

# 基于博弈均衡购电电价的分时电价

孙琳<sup>1</sup>, 刘俊勇<sup>2</sup>

(1. 成都电业局, 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 电力市场改革促进发电商竞价与购电商间竞价。根据博弈理论, 将购电商与发电商看作一个两人静态博弈模型, 根据双方叫价拍卖模型, 计算贝叶斯均衡点, 确定购电电价, 寻求不同出价下的均衡电价在分时电价中的应用, 根据反应后的削峰填谷效果进行出价选择和协商, 达到双方共赢的目的。

**关键词:** 博弈论; 两人静态博弈; 双方叫价拍卖模型; 贝叶斯均衡; 分时电价

**Abstract:** With the development of power market the competition is between the generators and the purchasers. The application of TOU (time of use) price based on game theory is presented which takes the relationship between generators and purchasers as a two-level gaming model. The two-player auction model is used to compute the Bayes equilibrium, and then the purchasing price is confirmed to make the TOU price for the reaction of load under different auction. At the last there will be a negotiated purchasing price for the two players which will make both of them have the most incomes.

**Key words:** game theory; two-level static gaming; two-player auction; Bayes equilibrium; TOU (time-of-use) price

**中图分类号:** F407.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)04-0052-05

## 0 引言

电价是电力市场最有效的经济调节杠杆。电价的制定是电力工业改革与发展的关键, 分时电价作为电力需求侧管理的重要手段之一, 在世界各国电力工业经济管理中正在发挥着越来越大的作用。运用分时电价可以实现削峰填谷、移峰平谷, 减缓发电侧电力投资, 提高供电可靠性, 减少用户电费等。

分时电价提出的理论基础是实时电价理论。文献 [1] 和 [2] 认为中国目前实行实时电价的条件不具备, 但实行分时电价是必不可少的。文献 [3] 主要针对江苏省实行分时电价后大工业用户的响应进行了分析, 认为实行分时电价具有一定的负荷调节效果。文献 [4] 提出了用户反应的概念来描述电价对负荷的影响, 并提出了基于 DSM 的分时电价的数学模型。文献 [5] 通过研究需求与价格的关系, 运用一元回归模型, 拟合了整个社会对电价的反应曲线, 并制定了相应的分时电价, 得到了较好的负荷调整的效果, 文献 [6] 对平时段电价的确定进行了探索性研究。提出了用 MCP 计算的平均购电电价来确定平时段电价, 但是, 由于 MCP 对平时段电价的限制, 文献 [6]

确定的分时电价不能得到使削峰填谷最优的平时段电价。影响用户用电特性最直接的因素即是电价, 分时电价一般都是在现行的全年平均电价作为平值时段电价基础上制定的。供电公司的购电成本直接影响用户的电价。电力市场的开放, 直接导致了发电商竞价上网和购电商之间的竞价购电。国内外许多学者都对发电商应用博弈论制定竞价策略进行了研究<sup>[7]~[11]</sup>。文献 [12]、[13] 基于不完全信息静态博弈论, 研究了购电商的竞价策略。文献 [14] 讨论了拥有发电机的供电公司如何优化向独立发电商购电的计划。文献 [15]、[16] 应用博弈论探讨了大用户直购电时购售电双方的利益博弈。文献 [17] 在解除管制的市场中, 将发电商、供电公司和用户的利益进行协商平衡, 寻求各自利益最大的均衡点。

这里在博弈论的基础上, 将发电商看作一个协作的整体, 同购电商进行博弈, 寻求各自利益的最大化, 找到一个贝叶斯均衡点, 将此均衡电价作为基础电价制定用户的分时电价。

## 1 发电商与购电商博弈

在解除管制的电力市场中, 短期电力市场的电价由发电商和购电商共同决定, 市场交易管理中心根据

各发电商和各购电商上报的竞价曲线分别作出总供电曲线和总需求曲线, 这两条曲线的交点即为供求平衡点, 平衡点处的电价为市场清算电价 MCP (Market Clearing Price)。当发电商和购电商都在寻求各自的最大利益时, 也同时在对对方的竞价策略进行估计相应制定各自的竞价目标函数。不可避免的, 一方竞价成功的基础上, 另一方相应会有所损失。因此, 建立双方叫价拍卖博弈模型, 找到满足发电商和购电商各自最大利益的均衡点。

### 1.1 模型假设

联营体形式下, 参与者众多, 若干发电公司或若干购电商可以结成联合体 (coalition) 去投标, 也就是协作博弈 (cooperative gaming), 这可以比各自独立去投标取得更大的利益, 所得利益在联营体内合理分配。一般在这类博弈决策时网络的输送容量是不考虑的<sup>[18]</sup>。因此, 对于各发电商, 认为他们进行协作博弈, 共同给出发电报价策略。

同时, 针对目前中国电力市场开放程度, 假设供电公司为单一购买者, 同协作的发电商进行 two-level 博弈。

### 1.2 双方叫价拍卖模型分析

在购电商和发电商的两方博弈中, 各个时段的购电量通常由双方确定。

在双向拍卖的交易博弈中, 卖者提供的商品成本为  $c$  这是商品对于卖者的价值。商品对买者的价值为  $v$ 。设卖者对于商品的要价为  $p_s(v_s)$  函数, 买者对商品的买价为  $p_b(v_b)$  函数, 当  $p_s > p_b$  时, 交易成功, 双方以  $(p_s + p_b) / 2$  的价格成交; 如果  $p_s < p_b$ , 则不发生交易。由于这里是研究该博弈均衡电价在分时电价中的应用及其影响, 因此这里只考虑交易成功, 即  $p_s > p_b$  时的情况。

发电商的效用函数为:

$$u_s(p_s, p_b) = \begin{cases} \frac{p_s + p_b}{2} - c & p_s \leq p_b \\ 0 & p_s > p_b \end{cases} \quad (1)$$

购电商的效用函数为:

$$u_b(p_s, p_b) = \begin{cases} v - \frac{p_s + p_b}{2} & p_s \leq p_b \\ 0 & p_s > p_b \end{cases} \quad (2)$$

$c$  和  $v$  属于发电商与购电商的私人类型, 假设  $c$  服从  $[c_1, c_2]$  的均匀分布,  $v$  服从  $[v_1, v_2]$  上的均匀分布。由非完全信息静态博弈中的贝叶斯 Nash 均衡定理可

得, 双方博弈均衡点  $(S_s^*(c), S_b^*(v))$ , 需满足以下两个条件。

①  $S_s^*(c)$  满足卖者最优性。即:

$$\max_{S_b \geq p_b} \int \left( \frac{1}{2} (p_b + s_b^*(v)) - c \right) dF \quad (3)$$

②  $S_b^*(v)$  应满足买者最优性。即:

$$\max_{(S_s^*(c) \leq p_b)} \int \left( v - \frac{1}{2} (p_b + s_s^*(c)) \right) dF \quad (4)$$

假设买者采取一个线性叫价策略,  $s_b^*(v) = \alpha_b + \beta_b v$ 。

$s_b^*(v)$  服从  $[\alpha_b + \beta_b v_1, \alpha_b + \beta_b v_2]$  上的均匀分布, 于是对式 (3)、(4), 由一阶导数推导可得:

$$p_b = \frac{2}{3} v_b + \frac{1}{3} (\alpha_b + \beta_b v_2) \quad (5)$$

对式 (5), 由一阶导数推导可得:

$$p_b = \frac{2}{3} v_b + \frac{1}{3} (\alpha_s + \beta_s v_1) \quad (6)$$

联立可得:

$$p_b = \frac{2}{3} c + \frac{1}{12} (3v_2 + \alpha) \quad (7)$$

$$p_b = \frac{2}{3} v + \frac{1}{12} (v_2 + 3\alpha)$$

当  $p_s \leq p_b$  时, 交易成功, 以  $(p_s + p_b) / 2$  的价格成交, 即此时  $p = \frac{1}{3} (v + c) + \frac{1}{6} (\alpha + v_2)$  为购电商的购电价。

## 2 分时电价模型建立

### 2.1 模型的假设和参量的设定

#### 2.1.1 基本假设

① 实行分时电价前后每天的总用电量保持不变。

② 调整到某一时段的电量按时间轴平均分配。

③ 文中只考虑了价格对用户需求的影响, 其他因素的影响需进一步研究; 同样, 文中只考虑了用户需求对价格的影响, 其他因素 (如燃料价格) 对价格的影响暂时忽略。

根据国外实行需求侧管理的经验, 在实行需求侧管理后, 一般用电量略有增加或基本保持不变, 因而假定实行分时电价前后用电量保持不变是合理的。假设②尤其是假设③是为了使文中的讨论得以顺利进行所作的简化性假设, 消除假设③是一个十分重要的问题, 有待进一步的研究。

### 2.1.2 参量的设定

(1)将一天 24 h 划分为 3 类时段:  $T_f$ 、 $T_p$ 、 $T_g$ , 满足:

$$T_f + T_p + T_g = 24 \quad (8)$$

其中:  $T_f$  为峰时段;  $T_p$  为平时段;  $T_g$  为谷时段。

(2)电价的确定:供电公司根据博弈均衡购电电价  $p_m$ , 制定相应的平时段电价  $p_p$ ,

$$p_p = k p_m \quad (9)$$

其中  $k$  为计入输电电价、网损、辅助服务电价后的比例系数。电力网络输电价格、网损计算、辅助服务电价的确定是一个很大的学术课题,为使研究得以顺利进行,根据统计数据取为常数 2.8<sup>[6]</sup>。

### 2.2 用户的反应

全社会对电价的综合反应曲线<sup>[19]</sup> (不包括商业用电和居民用电)得式 (10)。

$$\begin{cases} y=0.4319x^3 - 0.4734x^2 - 0.4191x + 1.4629 (x \leq 1) \\ y=0.3294x^3 - 1.8315x^2 - 2.5134x - 0.0111 (x > 1) \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $x$  为某时段电价与现行平值电价比值的大小;  $y$  为某时段用电量与现行平值电价时段用电量比值的大小。

### 2.3 模型的经济约束

根据 DSM 的总体目标,从供、需两方面考虑来建立分时电价的数学模型。

#### 2.3.1 供电方获利

实行分时电价前供电方的销售收入为:

$$M_0 = Q \bar{p} \quad (11)$$

其中:  $\bar{p}$  为实行分时电价平均购电费用。实行分时电价后供电方的销售收入为:

$$M_{TOU} = Q_{fTOU} p_f + Q_{pTOU} p_p + Q_{gTOU} p_g \quad (12)$$

其中:  $Q_{fTOU}$ 、 $Q_{pTOU}$ 、 $Q_{gTOU}$  为实行分时电价后峰、平、谷时段的用电量。实行分时电价后供电方通过削峰可以节约的电力建设投资为  $M'_0$ 。供电方获利的约束条件是:

$$M_{TOU} \geq M_0 - M'_0 \quad (13)$$

#### 2.3.2 用电方受益:

实行分时电价前用户电费支出:

$$m_0 = M_0 \quad (14)$$

实行分时电价后用户电费支出:  $m_{TOU} = M_{TOU}$

用户受益即电费支出不增加:

$$m_0 \geq m_{TOU} \quad (15)$$

即:总电费不增加

$$M_0 \geq M_{TOU} \quad (16)$$

综合有:

$$(1 - \delta) M_0 \leq M_{TOU} \leq M_0 \quad (17)$$

供电公司让利系数  $\delta = \frac{M'}{M_0}$  在该模型中将  $\delta$  控制

在 10% 以内。

### 2.4 优化目标

尽可能减小峰负荷,提高谷负荷,减小峰谷差,从而提高电力系统的负荷率、电力系统的运行效率和稳定性,并且尽可能减少用户购电费用,从而达到社会效益最优的目的。

以峰负荷最大和谷负荷最小及峰谷差最小为目标函数,即目标函数为:

$$\min(L_{max}) \quad (18)$$

$$\min(L_{max} - L_{min}) \quad (19)$$

显然,  $L_{max}$  是负荷用电量的最大值;  $L_{min}$  是负荷用电量的最小值;  $L_{max} - L_{min}$  为负荷用电量峰谷差。采用对式 (18)、(19) 的多目标优化,在 MATLAB 中仿真优化。

### 2.5 求解流程

(1)发电商、购电商根据自身特点估计各自的竞价方案。

(2)根据博弈均衡理论计算在发电商与购电商不同报价下的均衡电价。

(3)根据均衡电价制定相应的分时电价达到削峰填谷的效果。

(4)最终在各种均衡电价下的分时电价效果中选取最优作为最终分时电价方案及报价方案。

## 3 算例分析

采用简化模型探讨均衡协商电价的制定。

表 1 典型日负荷数据

t 负荷 (MW)	t 负荷 (MW)	t 负荷 (MW)	t 负荷 (MW)
1 2 015.7	7 1 972.9	13 2 501.2	19 2 912.2
2 1 901.5	8 2 078.5	14 2 643.7	20 2 861.8
3 1 860.1	9 2 438.9	15 2 704.5	21 2 760.6
4 1 816.6	10 2 554.8	16 2 715.8	22 2 641.5
5 1 803.5	11 2 720.6	17 2 793.0	23 2 383.4
6 1 826.1	12 2 691.5	18 2 885.3	24 2 164.4

根据历史数据,假设模拟得到发电商的成本  $c$  和购电商 (供电公司) 的电力价值  $v$  在电量  $Q$  不变下,假设发电商和购电商的成本和价值服从均匀分布,  $c \sim U(0.11, 0.14)$ ,  $v \sim U(0.12, 0.15)$ , 为简化计

算,使  $\nu$  和  $c$  各取五个均匀分布点进行计算,由式 (7)、(9) 得到博弈均衡购电电价  $p_{m,i}$ ,  $i=1, 2, \dots, 5$ 。  
 $P_{m,pi} = k p_{m,i}$ , 取计入输电电价、网损、辅助服务电价后的比例系数  $k=2.8^{[6]}$ 。

经 MATLAB 仿真计算得如表 2 所示,不同购电电价下分时电价制定方案及优化效果。

表 2 不同博弈基础电价下分时电价效果比较

博弈基础 电价 (元 /MW)	峰平谷与 基础电价比	最大 峰荷 (MW)	最小 谷荷 (MW)	峰谷负荷 差 (MW)
0.392 0	1.470/1.093/0.300	2 866.5	1 961.2	905.3
0.401 3	1.602/1.104/0.542	2 757.2	2 001.2	756.0
0.410 7	1.501/1.078/0.554	2 722.9	2 134.4	588.5
0.420 0	1.516/1.033/0.535	2 656.7	2 099.1	557.6
0.429 3	1.151/1.031/0.587	2 722.9	1 976.1	746.8

表 2 为在购电商与发电商竞价的均匀分布中取简化模型 5 个点进行分时电价反应结果比较,其中供电公司获益为除去供电公司的输电电价、网损、服务电价等后的净收入,由比较可得,购电商可以选择博弈基础电价为 0.42 元 /MW 时,峰谷差 557.6 MW 最小,谷负荷 2 099.1 MW 较大,峰负荷 2 656.7 MW 最小,供电公司净收益 8 063.7 元最大。

表 3 不同博弈基础电价下分时电价效果比较

博弈基础 电价 (元 /MW)	峰平谷与 基础电价比	供电公司 净收 益 (元)	峰谷差 率 (%)	负荷率 (%)
0.392 0	1.470/1.093/0.300	1 946.3	26.40	88.13
0.401 3	1.602/1.104/0.542	1 366.3	38.49	83.80
0.410 7	1.501/1.078/0.554	1 958.9	27.42	87.12
0.420 0	1.516/1.033/0.535	8 063.7	20.99	90.41
0.429 3	1.151/1.031/0.587	-1 665.7	20.45	89.91

如图 1 所示,在该电价下分时电价前后的负荷曲线比较。

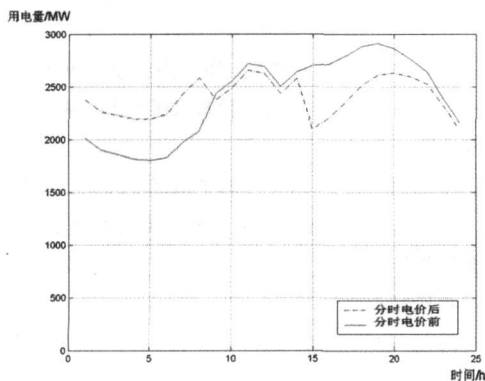


图 1 分时电价前后的负荷曲线

## 4 结 论

基于博弈论的原理,对购电商竞价和发电商竞价之间寻求各自利益最大化的均衡点,并根据不同竞价方案下的均衡电价应用于分时电价,观察其效果予以分析,最终确定购电出价方案。经过简化仿真计算,可以找到一个适宜的基础电价,制定分时电价方案达到削峰填谷的要求。

由于应用于分时电价调整负荷的计算较为复杂,只给出了简化计算,如何更精确计算还需进一步研究。购电商与发电商在竞价中的反应也需进一步研究。

## 参考文献

- [1] 郑斌,王秀丽. 电力市场电价理论的分析与综述 (1): 边际成本电价理论 [A]. 全国高等学校电力系统及自动化专业第 15 届学术年会论文集 [C]. 武汉: 1999, 1202—1207.
- [2] 郑斌,王秀丽. 电力市场电价理论的分析与综述 (2): 竞价机制及转运电价 [A]. 全国高等学校电力系统及自动化专业第 15 届学术年会论文集 [C]. 武汉: 1999, 1208—1215.
- [3] 李扬,王治华,卢毅,等. 峰谷分时电价的实施及大工业用户的响应 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 45—48.
- [4] 丁宁,吴军基,邹云. 基于 DSM 的峰谷时段划分及分时电价研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 9—12.
- [5] 刘观起,张建,刘瀚. 基于用户对电价反应曲线的分时电价的研究 [J]. 华北电力大学学报, 2005, 32(3): 23—27.
- [6] 吴秋伟,汪蕾,邹云. 基于 DSM 和 MCP 的分时电价的确定与分析 [J]. 电力需求侧管理, 2003, 5(1): 24—29.
- [7] Hobbs B F, Metzler C B, Pang J. Strategic gaming analysis for electric power systems: an MPEC approach [J]. IEEE Trans On Power Systems, 2000, 15(2): 638—645.
- [8] Dacorato M, Minola A, Sbrizzai R. A simulation tool for studying the day-ahead energy market: the case of Italy [M/CD]. New York: Proceedings of IEEE Power Engineering Society 2002 Winter Meeting, 2002.
- [9] Song H L. Decision Making of an Electricity Suppliers Bid in a Spot Market. IEEE PES Summer Meeting Edmonton (Canada): 1999.
- [10] Hobbs. Analyzing Strategic Bidding Behavior in Transmission Networks In: IEEE Tutorial on Game Theory Applications in Electric Power Market. IEEE PES Winter Meeting New York, 1999.
- [11] 任玉珑,邹小燕,张新华. 发电公司的不完全信息竞价博弈模型 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 11—14.

[12] 段登伟,刘俊勇.基于不完全信息静态博弈论的购电商竞价策略研究[J].电力自动化设备,2003,23(7):10-14

[13] 陈星莺,李华昌,廖迎春,刘皓明.不完全信息下的供电公司最优竞价策略[J].电力需求侧管理,2006,8(4):12-15

[14] Alvarado F L. The stability of Power System Markets IEEE Trans on PWRs 1999, 14(2).

[15] 谭忠富,董福贵,刘严.博弈论在大用户与发电公司直接购电合同中的应用[J].华北电力大学学报,2004,31(3):62-64.

[16] 陈刚,王超,谢松.基于博弈论的电力大用户直接购电交易研究[J].电网技术,2001,28(13):75-79.

[17] Geeli Negotiation Models for Electricity Pricing in a Partially Deregulated Electricity Market In: IEEE PES Sum-

mer Meeting Seattle(USA). 1999.

[18] 刁勤华,林济铿,倪以信,陈寿孙.博弈论及其在电力市场中的应用[J].电力系统自动化,2001,25(1):19-23;5(2):13-18.

[19] 刘观起,张建,刘瀚.基于用户对电价反应曲线的分时电价的研究[J].华北电力大学学报,2005,32(3):23-27.

作者简介:

孙琳(1982-),女,成都人,硕士研究生,主要从事电力市场方面的研究。

刘俊勇(1963-),男,四川成都人,教授,博士研究生导师,主要从事电力市场、分布式发电等方面的研究工作。

(收稿日期:2009-06-01)

(上接第 31 页)

参考文献

[1] Zobian A, Ilie M D. A Steady state Voltage Monitoring and Control Algorithm Using Localized Least Square Minimization of Load Voltage Deviations[J]. IEEE Trans on Power Systems 1996, 11(2): 929-938.

[2] MAO Jian-feng ZHAO Qian-chuan Christos G Optimal Dynamic Voltage Scaling in Power-Limited Systems with Real-time Constraints[A]. 43rd IEEE Conference on Decision and Control 2004, 1472-1477.

[3] 包黎昕,段献忠,何仰赞.状态空间中电压稳定性的动态分析[J].中国电机工程学报,2001,21(5):17-22.

[4] Zeng Y G, Berizzi A, Marannino P. Voltage Stability Analysis Considering Dynamic Load Model[A]. Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control Operation and Management 1997, 396-401.

[5] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,王小海.电力系统电压稳定性及其控制[M].中国电力出版社.

[6] Obadina O. O. Berg G. J Determination of Voltage Stability Limit in Multimachine Power System. IEEE Trans On PWRs 1988, 3(4).

[7] 王锡凡,方万良,杜正春.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社,2004.

[8] 王永骥,涂健.神经网络控制[M].机械工业出版社,1999.

[9] Hsiao Y T, Liu C C, Chiang H D, et al A New Approach for Optimal VAR Sources Planning in Large Scale Electric Power Systems[J]. IEEE Trans On Power Systems 1993, 8(3): 1024-1032.

[10] 刘玉田,马莉.基于 Tabu搜索方法的电力系统无功优化[J].电力系统及其自动化学报,2000,24(2):61-64.

[11] Burchett R C, Kapp H H, Vierath D R. Quadratically Con-

vergen Optimal Power Flow [J]. IEEE Trans On Power Apparatus and Systems 1984, 103(11): 3267-3276.

[12] 刘明波,程劲晖,陈学军.电力系统无功综合优化的线性规划内点法[J].电力系统及其自动化学报,1999,11(5):87-92.

[13] 周双喜,姜勇,朱凌志.电力系统电压静态稳定性指标述评[J].电网技术,2001,25(1):1-7.

[14] 李亚男,张粒子,杨以涵.考虑电压约束裕度的无功优化及其内点解法[J].中国电机工程学报,2001,21(9):1-4.

[15] 刘明波,陈学军.电力系统无功优化的改进内点算法[J].电网技术,1998,22(3):24-28.

[16] 王良缘,吴政球,傅海燕等.电力市场中基于内点法的含暂态稳定约束的最大可用输电能力计算[J].电力系统及其自动化学报,2004,16(1):28-33.

[17] 袁越,久保川淳司,佐佐木博司.考虑暂态稳定约束的可用传输能力计算[J].电力系统自动化,2004,28(10):34-39.

[18] 李华强,刘亚梅, N. Yorino 鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估[J].中国电机工程学报,2005,25(24):56-60.

[19] 范勇,李华强,曾勇波.基于内点法的可用传输能力计算[J].四川师范大学学报,2006,29:149-151.

作者简介

张希猛(1976-),男,河北南皮人,汉族,在读研究生,工程师,主要研究方向电压稳定及电压无功控制;

李华强(1965-),男,教授,博士,从事电压稳定及无功优化问题研究;

赵周芳(1983-),女,硕士在读,主要从事电压稳定方面的研究;

方勇(1968-),男,博士在读,主要从事电能质量方面的研究。

(收稿日期:2009-02-23)