

基于博弈论的发电厂竞价策略模拟研究与风险分析

高波¹, 张晓东²

(1. 北京四方继保自动化有限公司, 北京 100085; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 对一种基于博弈论的发电厂商参与市场竞价的数学模型进行了研究。该模型以发电厂商的期望收益最大为目标, 采用零和二人混合对策描述竞价问题, 并假设市场电价符合正态分布。由于实际市场环境有很多不确定因素, 模拟运行是评估和修正竞价策略的有效方法。采用实际机组和电力市场的数据, 对几种报价方案进行了模拟, 对收益和风险进行了统计分析, 并对最优报价方案进行了调整。

关键词: 电力市场; 博弈论; 模拟; 风险分析

中图分类号: TM715 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)12-0008-04

0 引言

我国电力工业的市场化改革正在逐步深入地展开, 中国电力已经组建 11 家电力公司, 并制定了加快建立电力市场交易中心、制定电力市场运行规则、逐步实现竞价上网的近期工作目标。在原有的集中计划运行体制下, 发电企业只是生产者; 而在自由竞争的市场规则下, 发电企业同时也是经营者, 必须根据市场要素, 做出相应的决策, 并承担决策的风险。

目前世界各国的电力市场主要是发电侧电力市场。以电子商务技术为基础的短时(次日)电力交易市场广泛采用封闭式拍卖的交易形式。在这种电力市场形式下, 发电厂商的竞价策略将直接影响其经济效益。同时, 对于市场的组织者来讲, 也必须研究发电厂商可能的竞价策略对市场的影响。由微观经济学的理论可知, 对于一个完善的电力市场, 发电厂商的最佳竞价策略是采用边际成本。如果偏离该种竞价策略, 则达不到总体社会效益最大化的市场目标。

对于发电厂商来讲, 竞价策略问题包括三个方面的内容: 对下一个时段电价的预测, 对其它竞争对手竞价策略的估计以及本企业报价策略的制定。其中, 基于博弈论的发电企业报价策略问题的研究越来越多地受到关注, 目前已有一些研究结果^[1]。不过, 这些报价策略较少进行风险分析和实际运行验证。实际上, 报价方案总要面对很多不确定的市场因素, 它作为发电厂商的一个主要决策对象, 在追逐最大利益的同时, 也必然要承担一定的市场风险^[2]。

本文利用已有的电力市场数据, 采用模拟运行的方法, 对一种基于博弈论的发电厂商竞价模型进

行收益分析和风险评估。所考虑的基本竞价模型的外部经营条件为: 发电厂商参加次日电力市场, 市场组织者以市场清除价格作为是否成交的判断依据, 但以发电厂商的报价具体结算; 已知市场电价的分布规律符合正态分布, 不知道其它参与竞价的发电厂商的竞价策略。因此, 竞价问题就是发电厂商和市场之间的零和二人混合对策问题。

1 基于博弈论的报价策略

在电力市场中, 电价受到供求关系的影响。如果市场中总的供电能力大于社会总的需求, 并且独立发电厂商的数量足够多, 可能形成完善的电力市场或称为完全自由竞争的电力市场。微观经济学指出, 对于自由竞争的电力市场, 发电厂商的最优竞价策略是采用本企业发电的边际成本, 从而实现电力工业市场化的目的, 即供求双方整体社会效益最大化。这是一种理想化的状况, 实际的电力市场往往会偏离该最佳状态。另外一种极端的情况是市场中供少于求或发电厂商的数量较少而形成联合, 从而形成电价高涨, 发电厂商从中牟取暴利, 这时必须采用行政手段加以限制。本文考虑一个自由竞争的电力市场, 但具有一定的不完善性, 其整体社会效益小于最佳值。在电力市场中, 发电厂商追逐最大经济效益, 而市场(联营交易中心)则在满足用户侧需求和保证电力系统安全稳定运行的条件下, 以购电支出最小为原则确定购电计划。由于日负荷的变化, 市场竞价通常面向若干时段(通常为 24 时段)进行。交易前, 市场根据需求预测向发电厂商发出次日各个时段的购电计划, 发电厂商则按照一定的竞价策略, 依时段提交竞标出力和电价, 由市场决定是否成交、成交量并安排相应的发电计划。

竞价问题是发电厂商和市场之间的对策问题。其中,发电厂商采用的策略是目标时段的机组出力,即纯策略,也就是单位小时的电量,以及相应的竞标电价;而市场采用的策略是按照一定的竞标规则形成的成交电价,只有低于该成交电价的竞标才能成功。由于成交电价是未知的,则对于发电厂商来讲,市场采用的策略就是预测的成交电价 Y 的概率分布 $G(y)$ 。在竞价问题中, $G(y)$ 表示电价高于 y 的概率,即:

$$G(y) = P(Y > y) \quad (1)$$

市场电价的概率分布可以通过对已知电价数据的统计分析得出,本文对某电力交易市场每日第一时段的 182 个数据进行了统计分析,并采用了正态分布模型(图 1),这些数据的均值为 20.969 8,均方差为 7.317 2。对于次日电价分布的估计,采用预测电价为均值,先验数据的方差为方差的正态分布函数。

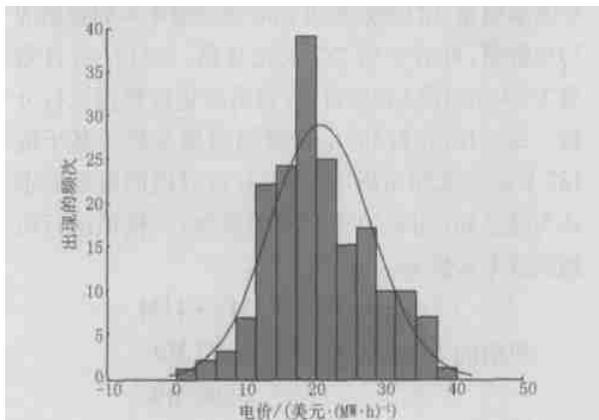


图 1 电价分布统计

Fig. 1 Statistics of power price

下面介绍博弈论中的零和二人混合策略理论。若局中人 1 采用纯策略 x , 局中人 2 采用混合策略 $F(y)$, $F(y)$ 是变量 Y 的分布函数,表示 $Y > y$ 的概率,即:

$$F(y) = P(Y > y) = \int_y^{\infty} f(t) dt \quad (2)$$

其中, $f(y)$ 是 Y 的概率密度函数。若对于确定的纯策略 x 和 y , 局中人 1 得到的支付为 $P(x, y)$, 局中人 2 得到的支付为 $P(x, y)$ 。在本例中, x 表示机组出力, y 表示电价,即发电厂商的支付函数为 $P(x, y) = xy$ 。则对于局中人 2 采用混合策略 $F(y)$ 的情况,局中人 1 的期望支付为:

$$I_{x, F(y)}(x, y) = \int_0^1 P(x, y) dF(y) = \int_0^1 P(x, y) f(y) dy \quad (3)$$

已经假设电价服从正态分布,其概率密度函数

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y-\bar{y})^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

其中, \bar{y} 为电价的均值, σ^2 为电价的均方差。不过,在竞价问题中,市场采用的混合策略是 $G(y)$ 而不是 $F(y)$, 它们之间的关系为:

$$G(y) = \int_y^{\infty} f(t) dt = \int_0^{\infty} f(t-y) dt = \int_0^{\infty} g(t) dt \quad (5)$$

$$\text{其中: } g(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y+\bar{y})^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

显然,发电厂的生产成本是其利润的决定性因素之一。目前,多数电厂还没有发展实时的成本分析技术来比较可靠地反映企业(机组)当前的运行总成本、平均成本和边际成本情况。对于一些自动化程度比较高的大机组,已经开始了在线编制成本曲线的工作,并通常采用二次函数的形式。假设电力生产的成本函数为:

$$C(x) = ax^2 + bx + c \quad (7)$$

其中, x 为机组出力, a, b, c 分别是成本函数的系数。通常 $a > 0$, $2a$ 表示该机组边际成本曲线的斜率, b 表示将机组出力外推到 0 时的起始边际成本, c 表示机组不出力时发生的静态成本,也就是机组不出力时,发电厂商的亏损额。考虑发电成本以后,发电商的期望收益函数 u 为:

$$u(x, G) = \int_0^1 P(x, y) dG(y) - ax^2 - bx - c = \int_0^1 xy \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(y+\bar{y})^2}{2\sigma^2}} dy - ax^2 - bx - c \quad (8)$$

对上式进行积分后,可得:

$$u(x, G) = x\bar{y} - ax^2 - bx - c \quad (9)$$

期望收益函数是上凸的二次函数,最大收益点满足:

$$\frac{du(x, G)}{dx} = 0 \quad (10)$$

可得最佳出力方案为:

$$x_{opt} = \frac{\bar{y} - b}{2a} \quad (11)$$

如果 x_{opt} 小于机组最小出力 N_{min} , 则无报价空间;如果 x_{opt} 大于机组最大出力 N_{max} , 则采用机组最大出力作为最佳出力方案,即 $x_{opt} = N_{max}$ 。相应的报价为最佳出力点对应的边际成本:

$$= \bar{y} \quad (12)$$

2 电价预测的动态回归模型

由上述可知,竞价问题的关键内容之一是对次

日市场电价的预测。电价预测是一个比较活跃的研究领域,目前已经发展了多种方法,如模糊回归模型,神经网络模型,以及基于时间序列分析的自回归模型(AR)、自回归滑动平均模型(ARMA)、动态回归模型^[3](Dynamic Regression Approach)等。由于电价通常受到市场需求的影响,如果市场提前发布次日的用电需求信息,则可以采用动态回归模型,在计算中既考虑电价的历史走势,也考虑需求走势的影响。如果没有可用的次日需求信息,则可以采用AR模型进行估计。本文采用了动态回归模型。若 $p(t)$ 表示时间点的电价, $p(t-k)$ 表示 t 之前第 k 时间点的历史电价; $d(t)$ 表示 t 时间点的市场需求电量, $d(t-k)$ 表示 t 之前第 k 时间点的历史市场需求电量,则 t 时间点的预测电价可以写成:

$$A^{na}(q)p(t) = B^{nb}(q)d(t) + e(t) \quad (13)$$

其中, na 和 nb 分别是使用的历史电价和历史需求量的点数。 $e(t)$ 是误差项,相当于一个均值为0的白噪声。 q 是时间序列后移算子:

$$q^{-k}p(t) = p(t-k), q^{-k}d(t) = d(t-k)$$

$$A(q) = \sum_{k=0}^{na} a_k q^{-k} = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}$$

$$B(q) = \sum_{k=1}^{nb} b_k q^{-k}$$

各项的系数 a_k 、 b_k 利用历史数据确定。本文中采用的参数个数为 $na = 20$ 和 $nb = 20$,计算模型参数使用的历史数据为182点。每日第一时段的历史电价和预测电价参见图2。

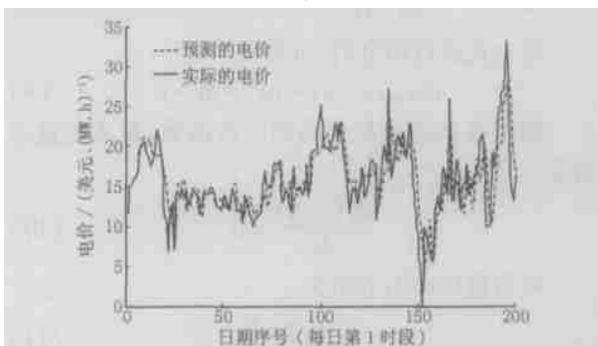


图2 实际历史电价和预测电价

Fig.2 Real historical price and forecasted price of the market

3 报价策略的模拟与风险分析

竞价是电力生产企业的决策行为,影响该决策行为的过程和结果的有两个方面的因素,即企业内部的生产成本和企业外部的市场电价。生产成本是可控制的因素,企业要赢得市场,必须加强管理,提

高电能质量,降低生产成本;市场电价则是发电企业的决策者无法控制的甚至也不能准确预测的,受到多种不确定因素的影响。因此,竞价总是承担一定的风险。如果报价过低,可能导致企业收益降低,甚至亏损;但如果报价过高,则可能不能上网运行,其结果必然是亏损。也就是说,决策报价偏高或者偏低,导致的后果并不相同,最佳报价两侧的风险程度不对等。同时,上述竞价模型采用了市场电价服从正态分布的假设,实际的市场电价通常不会完全满足这一假设条件,有时还会有较大的偏离。预测电价的期望值和实际发生的市场电价的期望值之间,也可能出现一些差别。这些不确定因素是很难在竞价模型中准确体现的。

决策方案的模拟运行是评估决策指标的有效方法之一^[4]。本文利用美国加州电力市场1999年全年需求电量、电价数据,开始时假设前半年的数据为历史数据,对后半年182天每日第一时段(每日划分为24个时段)的竞价、收益情况进行模拟运行分析。每一日该时段电价预测模型参数均基于前182日的需求和市场电价,该日该时段的市场需求认为是已知(由电力市场提前发布)。模拟运行机组的成本函数为:

$$C(x) = 0.05x^2 + 3.51x + 4.44$$

机组的出力范围为: $N_{\min} = 100 \text{ MW}$,

$$N_{\max} = 300 \text{ MW}。$$

报价策略在前述竞价模型的基础上提出,分别对采用抬高报价、模型最优报价和降低报价的几种情况作了模拟运行,即报价分为+1、-1、-2、-3、-4六种情况,竞标出力均采用竞价模型的最优方案。如果报价高于电力市场的实际电价或机组竞标出力低于最小出力,则竞网不成功,机组发生的亏损额等于其静态成本;如果报价等于或低于电力市场电价,竞网成功,按报价计算该机组的收益。模拟运行结果的统计分析见表1。其中,收益的均值 \bar{u} 表明机组运行的长期日平均收益,收益的均方差(标准差)表明收益分布的离散程度,越小表示收益分布越集中,单次竞价的风险程度较小;反之则表示收益分布分散,单次竞价风险增大^[5]。本文采用均方差比 $v = \sigma / \bar{u}$ 来表示收益分布的相对离散程度以便于各种方案的对比。为简单起见,本文未直接考虑机组启停费用的影响,但模拟结果中竞价不成功的比例则与机组启停费用相联系,也

是影响决策指标之一。

表 1 各种报价的收益与风险分析

Tab. 1 Profits and risks analysis of different bidding schemes

报价/(美元· (MW·h) ⁻¹)	+1	-1	-2	-3	-4
收益的均值 (美元·h ⁻¹)	1 302.6	1 504.1	1 726.6	1 761.8	1 664.6
收益的均方差 (美元·h ⁻¹)	1 766.4	1 664.0	1 499.3	1 328.7	1 185.4
竞价不成功的 比例/%	56.0	43.4	28.6	18.7	13.2
均方差比	1.356	1.106	0.868	0.754	0.699

由模拟运行的结果可以看出,该台机组在该电力市场中竞网运行时,采用模型最优报价实际不能获得最大收益,最大收益对应的报价在 - 2 附近;收益的均方差率和竞价不成功的比例则随着报价的适当降低而降低。采用不同机组、不同时段的数据进行模拟运行,可以得到类似的结果。

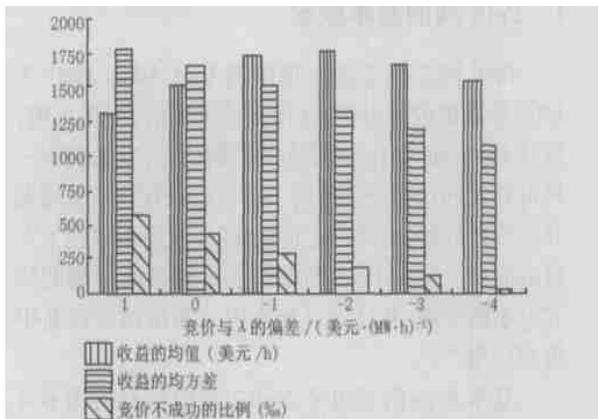


图 3 模拟运行结果统计分析

Fig. 3 Statistics of simulation results

4 结论

本文采用博弈论中的零和二人混合策略建立了发电厂商的竞价模型,并对基于该竞价模型的几种报价方案进行了模拟运行,对收益与风险状况以及竞价不成功的比例进行了统计分析。本文建立的竞价模型可以作为竞价决策的基本参考,但还需要考虑其它因素的影响。在已有信息的基础上进行模拟运行,是评估竞价策略的有效方法,可以比较方便地

考察各种因素的影响结果。本文认为,由于发电厂商的全部容量参与次日市场,报价偏高与报价偏低导致的结果是不同的。在本文参考的市场环境下,在模型最优报价的基础上适当降低报价可以提高机组的期望收益,同时也可以降低竞价的风险和降低竞价不成功的比例。对于市场规则的制订者来讲,本文的一个基本结论是,如果采用报价结算,并增加机组停机风险,可能促使企业降低报价。

参考文献:

- [1] 尚金成,黄永皓,张维存,等 (SHANG Jin-cheng, HUANG Yong-hao, ZHANG Wei-cun, 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 Strategy for an Independent Power Provider) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(9): 1-4.
- [2] 马磊,房鑫焱,侯志俭 (MA Lei, FANG Xin-yan, HOU Zhi-jian). 发电侧市场竞争策略的风险分析及决策模型 (The Risk Analysis and Decision Model of Competition Strategy for Pool Purchase Price) [J]. 继电器 (Relay), 2001, 29(12): 21-24.
- [3] Nogales F J, Contreras J, Conejo A J, et al. Forecasting Next-Day Electricity Prices by Time Series Models [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 342-348.
- [4] James R, Evans, et al. 模拟与风险分析 (Introduction to Simulation and Risk Analysis) [M]. 上海:上海人民出版社 (Shanghai: Shanghai People's Press), 2001.
- [5] 张尧庭 (ZHANG Yao-ting). 信息与决策 (Information and Decision) [M]. 北京:科学出版社 (Beijing: Science Press), 2000.

收稿日期: 2003-10-13; 修回日期: 2004-01-16

作者简介:

高波(1971-),女,工程师,硕士研究生,主要从事发电侧电力市场、继电保护方面的研究工作和变电站设计工作;

张晓东(1969-),男,讲师,博士研究生,目前主要从事火电厂运行成本与经济性分析、发电侧电力市场方面的研究工作。

Simulation and risk analysis of a bidding strategy based on game theory for electricity supplier

GAO Bo¹, ZHANG Xiaodong²

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd, Beijing 100085, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

(下转第 35 页 continued on page 35)

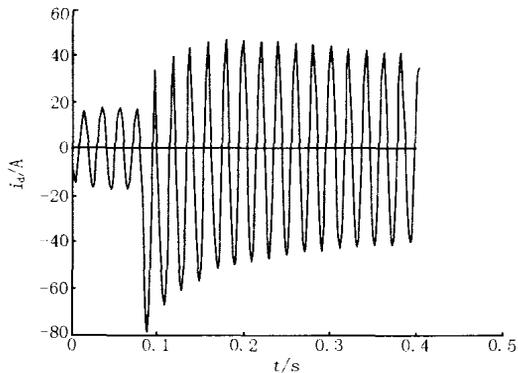


图7 加 FCL 时短路电流最大相波形(额定负载)
Fig.7 Waveform of maximal phase of short circuit current with FCL (rated load)

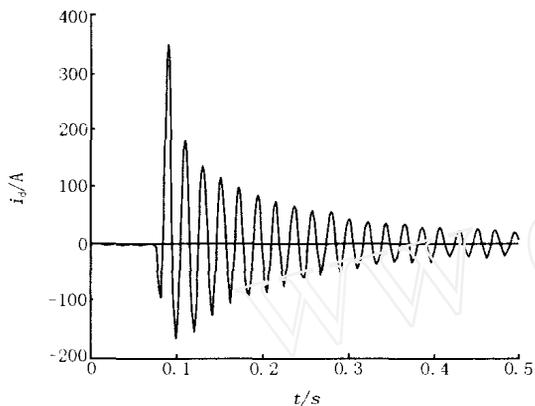


图8 不加 FCL 时短路电流最大相波形(额定负载)
Fig.8 Waveform of maximal phase of short circuit current without FCL (rated load)

1) 在舰船电力系统中, FCL 布置在各发电机端口较为合理;

2) 磁饱和型 FCL 的电感合适值可由式(3)得到;

3) 仿真结果与理论计算吻合良好, 证明本文的工作是有效的, 得到的结论是可信的。

参考文献:

- [1] ZHANG Gai-fan, MA Wei-ming. Transient Analysis of Synchronous Machines [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2002.
- [2] 许实章 (XU Shi-zhang). 电机学 (Electromechanics) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 1990.
- [3] 谌平平, 谭凌云, 吴兆麟 (CHEN Ping-ping, TAN Ling-yun, WU Zhao-lin). 桥式固态限流器的分析和设计 (Analysis and Design of Bridge Type Solid State Current Limiter) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2000, 34(1): 7-9.

收稿日期: 2003-09-15; 修回日期: 2003-11-11

作者简介:

梁旭东(1967-), 男, 硕士研究生, 研究方向为舰船电力系统保护与安全运行;

石雄文(1966-), 男, 工程师, 从事舰船技术保障工作;

叶志浩(1975-), 男, 博士研究生, 研究方向为舰船电力系统保护与安全运行。

Analysis of magnetic saturation FCL based on systems of naval ships

LIANG Xu-dong¹, SHI Xiong-wen², YE Zhi-hao¹

(1. Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Zhoushan Base of Naval East Sea Fleet, Zhoushan 316000, China)

Abstract: With the accretion of naval ships power system capacity, the amplitude of short circuit current increases greatly, consequently the disjuncting capacity of the present switch can not fulfill the demand of short circuit protection. Therefore, the amplitude of short circuit current must be limited. The working principle of magnetic saturation FCL is discussed, and based on the theory of typical machine transient analysis, the formula of calculating suitable inductance is obtained. The simulation model using SimPower-Systems module of simulink is established and the simulation analysis is carried out during short circuit when the system equipped with or without FCL. Simulation results accord with the theoretical calculation ones, which proves the theoretical analysis is believable.

Key words: magnetic saturation; FCL; power system; short circuit

(上接第 11 页 continued from page 11)

Abstract: A mathematical model of bidding strategy based on game theory for electricity suppliers in competitive power market is studied. The aim of the model is maximizing its expected income. It describes the bidding problem with zero-sum and two-person mixed strategy and proposes the market price according to normal distribution. But there are many factors that cannot be assured by decision-maker in power market. Simulation has proved to be an effective method to evaluate and correct the bidding scheme. Some different schemes are presented for the simulated bidding processes. Price and demand data of a power market and cost function of a steam-turbine generator unit are adopted for the simulation. The simulation results especially the average income and risk are analyzed. A revised optimal bidding scheme is presented.

Key words: power market; game theory; simulation; risk analysis