

基于博弈论和概率论的发电商竞价策略研究

杨根¹, 周杰娜¹, 胡志勇²

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 河南省电力公司南阳供电公司, 河南 南阳 473000)

摘要: 电力市场环境下, 发电公司可以通过策略性投标来获得最大利润。在分析策略性报价研究现状的基础上, 建立了基于博弈论和概率论的发电报价数学模型, 结合发电公司追求利润最大化的目标, 对发电公司竞标成功的概率进行了详细的分析, 通过比较发电报价与市场出清价两者之间大小关系的可能性概率及其数学期望的求解, 给出了满足发电公司期望效用函数最大的最优报价策略方法。算例分析的结果验证了该方法的有效性和可操作性。

关键词: 电力市场; 博弈论; 概率论; 竞价策略

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)10-0041-05

0 引言

电力市场环境下, 发电公司按照利润最大化的原则决定报价策略, 电力交易中心综合各发电公司的报价后, 根据市场规则和系统需求确定系统边际电价和安排各发电公司的上网电量^[1,2]。发电公司作为市场的主体参与者, 其收益很大程度上取决于自身采用的竞价策略。随着市场竞争的加剧, 竞价策略问题受到了发电公司和众多科研人员的广泛关注。文献[3]比较详细的介绍并总结了竞价策略的研究成果, 认为发电公司竞价策略主要有以下3种方法: 第一种是基于预测市场出清价(MCP)的策略性方法。这种方法主要依靠于对过去的市场数据和信息进行分析, 可是大部分公开的市场信息十分有限, 因而精确预测MCP比较困难。第二种是基于预测其它竞争对手报价行为的策略性方法。这种方法需要对市场所有竞争对手的报价策略和费用函数的分布函数进行预测, 利用模糊数学和概率论等数学方法对其进行分析比较, 最终来确定自己的报价策略。第三种是基于博弈论的策略性报价方法, 但在现实的市场交易过程中, 发电公司不具备完全的市场信息而缺乏有效的处理手段, 导致最终报价策略产生较大误差。

文献[4]在假定电力市场中每个发电公司的报价电量相同且都为一单位的基础上, 运用经济学中拍卖原理分析了发电公司竞标策略, 文中构造的博

弈模型和结论在理论上具有重要的意义。文献[5]在[4]的基础上, 运用博弈论中第一价格暗拍原理, 建立发电公司的不完全信息竞价模型。文中考虑了发电公司的单位成本、竞价成功的可能性概率、以及预期的市场清除价的各种因素, 通过求解竞价模型得出了发电报价的一般结论, 并用算例证明了结论的可靠性和可操作性。文献[6]将发电厂商竞价问题看作是竞标者同市场的博弈过程, 考虑已知市场电价的分布规律(正态分布), 而不知道其他参与市场竞价的发电厂商的竞价策略, 进而把竞价问题看作是发电厂商和市场间的零和二人混合对策, 以发电厂商获得最大的期望收益为目标, 最终得出基于博弈论的最优报价策略。

然而在实际的电力市场中, 发电公司对竞争对手和市场的信息不能完全知道, 因而在竞价博弈过程中确定最优报价策略比较困难。本文把电力市场的竞标看作是不完全信息下的静态非协调性博弈^[7]过程, 运用不完全信息博弈理论对发电公司的报价策略进行研究, 结合概率论知识, 建立基于博弈论和概率论相结合的发电公司报价模型和求解算法, 以发电公司期望收益最大化为目标函数, 借助于连续型和离散型随机变量的数学期望的求解, 最终寻求发电公司获得最大利润的最优报价策略的方法。

1 不完全信息静态博弈

博弈过程中如果每个参与人对其它参与人的支付(偏好)函数有完全的了解, 并且支付函数是所有参与人的共同知识, 满足这种条件的博弈称为“完

基金项目: 贵州省科技厅工业攻关项目(黔科合(2004)GGY030)

全信息博弈”。如果所有参与人中至少有一个不了解其他参与人的支付函数,则称该博弈为“不完全信息博弈 (games of incomplete information)”^[7]或称为“静态贝叶斯博弈”。

定理: n 人静态贝叶斯博弈用 $G = \{A_1, \dots, A_n; p_1, \dots, p_n; u_1, \dots, u_n\}$ 来进行战略描述, 其中 A_1, \dots, A_n 表示参与人空间类型; p_1, \dots, p_n 表示条件概率; $A_1(i_1), \dots, A_n(i_n)$ 表示竞标参与人的类型依存战略空间; $u_1(a_1, \dots, a_n; i_1), \dots, u_n(a_1, \dots, a_n; i_n)$ 表示类型依存支付 (效用) 函数。给定参与人 i 只知道自己的类型 i 而不知道其他参与人的类型 $-i$, 参与人将选择自己的行动战略 $a_i(i)$ 最大化自己的期望效用, 参与人的期望效用函数定义如式 (1) 所示:

$$u_i = \sum_{-i} p_{-i}(i | -i) u_i(a_i(i), a_{-i}(-i); i, -i) \quad (1)$$

在式 (1) 中, u_i 表示参与人 i 期望效用函数; $p_{-i}(i | -i)$ 表示给定参与人 i 的类型 i 情况下其他参与人类型为 $-i$ 的条件概率; u_i 表示此条件下参与人 i 的支付函数; $a_{-i}(-i)$ 表示其他参与人选择的战略行动。

2 发电公司竞价博弈分析

2.1 交易模式和基本假设

假设联营体交易市场上有 n 个注册发电公司参与竞价, 将每个发电公司等价虚拟为一台发电机组, 每个公司只申报一条报价曲线。不失一般性, 本文研究发电公司 k 的竞价策略。在采用统一市场出清价的电力市场中, 按照市场竞价规则, 每个发电公司可以分时段投标, 而本文重点分析在某一个交易时段发电公司单次竞标报价过程, 且只研究仅报一个容量段^[8]的最优报价策略。

在竞标博弈过程中, 认为市场和每个参与人的报价都是理性的。电力交易中心在综合各个发电公司报价后, 根据系统需要 (本文考虑供大于求情况) 和市场情况安排各发电公司的中标上网电量。在报价时段的系统负荷下, 按报价高低进行排序, 直到满足要求而最后选入的机组为边际机组, 其报价就确定为该时段的系统边际电价 (市场出清价), 该时段入围中标的发电公司都将获得与市场出清价价格相同的上网电价而进行市场交易。

2.2 发电报价的博弈分析

发电公司在报价博弈过程中, 对竞争对手的信

息不完全了解, 并且市场规则要求各发电公司同时报价, 我们可以用不完全信息静态博弈理论分析和解释报价博弈过程。

2.2.1 发电公司成本函数

发电公司的成本函数可用二次曲线描述如下:

$$C_k(q_k) = a_k + b_k q_k^2 \quad (2)$$

其中: $C_k(q_k)$ 表示发电公司 k 的成本, 是 q_k 的函数; a_k 表示机组容量成本, $a_k > 0$; b_k 表示电量成本的变化率, $b_k > 0$; q_k 表示发电公司的有功出力, 有 $q_k = \sum_{m=1}^n p_m$, 其中 p_m 表示发电公司所属的第 m 台发电机组的出力, 且满足 $p_{m\min} \leq p_m \leq p_{m\max}$, 其中 $p_{m\min}$ 和 $p_{m\max}$ 分别表示每台机组出力的上下限制。考虑传输阻塞问题: $q_k \leq p_{k\max}$, 其中 $p_{k\max}$ 表示在报价时段传输线路能通过的最大有功, 一般情况下在竞标前由交易中心提前公布。

2.2.2 发电公司收益函数

对于参与竞标的发电公司而言, 其利润收益函数如式 (3) 所示:

$$\pi_k(q_k) = b_{MCP} q_k - C_k(q_k) \quad (3)$$

其中: $\pi_k(q_k)$ 表示发电公司该时段获得的利润, 它是发电出力 q_k 的函数; b_{MCP} 表示市场出清价。

2.2.3 n 人静态贝叶斯博弈模型的基本要素

1) 参与人: 参与市场报价的所有注册发电公司 $i = 1, 2, \dots, n_0$ 。

2) 战略: 在静态博弈中, 战略是参与人在给定信息下的行动规则, 也就是参与人选择市场报价的方案, 即各发电公司的报价 $b_i, i = 1, 2, \dots, n$; 考虑市场整体理性和参与人个体理性, 发电公司的报价应满足市场规则所允许的投标约束: $\min\{b_i\} \leq b_i \leq \max\{b_i\}, i = 1, 2, \dots, n_0$ 。

3) 效用: 在考虑竞标成功的条件概率下, 发电公司的期望效用收益值, 也称作支付或收益函数。

4) 最优均衡: 市场参与人的最优报价战略组合, 也是竞价的贝叶斯纳什均衡解^[7]。

2.3 发电公司竞价的成败和失败

竞争的电力市场环境, 发电公司参与实时市场的竞价, 最终竞标总会有 3 种可能的结果:

1) 发电公司 k 的报价 $b_k < b_{MCP}$, 竞标成功, 上报电量完全被电力交易中心采用。

2) 发电公司 k 的报价 $b_k = b_{MCP}$, 竞标成功, 但上报电量不一定完全被交易中心采用。

3) 发电公司 k 的报价 $b_k > b_{MCP}$, 竞标失败, 上报电量完全不被电力交易中心采用。

3 基于概率论和博弈论的竞价策略

3.1 竞价模型的建立

参与竞标的发电公司作为市场的参与者,其报价模型就是要解决在如何满足合理收入和技术安全约束的条件下,依据市场交易规则要求,尽可能多的获得上网电量和获得最大利润。

本文基于概率模型和不完全信息静态博弈模型,综合考虑市场竞标成功概率,以发电公司 k 取得最大利润收益为目标函数,建立发电公司竞价的数学模型如式(4)所示:

$$\max_k (q_k) = [b_{MCP} q_k - C_k(q_k)] p(b_k < b_{MCP}) + [b_{MCP}(q_k) - C_k(q_k)] p(b_k = b_{MCP}) \quad (4)$$

式中: $p(b_k < b_{MCP})$ 和 $p(b_k = b_{MCP})$ 分别表示发电公司 k 的报价小于和等于市场出清价的概率可能性;表示在发电报价等于市场出清价时发电公司的中标电量占上报电量的比值,明显有 $0 < \dots < 1$ 。

3.2 发电报价策略研究

发电公司的最优报价策略就是希望自身的利润收益最大化,进而满足博弈期望效用最大化。

本文结合贝叶斯博弈均衡理论,利用概率论中数学期望的求解方法,建立满足发电公司期望效用最大化的最优报价策略,函数模型如式(5)所示:

$$E_k(b_k) = E\{[b_{MCP} q_k - C_k(q_k)] p(b_k < b_{MCP})\} + E\{[b_{MCP}(q_k) - C_k(q_k)] p(b_k = b_{MCP})\} \quad (5)$$

其中: $E_k(b_k)$ 表示期望效用函数,等式右边两项分别表示发电公司 k 的报价小于和等于市场出清价两种关系下的期望效用。

为了研究的方便,本文分别讨论 $p(b_k < b_{MCP})$ 和 $p(b_k = b_{MCP})$ 两种情况下的报价策略。

3.2.1 $b_k < b_{MCP}$ 时期望效用分析

$$E_k(b_k) = E\{[b_{MCP} q_k - C_k(q_k)] p(b_k < b_{MCP})\} = \int_{b_i}^{\max\{b_i\}} [b_{MCP} q_k - C_k(q_k)] p(b_k < b_{MCP}) = \int_{b_i}^{\max\{b_i\}} [b_{MCP} q_k - C_k(q_k)] f(b_{MCP}) d(b_{MCP}) \quad (6)$$

综合考虑市场历史数据信息,结合市场出清价的特征,我们假定 b_{MCP} 服从均值为 μ_M , 标准差为 M 的正态分布 $N(\mu_M, M)$, 其分布密度为:

$$f(b_{MCP}) = \frac{1}{\sqrt{2} M} \exp\left[-\frac{(b_{MCP} - \mu_M)^2}{2 M^2}\right] \quad (7)$$

$$\frac{dE_k(b_{MCP})}{d(b_{MCP})} = [b_{MCP} q_k - C_k(q_k)] f(b_{MCP}) = 0 \quad (8)$$

从而有:

$$b_{MCP} q_k - C_k(q_k) = 0 \quad (9)$$

即:

$$b_{MCP} = \frac{C_k(q_k)}{q_k} = q_k + \frac{k}{q_k} \quad (10)$$

同时满足最大利润限制:

$$\frac{d_k(q_k)}{dq_k} = \frac{d[b_{MCP} q_k - C_k(q_k)]}{dq_k} = 0 \quad (11)$$

$$\text{解得: } b_{MCP} = 2_k q_k \quad (12)$$

发电公司报价时,期望获得利润必须为正:

$$k(q_k) = b_k q_k - C_k(q_k) > 0 \quad (13)$$

$$\text{解得: } b_k < q_k + \frac{k}{q_k} \quad (14)$$

最终结算时,发电公司获得利润必须为正:

$$k(q_k) = b_{MCP} q_k - C_k(q_k) > 0 \quad (15)$$

$$\text{解得: } b_{MCP} < q_k + \frac{k}{q_k} \quad (16)$$

发电公司参与市场报价,分段报价的每段右端点处的发电边际成本大于该段报价而小于下一时段的报价^[10],所以有:

$$\frac{dC_k(q_k)}{dq_k} = 2_k q_k > b_k \quad (17)$$

综合以上约束条件,发电公司最优报价为:

$$q_k + \frac{k}{q_k} < b_k < b_{MCP} < 2_k q_k \quad (18)$$

由式(18)可以看出,发电公司的报价和自身的成本系数以及发电出力有直接的关系。在选择报价策略时,报价上限获得最大利润,而中标概率较小;报价下限获得最大期望效用,中标概率较大,而利润较小。排除风险偏好因素,发电公司在满足自己期望效用最大的前提下,应报最低可行价,以最大化上网的概率,获得相应利润,当发电报价小于市场出清价时,就可以中标并获得非负利润。

3.2.2 $b_k = b_{MCP}$ 时期望效用分析

在实际的电力市场中,发电报价曲线的分段一般比较小,而且参与市场报价的参与者较大,所以对任意厂家,市场出清价和自己报价曲线重合的概率很小^[10]。鉴于如此,本文只作理论上的探讨和研究。

此时发电公司期望效用函数为:

$$E_k(b_k) = E\{[b_{MCP}(q_k) - C_k(q_k)] p(b_k = b_{MCP})\} \quad (19)$$

假设市场上有 $m+1$ 个发电公司竞价成功,则至少有 m 个发电公司的报价低于发电公司 k 的报价 b_k , 市场出清价最终以 b_k 进行结算。

首先研究发电报价正好等于市场出清价的概率:

$$p(b_k = b_{MCP}) = \sum_i C_n^{m+1} p_i^{m+1} (b_i > b_k) p_2^{n-(m+1)} (b_i < b_k) \quad (20)$$

借助于概率论中 n 重贝努里试验的理论描述, 由此可知 b_k 服从二项分布 $b(m+1, n, p_1)$ 。根据普哇松定理^[9]及其数学期望的求解, 所以有:

$$E(b_{MCP}) = b_1 = np_1 \quad (21)$$

进而有:

$$E_k(b_k) = E\{[b_{MCP}(q_k) - C_k(q_k)]p(b_k = b_{MCP})\} = E[b_{MCP}(q_k) - C_k(q_k)] \cdot np_1 (b_1 > b_k) \quad (22)$$

可以看出, 此时的最大期望效用同上网电量比值, 发电公司个数 n , 以及 $p_1 (b_1 > b_k)$ 有关。而 $p_1 (b_1 > b_k)$ 的求解与 $p(b_k < b_{MCP})$ 相似, 可以用连续型随机变量的密度函数求解法找到最优值。

4 算例分析

下面以一个简单的算例进行分析, 假设联营体市场注册有 3 家发电公司, 每个公司等效为一台机组, 该时段系统负荷需求为 200 MW, 每台机组的基本参数如表 1 所示。

表 1 发电机基本参数

Tab 1 Generators basic parameters

发电机 序号	生产成本参数		有功出力限值 /MW	
	i	i	P_{max}	P_{min}
1	12500	1.8235	120	40
2	16500	2.0568	200	50
3	10000	2.2475	250	50

注: 发电机生产成本函数 $C_i(q_i) = i + i q_i^2$

依据本文提出的最优报价策略, 各机组报价和期望利润如表 2 所示。

表 2 机组报价策略

Tab 2 Unit bidding strategy

机组 编号	上报电量 /MW	成本 /万元	利润 /万元	报价 / (元·MW) ⁻¹	市场出清价 / (元·MW) ⁻¹
1	100	3.073 5	1.126 5	315. 5	
2	150	3.706 8	0.493 2	420. 0	420. 0
3	200	0	0	505. 5	

机组 1 报价较低, 上报电量 100 MW 全部中标上网。对于机组 2, 由于其报价和市场出清价相同, 系统需要负荷 200 MW, 所以机组 2 只有 100 MW 的

中标电量, 此时, 比值 = 0.67。机组 3 竞价失败。

5 结语与展望

随着发电侧电力市场的开放和竞争的逐渐加剧, 各个发电公司为了获得最大利润而选择各自的最优报价策略。本文基于博弈论和概率论的相关研究, 建立了不完全信息下的发电竞价模型, 借助于随机变量的数学期望和贝叶斯均衡理论, 给出了发电报价的最优报价策略。本文的研究工作只是针对发电公司单时段报价的情况, 对于发电公司多时段的报价, 可以类比文中模型和结论来进行最优策略选择。并且发电公司在长期的报价过程中, 为了获得更大的利润, 很可能形成联盟勾结而进行协调性报价, 这些问题将是作者今后研究的课题。

参考文献:

- [1] 于尔铿, 韩放, 谢开, 等. 电力市场 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998
YU Er-keng, HAN Fang, XIE Kai, et al Electricity Market [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998
- [2] Clayton J S, Erwin S R, Gibson C A. Interchange Costing and Wheeling Loss Evaluation by Means of Incremental [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5 (3): 759-763
- [3] 文福拴, David A K 电力市场中的投标策略 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (14): 1-6
WEN Fu-shuan, David A K Bidding Strategy in Power Market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (14): 1-6
- [4] HAO Shang-you A Study of Basic Bidding Strategy in Clearing Pricing Auctions [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15 (3): 975-980
- [5] 任玉珑, 邹小燕, 张新华. 发电公司不完全信息竞价模型 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (9): 11-14
REN Yu-long, ZOU Xiao-yan, ZHANG Xin-hua Bidding Model of Power Plant Company with Incomplete Information [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (9): 11-14
- [6] 尚金成, 黄永皓, 张维存, 等. 一种基于博弈论的发电商竞价策略模型与算法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (9): 12-15
SHANG Jin-cheng, HUANG Yong-hao, ZHANG Wei-cun, et al A Model and Algorithm of Game Theory Based Bidding Strategy for an Independent Power Provider [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (9): 12-15
- [7] 张维迎. 博弈论与信息经济学 [M]. 上海: 上海三联

- 书店, 1996
- ZHANG Wei-ying Game Theory and Informational Economics [M]. Shanghai: Shanghai Sanlian Bookstore, 1996
- [8] 马莉,文福拴, David A K 采用分段报价规则的竞价策略初探 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 16-19
- MA Li, WEN Fu-shuan, David A K A Preliminary Investigation on Bidding Strategies Employing Step-wise Bidding Rules [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 16-19
- [9] 魏宗舒. 概率论与数理统计教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1983
- WEI Zong-shu Probability and Mathematics Statistics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1983
- [10] 翟桥柱, 周佃民, 管晓宏. 发电竞价曲线的特征研究 [J]. 电网技术, 2002, 26(12): 9-12
- ZHA I Qiao-zhu, ZHOU Dian-min, GUAN Xiao-hong Study on Characteristics of Curves Generation Bidding [J]. Power System Technology, 2002, 26(12): 9-12
- 收稿日期: 2005-10-21; 修回日期: 2005-11-28
- 作者简介:
- 杨根 (1981 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力市场理论及发电厂报价技术支持系统; E-mail: yanggen_mumu@163.com
- 周杰娜 (1958 -), 女, 教授, 主要从事电力市场理论、发电厂报价技术支持系统、电力系统运行与控制的研究工作;
- 胡志勇 (1980 -), 男, 助理工程师, 主要从事电力系统运行与管理工作。

Application of bidding strategies based on probability theory and game theory for generation companies

YANG Gen¹, ZHOU Jie-na¹, HU Zhi-yong²

(1. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China;

2 Nanyang Power Supply Branch, Nanyang 473000, China)

Abstract: In electricity market environment, generation company can gain maximum profits with tactical bidding strategies. Based on these present bidding strategies, this paper presents a mathematical bidding model based on probability theory and game theory. In order to meet the maximum profits for generation company, it details the successful bidding possibility of generation company, and draws an optimal bidding strategies that can fulfill the maximum expectation profits by comparing the possibility distributing of bidding and market clearing price (MCP) and solving mathematical expectation. A simple numerical example proves, the given model and method are effective and feasible.

Key words: electricity market; game theory; probability theory; bidding strategy

(上接第 26 页 continued from page 26)

Analysis of the transient stability of the one-machine infinite bus system using VLSI

ZHANG Xiao-fang, CHEN Xing-ying

(Department of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Considering the importance of the simulation of the power system, firstly, this paper presents the researches and advantages of using analogue VLSI to solve the transient stability of the power system. Then, a single-machine infinite-bus power system (invariable) is mapped to the chip of the analogue VLSI through a series of the formulas and the model is created at Pspice. At last, it is simulated both with and without damp. The result is basically the same as the result of Matlab. The reason of the inaccuracy is analysed and the method to solve the problem is mentioned. The simulation time of Pspice is several ns, so the simulation time is largely increased.

Key words: power system simulation; analogue VLSI; power system transient stability; power-angle curve; Pspice

(上接第 40 页 continued from page 40) also considered, which ensure the solution of the model is DC bad flow solution. The problem is solved by interior point methods. On one hand, this algorithm can handle inequality constraints conveniently which is quite difficult in traditional methods, in this way, the computational results are more accurate. On the other hand, little computation and computational efficiency are achieved by rearrangement variable, reduced correction equation and relaxation technique. The numerical examples and results show that the method is feasible and effective.

Key words: power system; coordination equation; interior point; network flow model; security-constrained; economic dispatch