公司 1	公司 2		公司 3			公司 4	公司 5		公司 6		
v_{UPA}^*	0.007 5	0.035	0.125	0.134	0.05	0.07	0.006	0.033	0.105	0.014 7	0.07	0.07
v_{DPA}^*	0.034 3	0.053	0.125	0.134	0.05	0.07	0.034 3	0.053	0.105	0.023	0.07	0.07
P_{ij}^{h*}	70	50	27.192	0	27.98	20	70	50	32.371 4	50	20	20
U_{ij}^{h*}	149.555	88.7	46.212 8	0	19.572	13.98	153.23	91.2	55.015 2	39.1	9.98	13.98

总购电费用: $B^* = \$1\ 924.8$; 均衡点电价: $\rho^{h*} = \$4.399/(\text{MW}\cdot\text{h})$; 出力单位: MW; 得益单位: \$

3 仿真分析

本文给出了分别属于 6 个发电商的 12 台机组竞价的仿真结果。12 台机组的成本系数参见文献 [5]。本文仿真过程中, 令需求函数中 $\rho_m^h = 20 \text{ } \$/(\text{MW}\cdot\text{h})$, $\alpha^h = 0.04$ 。单一时段持续时间 $T=1 \text{ h}$ 。机组出力单位 MW, 得益单位 \$, 电价单位 $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$ 。

本文仿真过程中令 $u_{ij}^h = b_{ij}$, 只对系数 v_{ij}^h 进行调整。表 1 给出的仿真结果表明, 在相同的需求曲线下, 由于在 UPA 和 DPA 中发电商采取的竞价策略不同, 如表中所得, 机组竞价曲线的系数不同, 竞价达到在纳什均衡时, 两种拍卖方式下发电商在同一时段被安排发电的出力相同、得益相同, 而且总购电费用及电价也相同。这说明电力市场不会因为采用 UPA 或是 DPA 就会对市场电价产生很多影响, 当市场处于均衡状态时, 这两种拍卖方式最终结果是没有区别的。

4 结论

电力市场中对于电价结算无论是按 UPA 方式还是 DPA 方式, 发电商为了获取最大利润, 会采取不同的博弈行为, 最终达到相同的效果。而 UPA 方式更能够激发发电商按其边际成本竞价。仿真结果也表明当市场处于纳什均衡状态时, 这两种拍卖方式最终对市场的影响是没有区别的。

因此要因地制宜, 根据不同状况下的电力市场,

对这两种拍卖方式操作的难易程度进行研究, 选择最适宜的拍卖方式。

参考文献

- [1] Bower J, Bunn D. Experimental Analysis of the Efficiency of Uniform-price Versus Discriminatory Auction in the England and Wales Electricity Market [J]. Journal of Economic Dynamics & Control, 2001, 25: 561-592.
- [2] Fabra N, Fehr N H V D, Harbord D. Modeling Electricity Auctions [J]. The Electricity Journal, 2002: 72-81.
- [3] Ethier R, Zimmerman R, Mount T, et al. A Uniform Price Auction with Locational Price Adjustments for Competitive Electricity Markets [J]. Electrical Power & Energy Systems, 1999, 21: 103-110.
- [4] Mount T. Market Power and Price Volatility in Restructured Markets for Electricity [J]. Decision Support Systems, 2001, 30: 311-325.
- [5] 张宇波. 寡占发电市场机组竞价均衡出力模型及算法研究 (博士学位论文) [D]. 西安: 西安交通大学, 2003.

收稿日期: 2008-08-25; 修回日期: 2008-09-16

作者简介:

张宇波 (1965-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电力市场、自动化; E-mail: yuboz@zsu.edu.cn

任慧 (1965-), 女, 讲师, 研究方向为电力市场、自动化;

罗先觉 (1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为系统运行控制、规划及电力市场。