

远期合约助长发电商默契串谋的机理分析

王建斌¹, 董宪纲²

(1. 华北电力大学电力经济研究所, 北京 102206; 2. 邢台供电公司, 河北 邢台 054000)

摘要: 远期合约作为降低市场力的有效手段之一, 已广泛应用于许多国家的电力市场。但是, 在日复一日重复报价的情况下, 发电商之间为了避免价格战有可能形成某种默契串谋, 人为造成电价上升。该文首先建立了包含远期合约时电力市场均衡的EPEC模型; 然后构造了发电商形成默契串谋的随机触发策略。仿真结果说明了远期合约的存在的确有助于降低发电商的市场力; 但是发电商也可以利用远期合约实现默契串谋, 为监管机构有针对性地制定措施以避免默契串谋, 限制市场权力提供了理论依据。

关键词: 电力市场; 市场力; 远期合约; 默契串谋

Mechanism analysis of forward contracts facilitating generator's tacit collusion

WANG Jian-bin¹, DONG Xian-gang²

(1. School of Business Administration, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Xingtai Power Supply Company, Xingtai 054000, China)

Abstract: As one of the effective tools to mitigate market power in power markets, forward contracts have been widely used in many countries. But when generators bid repeatedly day by day, they can form tacit collusion to avoid price competition. First, an EPEC (Equilibrium Problem with Equilibrium Constrains) model is developed to analyze the power markets which settled both in real time market and forward market. Then a stochastic trigger strategy is constructed based on infinite repeated game theory. The numerical example shows that on the one hand forward contracts can mitigate market power dramatically, but on the other hand it facilitates generators to form tacit collusion. It is a useful tool for policy makers to design proper policy to cure the curse of market power in the future.

Key words: power market; market power; forward contracts; tacit collusion

中图分类号: TM73; F224.32

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)05-0037-04

0 引言

电能不能大量有效地储存, 这是制约电力市场健康、有序发展的主要因素之一。而通过电力远期合约交易, 电力可以被“虚拟”地储存, 从而减少了发电商操纵现货电价的兴趣, 有利于市场公平竞争, 形成高效的市场均衡电价。因此, 远期合约(Forward Contracts)作为降低市场力的有效手段之一, 已广泛应用于许多国家的电力市场中^[1]。

远期合约的存在使发电商面对类似囚徒困境的问题, 签订远期合约一方面可以扩大发电商的市场份额, 而另一方面会导致实时价格的降低。博弈均衡的结果是所有发电商都出售远期合约, 即持有

空头(short position), 并且出售的合约数量是内生的^[2]。但是, 在欧美发达国家电力市场却都可以观察到市场价格远高于竞争性价格, 甚至出现发电商持有多头(long position), 市场价格高于没有远期合约时的价格的情况^[3,4]。这一现象使人们认识到发电商之间有可能形成某种形式的串谋。默契串谋(tacit collusion)是一种非合作性串谋, 以某种共同利益为基础形成并维持。参与者之间仅仅形成某种默契, 而没有明显的“商谈”行为, 也无和约、协议的约束, 是默契串谋者独立并自愿地参与联合限制产量或抬高价格的活动^[5]。这种限制产出、抬高价格的市场结果与卡特尔等明显的串谋如出一辙, 但是监管部门难以通过恰当的手段予以

辨认和监管,更没有法律手段予以禁止。

有许多学者注意到发电商市场活动的重复特性为默契价格的形成提供了良好的环境^[6,7]:电力市场的监管部门为了做到市场透明和公正,必须定期发布有关实时市场和合约市场的交易信息,每个发电商的报价和容量会公开,这样发电商不仅容易形成默契报价策略,而且很容易监测到对手的偏离行为,从而采取惩罚措施。

目前,在合约市场与实时市场关系的研究中应用较多的竞争均衡模型主要有:古诺(Cournot)模型和线性供应函数(LSF-Linear Supply Function)模型。文献[8]采用了线性供应函数模型,指出在计入远期合约时,可以得到较低的市场均衡价格,并且合约电量越大,市场均衡价格越低。但是,该文没有考虑发电商签订远期合约的意愿,而是将合约电量作为已知外部参数。文献[9]采用两阶段古诺博弈模型分析了远期合约对实时市场的影响。该模型将发电商签订的合约电量作为内部决策变量,很好地将发电商签订远期合约的意愿融合到模型之中,只是该文局限于双寡头。本文采用与文献[9]类似的两阶段分析框架,提出了单次博弈情况下,包含远期合约时市场均衡的EPEC模型;然后在该模型的基础上,应用无限期重复博弈理论构造了基于触发策略(trigger strategies)的默契串谋报价策略,并对维持该策略成立的条件做了分析。本文提出的EPEC模型与文献[9]相比,不仅从双寡头扩展到了多寡头,而且从线性成本函数扩展到了二次成本函数,因而更加通用。

1 电力市场均衡的 EPEC 模型

假定系统中有 N 个发电商,发电商 i 有 N_i 台机组。分别用 $q_{i,j}$ 和 $x_{i,j}$ 表示发电商 i 的第 j 台机组在实时市场的出力和出售的合约电量。在合约市场与实时市场并存时,需要用两阶段博弈模型描述发电商的行为^[9],如图 1 所示。

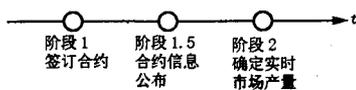


图1 两阶段博弈模型的时间变迁图

Fig.1 Timing of the two-stage game model

阶段1:发电商以古诺方式签订合同,即同时确定合约电量 $x_{i,j}$,在阶段1形成一个均衡问题EP(Equilibrium Problem)。

阶段1.5:合约信息公开,每个发电商知道其他发电商的合约电量。这样,在第二阶段开始时具有完全信息。

阶段2:在实时市场发电商以古诺方式同时决定出力 $q_{i,j}$,在阶段2又形成一个均衡问题。但是阶段2的均衡解与在阶段1形成的结果有关,则发电商在阶段1出售合约时必须考虑到这一影响。这样阶段1的均衡问题就转化为一个有均衡限制的均衡问题EPEC(Equilibrium Problem with Equilibrium Constrained)。

假设各机组的发电成本具有二次函数的性质:

$$C_{i,j}(q_{i,j}) = \frac{1}{2} a_{i,j} q_{i,j}^2 + b_{i,j} q_{i,j} \quad (1)$$

需求为价格的严格递减线性函数:

$$D = D_0 - \alpha P \quad (2)$$

其中: P 为实时市场的电价; D_0 为价格为零时的需求; $\alpha \geq 0$ 。

在第二阶段发电商 i 的目标函数为:

$$\max_{q_{i,j}} \pi_i = P \sum_{j=1}^{N_i} (q_{i,j} - x_{i,j}) + h \sum_{j=1}^{N_i} x_{i,j} - \sum_{j=1}^{N_i} C_{i,j}(q_{i,j}) \quad (3)$$

其中: h 为无套利合约价格。

约束为:

$$\underline{q}_{i,j} \leq q_{i,j} \leq \bar{q}_{i,j}; \quad j = 1, 2, \dots, N_i \quad (4)$$

其中: $\underline{q}_{i,z,j}$, $\bar{q}_{i,z,j}$ 为发电商 i 的第 j 台机组出力的上、下限。

式(3)前两项分别为发电商 i 在实时市场和合约市场的收益,第三项为发电商 i 的发电成本。

对于由式(3)、(4)形成的非线性有约束极值问题,其最优点应满足库恩-塔克(K-T: Kuhn-Tucker)条件。为此求解式(3)、(4)的K-T条件:

$$P - \frac{1}{\alpha} \left(\sum_{j=1}^{N_i} (q_{i,j} - x_{i,j}) - a_{i,j} q_{i,j} - b_{i,j} - \bar{u}_{i,j} + \underline{u}_{i,j} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\bar{u}_{i,j} \geq 0; \quad \bar{q}_{i,j} - q_{i,j} \geq 0; \quad \bar{u}_{i,j}(\bar{q}_{i,j} - q_{i,j}) = 0 \quad (6)$$

$$\underline{u}_{i,j} \geq 0; \quad q_{i,j} - \underline{q}_{i,j} \geq 0;$$

$$u_{i,j}(q_{i,j} - \underline{q}_{i,j}) = 0 \quad (7)$$

其中: $j = 1, 2, \dots, N_i$ 。

将 N 个发电商的 K-T 条件组合到一起, 形成一个线性互补问题 LCP (Linear Complementary Problem), 并且在本文所假设的条件下, 该问题有唯一解^[10]。

因为合约买卖双方对第二阶段博弈中产生的实时价格都有一个理性的认识, 在风险中性的假设下, 买方不会以高于实时价格期望值的价格签订合同, 卖方不会以低于实时价格期望值的价格签订合同。因此, 最终合约的价格 $h = P$ 。在第一阶段发电商 i 的目标函数为:

$$\max_{x_{i,j}} \pi_i = P \sum_{j=1}^{N_i} q_{i,j} - \sum_{j=1}^{N_i} C_{i,j}(q_{i,j}) \quad (8)$$

约束条件为: N 个发电商的 K-T 条件。

这样, 发电商 i 的优化问题成为一个有均衡限制的数学规划问题 MPEC (Mathematical Problem with Equilibrium Constrains)。将 N 个发电商的 MPEC 问题组合到一起, 如前所述, 形成一个 EPEC 问题。由于式 (8) 不再具有可微的性质, 无法仿照阶段 1 的办法求解其 K-T 条件。可以采用求解非合作博弈纳什均衡解的常用算法, Nikaido - Isoda 函数法构造迭代算法求解^[11]。

2 无限期重复博弈模型

为了便于分析, 假设合约市场在偶数时段 ($t = 0, 2, \dots$) 开放, 实时市场在奇数时段 ($t = 1, 3, \dots$) 开放, 并进一步假设在两个时段之间的贴现因子 (discount factor) 为 $\sqrt{\delta}$ 。这样在连续两个合约市场之间或实时市场之间的贴现因子为 δ 。记 $x_{i,j}^{t,t+k}$ 为发电商 i 的第 j 台机组在 t 时段出售, 需要在 k 时段之后的实时市场执行的合约数量。假设发电商为了逃避监管, 希望形成的默契价格具有随机性, 则根据无限期重复博弈理论可以构造如下的触发策略:

1) 正常情况下, 各发电商在偶数时段选择合约电量 $x_{i,j}^{t,t+1} = \lambda x_{i,j}$, $x_{i,j}^{t,t+k} = 0, k > 1$; 在奇数时段选择实时电量为在给定合约电量时的均衡产出, 可由上述 EPEC 模型中的 LCP 子模型求得, 记为 $q_{i,j}^{x,eq}$ 。其中 λ 为默契因子 (tacit factor), 可由市场中的领导者以某种方式设定, 并假设在其支撑区间 $[\underline{\lambda}, \bar{\lambda}]$ 内, 概率分布函数为 $F(\lambda)$, 概率密度函数

$$f(\lambda) = F'(\lambda)。$$

2) 发电商在偶数时段监测到此前有偏离情况发生, 则选择合约电量 $x_{i,j}^{t,t+1} = x_{i,j}$, $x_{i,j}^{t,t+k} = 0, k > 1$ 。

从上述策略可以看出, 由于各发电商在奇数时段采用了均衡策略, 所以发电商在此阶段采取偏离行动是无利可图的。假设发电商 i 在偶数时段偏离, 则可以由上述 EPEC 模型中的 MPEC 子模型得到其最优合约电量, 记为 $x_{i,j}^\lambda$ 。在奇数时段, 各发电商仍然按照 (1) 中规定的均衡策略采取行动, 则可以由上述 EPEC 模型计算出发电商 i 的收益, 记为 π_i^λ 。记发电商 i 在未采取偏离行动时的收益为 π_i^x , 则发电商 i 由于采取偏离措施获得的额外收益为 $\pi_i^\lambda - \pi_i^x$ 。此后各周期, 由于其余发电商会采取惩罚措施, 即按策略 (2) 行动, 发电商 i 只能获得收益 π_i , 发电商 i 的损失为 $\pi_i^E - \pi_i$, 其中 π_i^E 为发电商 i 在不采取偏离行动时的期望收益, 计算公式如下:

$$\pi_i^E = \int_{\underline{\lambda}}^{\bar{\lambda}} f(\lambda) \pi_i^x d\lambda \quad (9)$$

考虑贴现因子的影响, 发电商 i 在偶数时段不偏离, 应有:

$$\pi_i^d - \pi_i^x \leq \frac{\pi_i^E - \pi_i^f}{1 - \delta_i^\lambda} \quad (10)$$

令 $\delta^\lambda = \max\{\delta_i^\lambda; i \in N\}$, $\delta^{\max} = \max\{\delta^\lambda, \lambda \in [\underline{\lambda}, \bar{\lambda}]\}$, 则当现行贴现因子 δ 大于 δ^{\max} 时, 上述的触发策略能够得到维持。

3 算例

以 IEEE30-bus 系统为背景模拟电力市场^[12]。表 1 给出了市场组成数据和机组的成本数据。逆需求函数为:

$$p = \frac{189.2 - D_0}{0.5} \quad (11)$$

表 1 市场组成数据和机组成本数据

Tab.1 Market structure data and unit cost coefficients				
发电商	机组	最小(最大)出力/MW	a /\$ \cdot (MW^2h)^{-1}	b /\$ \cdot (MWh)^{-1}
1	G1	0 (80)	0.04	2
2	G2	0 (80)	0.035	1.75
3	G3	0 (50)	0.125	1
4	G4	0 (55)	0.016 6	3.25
5	G5	0 (30)	0.05	3
6	G6	0 (40)	0.05	3

将上述数据输入到市场模型中, 就可以计算出

在包含远期合约时电力市场的均衡价格及各机组的出力水平, 仿真计算结果如表 2 第 2 列所示。为了对比方便, 表 2 中第 3 列给出了没有远期合约时电力市场的均衡价格及各机组的出力水平。

表 2 机组出力、合同电量及电价

Tab.2 Unit output and market price with and without forward contracts

机组	包含远期合约时	无远期合约时
	机组出力/MW	机组出力/MW
1	32.133	27.090
2	33.216	27.279
3	28.551	26.477
4	30.680	26.784
5	28.747	26.470
6	28.757	26.470
电价/ $\$/\cdot(\text{MW}^2\text{h})^{-1}$	14.233	57.26

从中可以看出, 远期合约有助于降低市场均衡价格, 增加各机组出力水平, 降低发电商的市场力。将上述计算结果输入到串谋模型中, 就可以分别计算出在不同默契因子下, 各个发电商维持串谋所需的最小贴现因子, 从而得到各发电商最小贴现因子随默契因子变化的趋势, 如图 2 所示。

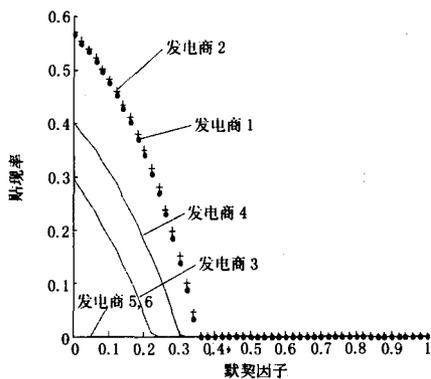


图 2 各发电商最小贴现因子与默契因子的关系

Fig.2 Minimum discount factor versus tacit factor of each generator

图 2 中, 发电商 5 与发电商 6 的最小贴现因子完全相同, 所以在图形中重合为一条直线, 即与横坐标轴重合的直线。在每个默契因子下, 取各曲线的最大值, 就可以得到维持串谋所需的最小贴现因子曲线, 在此案例中, 该曲线与发电商 2 的曲线重合。最后, 取该曲线的最大值, 就得到了使上述触发策略得以维持的最小贴现因子, 在此案例中为 0.571 9。在此策略下, 系统的平均电价为 35.749 $\$/\text{MWh}$ 。在用 gams 软件和 Matlab 软件实现本文模型的过程中, 利用了文献[13]提供的接口, 特此感

谢!

4 结论

本文对远期合约助长发电商形成默契串谋的机理进行了定量分析, 在提出了包含远期合约时电力市场均衡的 EPEC 模型的基础上, 构造了无限期重复博弈情况下, 发电商形成默契串谋的随机触发策略, 并分析了使该策略得以维持的充要条件。为我国未来在电力合约市场设计过程中有针对性地制定相关原则以限制市场权力提供了理论依据。数字算例验证了模型的合理性和算法的有效性。仿真结果说明了远期合约的存在的确有助于降低发电商的市场力; 但是发电商也可以利用远期合约实现默契串谋。对于本文构造的随机触发策略, 维持其成立的最小贴现因子并不难满足, 而且由于随机性的存在, 使监管机构很难发觉。对此, 监管机构应予以足够的重视。

参考文献

- [1] Newbery D M. Mitigating Market Power in Electricity Networks[J]. In: European Market of Electricity: What have We Learnt from Recent Lessons? Spot Market Design, Derivatives and Regulation[C]. 2002.
- [2] Allaz B, Vila J L. Cournot Competition, Forward Markets and Efficiency[J]. Journal of Economic Theory, 1993, 59:1-16.
- [3] Borenstein S, Bushnell J B, et al. Measuring Market Inefficiencies in California's Restructured Wholesale Electricity Market[J]. American Economic Review, 2002, 92(5):1376-1405.
- [4] Wolak F A, Patrick R. The Impact of Market Rules and Market Structure on the Price Determination Process in England and Wales Electricity Market[J]. 2001.
- [5] Martin S. Advanced Industrial Economics[M]. Shanghai: University of Finance & Economics Publishing Company, 2003.285-290.
- [6] Kimbrough S O, LU Ming, et al. Learning and Tacit Collusion by Artificial Agents in Cournot Duopoly Games[D]. Philadelphia: University of Pennsylvania, 2004.
- [7] Le Coq C. Long-term Supply Contracts and Collusion in the Electricity Market[D]. Stockholm School of Economics, 2004.
- [8] 张少华, 王皖, 等. 考虑远期合同交易的发电市场分段线性供应函数均衡模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 21(27):17-22.

(下转第 53 页 continued on page 53)

Data的状态,如果标志位为1,发送相应的1级数据,发送完毕后把标志位设置为0,装置可以同时有多个1级数据,每次召唤仅响应一帧。

根据上述思路设计的103软件模块在中低压保护测控一体化装置中得到了实现,并通过了相应测试,在多个110 kV及以下电压等级的变电站自动化系统中中和不同厂家的通信管理机或主站系统成功连接,运行稳定,具有很好的通用性和开放性,达到了设计性能要求。

4 结语

103规约是一个规则比较复杂的IEC传输规约,要在装置中成功应用,需要了解它的通信参考模型、不同信息的传输规则和ASDU定义,本文结合微机型保护测控一体化装置,分析了103规约的具体应用功能、ASDU类型、传输过程和软件实现,针对不同类型的1级数据传输,提出了通过1级数据状态字来控制的方法,应用103规约的微机保护测控装置也取得了较好的运行效果。

参考文献

- [1] DL/T667-1999,远动设备及系统,第5部分:传输规约,第103篇:继电保护设备信息接口配套标准[S].
DL/T667-1999,Telecontrol Equipment and Systems, Part5:Transmission Protocols, Section 103 Companion Standard for the Information Interface of Protection Equipment[S].
- [2] 廖泽友,蔡运清. IEC 60870-5-103和IEC 60870-5-104协议应用经验[J]. 电力系统自动化,2003,27(4):1-3.
LIAO Ze-you, CAI Yun-qing. Experience of Using IEC 60870-5-103 and IEC 60870-5-104 Transmission

Protocols[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4):1-3.

- [3] 徐立子. 变电站自动化系统 IEC60870-5-103 和 IEC60870-5-104 协议的分析和实施[J]. 电网技术, 2002, 26(4):62-65.
XU Li-zi. Analysis and Implementation of Protocol IEC60870-5-103 and IEC60870-5-104 for Substation Automation System[J]. Power System Technology, 2002, 26(4):62-65.
- [4] 谭嘉虎. 用于微机保护设备基于 IEC 60870-5-103 传输规约的通信接口技术的研究与开发[J]. 电网技术, 2004, 28(22):31-35.
TAN Jia-hu. Research and Development of IEC 60870-5-103 Transmission Protocol Based Communication Interface Technology for Microcomputer Based Protection Devices[J]. Power System Technology, 2004, 28(22):31-35.
- [5] 张丹涛,张永华,缪相林. 基于IEC 60870-5-103通信规约的通信流程研究及软件方案[J]. 电力系统通信, 2005, 26(3):26-28.
ZHANG Dan-tao,ZHANG Yong-hua, MIAO Xiang-lin. Research and Software Disign of Communication Flow Based on 103 Transmission Protocols and Software Precept[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2005, 26(3):26-28.

收稿日期:2006-05-26; 修回日期:2006-12-12

作者简介:

王培增(1973-),男,工程师,本科,研究方向为自动控制系统技术;E-mail:wpzzhl@163.com

董世军(1970-),男,工程师,本科,研究方向为电力系统继电保护及其自动化。

(上接第40页 continued from page 40)

- ZHANG Shao-hua, WANG Ni, et al. Piece Wise Linear Supply Function Equilibrium Model for Power Generation Markets with Forward Contracts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 21(27): 17-22.
- [9] Willems B. Cournot Competition, Financial Option Markets and Efficiency[J]. CSEM WP 139, 2005.
- [10] Cottle R W, Pang J S, Stone R E. The Linear Complementarity Problem[M]. Boston: Academic Press, 1992.
- [11] Uryasev S, Rubinstein R Y. On Relaxation Algorithms in Computation of Noncooperative Equilibria[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 39(6): 1263-1267.

- [12] Contreras J, Klusch M, et al. Numerical Solutions to Nash-Cournot Equilibria in Coupled Constraint Electricity Markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004,1(19): 195-206.

- [13] Ferris M C. MATLAB and GAMS: Interfacing Optimization and Visualization Software[EB/OL]. <http://www.cs.wisc.edu/math-prog/matlab.html>,2005.

收稿日期:2006-11-01; 修回日期:2007-01-05

作者简介:

王建斌(1973-),男,博士研究生,研究方向为电力经济;E-mail:123pighead@sohu.com

董宪纲(1953-),男,经济师,研究方向为电力经济。