

# 一种发电商竞价策略的初步研究

吴军基, 李聪, 杨伟, 张俊芳

(南京理工大学动力学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 随着电力市场化改革的推进,发电商的竞价策略研究已成为热门的课题。文中运用博弈论中的双方叫价拍卖原理,建立了发电商与电网之间的双方叫价拍卖模型,并对其进行了数学描述,推导出了合理的发电商竞价策略,该策略可使发电厂商的期望收益达到最大,且不会出现以往以边际成本报价而发生亏损的情况。

关键词: 电力市场; 双方叫价拍卖; 博弈论; 竞价策略

中图分类号: TM73;F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)11-0005-03

## 0 引言

电力工业的市场化改革正在全世界范围内展开,我国正处在“厂网分开,竞价上网”这一改革的进程之中<sup>[1]</sup>。由于电力需求及电价的不确定性,发电商如何竞价来最大化自己的利润已成为一个重要的研究课题。国内外各种研究成果不断涌现<sup>[2-7]</sup>,文献[8]对这些成果进行了详细的综述,认为从发电商的具体策略性报价来看,主要有以下4种方法:基于发电商自身机组发电成本特性的报价方法;基于预测竞争对手报价行为的报价方法;基于预测市场出清价(MCP)的策略性报价方法;基于博弈论的策略性报价方法。

在上述4种方法中由于前3种方法需要大量的历史数据,而在大多数的电力市场中可供查询的公开数据十分有限,因而用博弈论来进行策略报价,其模拟结果更接近实际。

文献[9,10]对博弈论在电力市场中的应用进行了详细的综述。在现代经济学中,对于竞标机制的研究是由拍卖理论(Auction Theory)完成的,拍卖问题从狭义上看,是有一定适用范围及特殊规则的市场交易类型,而从广义上理解它反映的是市场经济价格均衡机制及资源配置的内在过程和本质机理,将一般商品的拍卖机制应用于电力市场,并考虑电力商品的特殊性,便可设计出电力市场的各种竞价机制。本文则从发电商角度出发,把竞价问题看成是发电厂商与电网之间的双方叫价拍卖,从而得到基于博弈论的厂商最优报价策略。

基金项目:南京理工大学科研发展基金资助项目

## 1 双方叫价拍卖原理简介<sup>[11]</sup>

在双方叫价拍卖(double auction)中,潜在的卖者提出要价(asking prices),买者提出出价(bidding prices)。然后拍卖商选择成交价格 $P$ 清算市场,所有要价低于 $P$ 的卖者卖出,所有出价高于 $P$ 的买者买入,在价格 $P$ 下的总供给等于总需求。

下面以一个简单双边叫价拍卖为例。一个买者与卖者决定是否交换单位商品,卖者提供该商品的成本为 $C$ ,该商品对买者的价值是 $V$ ,且 $C, V$ 分别是定义在区间 $[0, 1]$ 的均匀分布函数,卖者和买者同时选择要价和出价,分别为 $P_s \in [0, 1]$ 和 $P_b \in [0, 1]$ ,若 $P_s \leq P_b$ ,双方在 $P = (P_s + P_b) / 2$ 上成交。若 $P_s > P_b$ ,没有交易发生。这样,如果 $P_s \leq P_b$ ,卖者的效用 $u_s = (P_s + P_b) / 2 - C$ ,买者的效用 $u_b = V - (P_s + P_b) / 2$ ,如果 $P_s > P_b$ ,卖者和买者的效用均为0。

假定只有卖者知道 $C$ ,只有买者知道 $V$ (因为 $C$ 是卖者的类型, $V$ 是买者的类型),假定 $C$ 和 $V$ 在区间 $[0, 1]$ 上均匀分布,分布函数 $P(\cdot)$ 是共同知识,在这个贝叶斯博弈中,卖者的战略(要价) $P_s$ 是 $C$ 的函数 $P_s(C)$ ,买者的战略(出价) $P_b$ 是 $V$ 的函数 $P_b(V)$ ,如果下列两式成立,战略组合 $(P_s^*(C), P_b^*(V))$ 是一个贝叶斯均衡。

1) 卖者最优。对所有的 $C \in [0, 1]$ ,  $P_s^*(C)$ 是下列最优化问题的解:

$$\max_{P_b} \left[ \frac{1}{2} (P_s + E[ P_b(V) | P_b(V) \geq P_s ]) - C \right] \cdot \text{prob} \left\{ P_b(V) \geq P_s \right\}$$

这里,  $E[ P_b(V) | P_b(V) \geq P_s ]$ 是在给定卖者的要价低于买者的出价的条件下,卖者预期的买者的出价。

2) 买者最优。对所有 $V \in [0, 1]$ ,  $P_b^*(V)$ 是下

列最优化问题的解:

$$\max_{P_s} \left[ V - \frac{1}{2} (P_b + E[ P_s(C) | P_b, P_s(C) ]) \right] \cdot \text{prob} \{ P_b, P_s(C) \}$$

这里,  $E[ P_s(C) | P_b, P_s(C) ]$ 是在给定卖者的要价低于买者的出价的条件下,买者预期的卖者的要价。

## 2 博弈模型的建立

### 2.1 市场规则及基本假定

在发电侧开放的电力市场中,各个发电公司作为单位向电网申报竞价,然后系统调度员根据负荷需求及各发电商竞价,由低到高依次调度,直至满足该时段的负荷,最后被选入的机组称为边际机组,其报价则为市场出清价(MCP)。电网则以MCP向各个发电公司购买其出力,其中假定每个发电公司对自己的成本情况是清楚的,但对其他竞争对手的情况是不知的。

### 2.2 简化模型的建立

本文将发电商作为一个局中人进行报价,定义为卖者,而电网则定义为买者,发电商报价为 $s$ ,电网出价为 $b$ ,其中 $b$ 为市场出清价,发电公司不知道其具体数值,但可以根据以往的市场信息对它进行估计。一般,我们假定其服从正态分布,这也符合概率论的中心极限定理。实际问题中的许多随机变量,只要它们是由大量的相互独立的随机因素综合影响所形成,而其中每一个个别的因素在总的影响中所起的作用都很微小,则这种随机变量就近似服从正态分布。这时,问题就简化为发电商与电网的双方叫价拍卖模型。由市场规则可知,只有当发电公司报价 $s < b$ 时,才能使交易成功,发电商的利润为:

$$(s, b) = \begin{cases} bP - C & s < b \\ 0 & s > b \end{cases} \quad (1)$$

而发电公司的报价策略则是使其利润

$$[ E( b^* | b^*, s ) P - C ] \text{prob}( b^*, s ) \quad (2)$$

最大化,上式中  $E( b^* | b^*, s )$ 表示未来时段场的最终出清价 $b^*$ 时 $b^*$ 的期望值,  $\text{prob}(\cdot)$ 表示概率;  $P$ 为发电公司的出力;  $C$ 为其生产成本。

### 3 报价策略具体分析

设发电公司的成本曲线为:

$$C = aP^2 + bP + d \quad (3)$$

为了分析方便,假定报价曲线是成本曲线的比例函数,则引入比例系数 $k$ ,其报价曲线为  $s =$

$k(2ap + b)$ ,发电商的策略就是选择最佳报价因子 $k$ ,使其能竞价成功。

发电公司的利润函数为:

$$(s, b) = \begin{cases} bP - C & s < b \\ 0 & s > b \end{cases} \quad (4)$$

发电商已经清楚博弈对手电网的博弈策略,就是通过选较低的电价使电网的购电成本最小,如果要使 $(s, b^*)$ 是Bayes均衡,则对于 $k$ ,  $s(k)$ 应使式(5)最大化。

$$[ E( b^* | b^*, s ) P - C ] \text{prob}( b^*, s ) \quad (5)$$

式中:  $E( b^* | b^*, s )$ 表示实际市场出清价 $b^*$ 时 $b^*$ 的期望值。

这个期望盈利由下面步骤推导而来,发电公司的盈利函数为式(4),对于任一个 $k$ ,有相应的 $s(k) = s$ ,但由于发电公司不知道 $b$ ,则竞价成功时的平均(期望)盈利为:

$$\max_b \int_b (bP - C) dF(b) \quad (6)$$

其中:  $\max_b$ 为 $b$ 的最大值

$$F(b) = \text{prob}( b^* < b ) \quad (7)$$

注意到

$$\begin{aligned} \max_b \int_b dF(b) &= F(\max_b) - F(s) = \\ &= \text{prob}( b^* < \max_b ) - F(s) = \\ &= \text{prob}( b^* < s ) \end{aligned} \quad (8)$$

且

$$\max_b \int_b b dF(b) = E( b^* | b^*, s ) \text{prob}( b^*, s ) \quad (9)$$

将式(8),(9)代入式(6)中,可得到式(5)。

我们前面假定市场出清价 $b$ 服从正态分布,则:

$$\begin{aligned} F(b) &= \text{prob}( b^* < b ) = \int_s^b \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx \\ dF(b) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(b-\mu)^2}{2\sigma^2}} db \end{aligned} \quad (10)$$

将式(10)代入式(6)中

$$\begin{aligned} \max_b \int_b (bP - C) dF(b) &= \max_b \int_b (bP - C) \cdot \\ &\cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(b-\mu)^2}{2\sigma^2}} db \end{aligned}$$

因为  $s$  为  $k$  的函数,上式可对  $k$  求导得:

$$\left[ C - k(2aP + b)P \right] \frac{1}{\sqrt{2}} e^{-\frac{k(2aP+b) - \mu^2}{2}} (2aP + b) = 0$$

$$aP^2 + bP + d = k \cdot (2aP + b)P$$

$$k^* = \frac{aP^2 + bP + d}{2aP^2 + bP}$$

$$s^* = \frac{aP^2 + bP + d}{2aP^2 + bP} (2aP + b) =$$

$$\frac{aP^2 + bP + d}{P} = aP + b + \frac{d}{P} \quad (11)$$

$$= bP - C \left( aP + b + \frac{d}{P} \right) P + C = 0 \quad (12)$$

由式(12)可知,当发电商以式(11)作为报价曲线时,利润至少为0,不会出现亏损。

在没有市场规则要求报价曲线是非降曲线的情况下,式(11)作为报价曲线是合适的,因为报价曲线表示的是在不同的市场出清价下,发电商愿意提供的发电量,反过来说,发电商的发电量又影响市场出清价。既然电力市场是一个寡头市场,发电商具有一定操纵电价的市场力,可以通过持留发电量来抬高电价,表现在报价曲线上就是一条下降的曲线形式。

## 4 结论

1) 本文将电力市场中的多人博弈简化为发电商与电网的二人博弈,使问题变得简化;

2) 本文在基于双方叫价拍卖理论下,建立了发电商与电网的双方叫价模型,推导出了发电商的最优报价曲线,其不同于以往人们按边际成本的报价,且在这种报价策略下,发电商的利润至少为0,不可能出现亏损的情况,这是任何一个理性的发电商所希望的,因而得出这种报价曲线是合理的;

3) 文中给出的报价曲线是发电商使其期望利润最大化前提下的最低可行价。尚未考虑电力系统自身的约束条件,这个问题将是下一步的研究课题。

## 参考文献:

- [1] 黄永皓,尚金成(HUANG Yong-hao, SHANG Jin-cheng). 电力市场运营模式研究及其技术支持系统设计(Power Market Operation Mode Research and Its Technical Support System Design) [M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press), 1999.
- [2] 周建平,周浩(ZHOU Jianping, ZHOU Hao). 电力市场竞争策略探讨(Preliminary Study on Bidding Strategy for Electricity Market) [J]. 中国电力(Electric Power), 2001, 34(3):

8-10.

- [3] 尚金成,黄永皓,等(SHANG Jin-cheng, HUANG Yong-hao, et al). 一种基于博弈论的发电商竞价策略模型与算法(A Model and Algorithm of Game Theory Based Bidding Strategic for an Electric Power Systems) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(19): 12-15.
- [4] 耿建,王锡凡,陈皓勇,等(GENG Jian, WANG Xi-fan, CHEN Hao-yong, et al). 发电市场的迭代竞价机制(Iterative Competitive Bidding Mechanism in Generation Market) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(9): 1-6.
- [5] HAO Shang-you. A Study of Basic Bidding Strategy in Clearing Pricing Auction [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 975-980.
- [6] Optimal Bidding Strategies and Modeling of Imperfect Information Among Competitive Generators [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(10): 15-21.
- [7] Song H L, Liu C C, Lawarrec J. Optimal Electricity Supply Bidding by Markov Decision Process [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 618-624.
- [8] 文福拴(WEN Fu-shuan), David A. K. 电力市场中的投标策略(Bidding Strategy in Power Market) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2000, 24(14): 1-6.
- [9] 刁勤华,林济铿,倪以信,等(DIAO Qin-hua, LIN Ji-keng, NI Yi-xin, et al). 博弈论及其在电力市场中的应用(上)(Game Theory and Its Application in Power Markets, Part 1) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(1): 19-23.
- [10] 刁勤华,林济铿,倪以信,等(DIAO Qin-hua, LIN Ji-keng, NI Yi-xin, et al). 博弈论及其在电力市场中的应用(下)(Game Theory and Its Application in Power Markets, Part 2) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 2001, 25(2): 13-18.
- [11] 张维迎(ZHANG Wei-ying). 博弈论与信息经济学(Game Theory and Information Economics) [M]. 上海:上海三联书店(Shanghai: Shanghai Sanlian Bookstore), 1996.

收稿日期: 2003-09-11; 修回日期: 2004-01-06

作者简介:

吴军基(1955 - ),男,教授,博士生导师,从事电力市场、电力系统调度自动化、配电网自动化的教学与研究工作;

李 聪(1980 - ),女,硕士研究生,从事电力市场的研究;

杨 伟(1965 - ),男,副教授,从事电力系统分析与控制、电力市场的教学与研究工作。

(下转第 12 页 continued on page 12)

数  $u$  的取值对去噪和压缩效果的影响和该阈值方法的可行性进行了分析,并给出了仿真结论。有关小波包在诸如电压骤降等暂态电能质量检测中的应用还处于初步阶段,小波包本身的很多特点都还没得到充分的发挥。因此选取最优小波基以及最佳小波包树,准确提取特征分量等研究将成为小波变换在电力系统应用中的一个热点问题。

#### 参考文献:

- [1] McGranaghan M F, Muller D R. Voltage Sags in Industrial System [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1993, 29 (2) :397-403.
- [2] Santoso S, Power E J, Grady W M. Power Quality Assessment via Wavelet Transform Analysis [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (2).
- [3] 胡昌华,张军波,等 (HU Chang-hua, ZHANG Jun-bo, et al). 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析 (System Design and Analysis Based on MATLAB——Wavelet Analysis) [M]. 西安:西安电子科技大学出版社 (Xi'an:Xi'an Electronic Technology University Press), 2001.
- [4] 杨福生 (YANG Fu-sheng). 小波变换与工程分析与应用 (Wavelet Transform and Project Analysis and Application) [M]. 北京:科学出版社 (Beijing:Science Press), 2000.

- [5] Brito N S P, Souza B A, Pires F A C. Daubechies Wavelets in Quality of Electrical Power [A]. The 1998 International Conference on Harmonics and Quality of Power. 1998: Athens (Greece). 511-515.
- [6] Gouda A M, et al. Power Quality Detection and Classification Using Wavelet Multi-resolution Signal Decomposition [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(4) :1469 - 1476.
- [7] Donoho D L. De-noising by Soft-thresholding [J]. IEEE Trans on Information Theory, 1995, 41(3) :613-627.
- [8] 鲁怀伟,杜三山 (LU Huai-wei, DU San-shan). 一种小波包去噪自适应阈值算法 (An Adaptive Threshold Arithmetic for Wavelet Packet Denoising) [J]. 兰州铁道学院学报 (自然科学版) (Journal of Lanzhou Railway Institute, Natural and Science), 2001, 20(6) :11-15.

收稿日期: 2003-09-15; 修回日期: 2003-11-02

#### 作者简介:

熊玲玲 (1979 - ), 女, 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制;

刘会金 (1952 - ), 男, 教授, 博士生导师, 从事电能质量测控以及灵活交流输电技术等方面的研究;

傅志伟 (1977 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为灵活交流输电技术。

### Voltage sag analysis based on wavelet package transform

XIONGLing-ling, LIU Hui-jin, FU Zhi-wei

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** Voltage sag is the most familiar problem in power quality transient, and its detection is the precondition of monitoring and restraining. Wavelet package transform with better time-frequency resolution is developed on the wavelet transform. The signal is decomposed on the wavelet package plane and the characteristic weights of voltage sag can be achieved using available information. As for the voltage sag interfered with noise and overmuch data, this paper presents the soft-thresholding method for the de-noising and compression, and analyzes the effect of adjustable coefficients to this method. The simulation results show that wavelet package transform is also useful in analyzing the voltage sag.

**Key words:** power quality; wavelet package; characteristics extraction; threshold

(上接第 7 页 continued from page 7)

### A model of bidding strategy based on auction theory

WU Jur-ji, LI Cong, YANG Wei, ZHANG Jurfang

(School of Electric Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The issue of bidding strategy has become more and more popular with the reform of power market. The paper establishes a double auction model between generator and regulator based on double auction principle of Game Theory with a mathematical description. Further more, an optimized bidding strategy is obtained through deduction. The strategy can maximize the expected income of a generator. What's more, the case that the generator reduces revenue when bidding at marginal cost could not appear.

**Key words:** power market; double auction; Game Theory; bidding strategy