

电力市场的多代理模型

宋依群

(上海交通大学电气工程系, 上海市 徐汇区 200030)

MULTI-AGENT MODEL OF ELECTRICITY MARKET

SONG Yi-qun

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Xuhui District, Shanghai 200030, China)

ABSTRACT: In this paper, a Multi-Agent System (MAS) of repeatedly gamed electricity market in which individual firm is modeled as an agent with strategy of conjectured supply function is proposed based on Equilibrium Theory. It can be used to foresee and analyze the potential power existed in the repeated electricity market with incomplete information. As an agent, individual firm who aims at short term profit optimization regulates dynamically its conjectures according to published historical data of market operation. It is shown via IEEE 30-bus system simulation the feasibility and effectiveness of proposed multi-agent model of electricity market with inelastic electricity demand.

KEY WORDS: Electric power engineering; Electricity market; Agent; Learning; Conjectured Supply Function; Market Power

摘要: 该文提出了基于猜测供给函数模型的发电公司 Agent 模型, 并构造了重复博弈电力市场的 Multi-Agent(多代理)模型。该模型可以用于分析和预测重复博弈的不完全信息电力市场环境下各发电公司潜在的市场力。各发电公司作为一个 Agent, 根据公布的前阶段市场运行数据动态地调整其微增响应猜测, 以获得短期最大利润。通过电力需求无弹性的 IEEE6 机 30 母线系统算例验证, 该文所提出的电力市场多代理模型具有可行性和有效性。

关键词: 电力工程; 电力市场; 代理; 学习; 猜测供给函数; 市场力

1 引言

全球电力工业的市场化改革正在逐步推进和深化, 国内对电力市场的研究也如火如荼^[1-4]。目前, 电力市场的运行一般以每天或者每小时进行各类市场的投标, 当市场结清后由 ISO 公布市场结清情况, 市场参与者的历史投标数据的公布情况视不同电力市场的运行规则而定, 例如澳大利亚国家电力市场

公布的是前一天及以前的所有历史投标数据, 而加州市场、PJM 市场等则公布 6 个月前的投标数据。不管历史数据是否迟滞公布, 都意味着发电公司能够根据相关的这些历史运行及投标数据进行“学习”(Learning), 制定相应的最佳策略, 以达到自身利润最大化的目的。而学习恰恰是多代理系统 (Multi-Agent System, 简称 MAS) 中各代理所应有的不可或缺的能力。因此, 电力市场具有的重复博弈特性, 使得多代理系统在电力市场中的应用研究得到了极大关注^[5-10]。

D W Bunn^[5-7]提出了一种基于多代理的模拟方法来模拟英国电力市场的运行, 目的是为了分析联营体模式和双边交易模式下电力市场的有效性, 检验各独立发电机组在市场中的行为。文献[8]应用多代理系统模拟了新英国电力市场 (NETA) 的运行, 结合日前市场和平衡市场, 提出多种目标方式操作, 同时将发电商和购电商都作为 Agent 来进行分析, 但是各 Agent 的学习策略均为对上次投标价格的修正 (Mark Up)。文献[10]基于 OAA 软件构造了一个多代理仿真器, 应用 Agent 模拟基于价格竞争的电力市场中各个参与者, 如发电商、供电商、投机商、市场运行机构以及电网运行机构等。Visudhiphan 和 Illic^[11]则试图将电力市场模拟成一动态过程, 并采用几种不同的学习策略用于不断调整他们的投标策略。但是上述文献都忽略了电力市场作为一个典型的寡头竞争市场时, 市场参与者即各发电公司之间的博弈特征, 没有分析市场可能出现的均衡运行情况。文献[12]虽然提出了基于市场均衡的微增响应猜测模型可以具有动态学习特性, 但是该模型给出的是市场中单个参与者的策略, 并且要求市场电力需求必须有弹性。

本文应用基于猜测供给函数的发电公司 Agent 模型来构造电力需求无弹性电力市场的多代理模型。作为 Agent 的发电公司以短期最大利润为目标，以猜测供给函数为决策，通过对市场环境的认识不断调整各自的策略。应用多代理模型对重复博弈的电力市场进行模拟可以预测、分析不完全信息电力市场的均衡运行状态及各发电公司潜在的市场力。

2 Agent 的基本概念

代理是一个物理的或抽象的实体，它能够作用于自身与环境，并能对环境的变化作出反应。自从上世纪 50 年代 John McCarthy 提出代理 (Agent) 思想后，代理技术一直是人工智能领域的一个重要研究内容。代理具有知识、目标和能力。知识指代理关于它所处的世界或它所要求解的问题的描述；目标指代理所采取的一切行动都是面向目标的；而能力则指代理具有推理、决策、规划和控制能力。多个代理可以构成一个多代理系统 MAS，系统中各个代理以独立的方式或者以一起协作的方式来求解问题。

电力工业进行市场化改革以后，电力系统的运行逐渐由垄断集中控制走向个体化竞争，市场中所有的发电公司的运营目标也转向了自身利润的最大化，这意味着传统的集中控制决策模式已经转变成分散控制决策模式，因此发电公司之间互相竞争的电力市场就是一个各代理之间相互独立操作的多代理系统。由代理代表不同的市场参与者，从市场公布的运行信息获取知识，从中进行学习并制定对自身最有利即能够产生最大利润的决策。各代理之间进行博弈竞争，最终引导市场趋于均衡运行。

3 发电公司 Agent 模型

3.1 Agent 目标描述

在一个具有 N 个发电公司的联营体模式现货电力市场中，设逆需求曲线为 $p=e-fQ$ ，其中 p 、 Q 分别为市场结清电价和总出力， e 、 f 分别为逆需求曲线的定常系数。

市场中各发电公司均理性地追求其自身利润最大化。作为一个 Agent 的发电公司 i 的目标为当前阶段的利润最优化，即

$$\begin{cases} \max \pi_i(t) = p(t)q_i(p,t) - W_i[q_i(p,t)], & \forall i \\ \text{st } D(p,t) = \sum_{i=1}^N q_i(p,t) = e - fp(t) \\ W_i[q_i(p,t)] = a_i + b_i q_i(p,t) + c_i q_i^2(p,t)/2 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $D(p,t)$ 分别为阶段 t 的负荷需求和该阶段市场电价 p 的线性函数 (e 、 f 为系数)，并与总发电出力持平； $W_i[q_i(p,t)]$ 为发电公司 i 的二次生产成本函数； a_i 、 b_i 和 c_i 为系数。

3.2 Agent 决策描述

当优化目标式(1)满足一阶优化条件^[13-14]

$$\frac{\partial \pi_i(t)}{\partial p(t)} = 0 \quad (2)$$

可得发电公司 i 在该阶段的优化出力—价格报价函数应该满足如下关系：

$$q_i(p,t) = \alpha_i(t) + \beta_i(t)p(t) \quad (3)$$

$$\text{其中} \quad \begin{cases} \alpha_i(t) = \frac{-b_i(V_i(t) + f)}{1 + c_i(V_i(t) + f)} \\ \beta_i(t) = \frac{V_i(t) + f}{1 + c_i(V_i(t) + f)} \end{cases} \quad (4)$$

式中， $V_i(t) = [\partial q_{-i}(t)] / \partial p(t)$ 为阶段 t 发电公司 i 对其所有竞争对手的总出力相对于市场电价微增的响应猜测变量； $q_{-i}(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N q_j(p,t)$ 为发电公司 i 所有竞争对手在阶段 t 的出力。

由于文献[13-14]提出的发电公司猜测供给函数就是对竞争对手对市场电价变化而随之引起的自身策略变化响应的猜测。由于各发电公司本身策略的变化会影响电力市场的运行状态，即市场结清出力及其分布、市场结清电价都会发生变化，而这些恰恰就是发电公司所处的环境，因此也可以说是发电公司所处的竞争环境对自身策略响应的一种猜测和估计。由于在市场环境下，各发电公司可以根据周围环境的变化进行学习并不断调整自身的猜测供给函数，这就构造了发电公司作为一个 Agent 进行学习的学习规则。

3.3 Agent 学习规则描述

由于电力市场中各发电公司可得到的市场信息不完全，只有各阶段的总负荷 $D(t)$ 、市场结清电价 $p(t)$ 、以及各发电公司自身的结清出力 $q_i(t)$ 。另外本文根据澳大利亚国家电力市场的运营规则，假定历史的报价数据全部公开。在这种情况下，每个发电公司作为一个 Agent，能够从不断变化的市场运营环境中获取知识从而进行学习，从而使自身利润最大化。学习方法可以根据不同发电公司是否考虑前阶段策略而分为简单学习和增强型学习两种。

(1) 简单学习

如果各发电公司的目标仅为在下一同负荷需求曲线竞价时段中所获利润最大化, 则可以根据 V_i 定义按简单学习规则如下:

$$V_i(t) = [\partial q_{-i}(t-1)] / [\partial p(t-1)] \quad (5)$$

即将上一阶段 $t-1$ 中公司 i 所有竞争对手对市场电价变化所愿意做出的出力变化作为当前 t 阶段的猜测。根据式(5)可得该猜测即为发电公司 i 所有竞争对手在上一同负荷需求曲线竞价时段中具有非零截距的线性报价函数的一阶系数的集结

$$\sum_{j=1, j \neq i}^N \beta_j(t-1)。$$

(2) 增强型学习

如果考虑前几个同负荷竞价时段微增响应猜测对现阶段 $V_i(t)$ 的影响, 还可以采用增强型学习方法^[15], 规则如下

$$V_i(t) = \frac{\partial q_{-i}(t-1)}{\partial p(t-1)} + \sum_{k=1}^L r_k V_i(t-k) \quad (6)$$

式中 L 为需要计及影响的历史阶段总数; r_k 为对应于时段 $(t-k)$ 的微增响应猜测的权重。如果所有 r_k 均为零, 该增强型学习方法就是前面所述的简单学习。

4 电力市场的 Multi-Agent 模型

电力市场中各个发电公司各自追求短期利润最优, 因此各个发电公司作为 Agent 其目标相互独立, 各自所能够获得的知识与决策也相互独立。整个电力市场的多代理模型如图 1 所示。

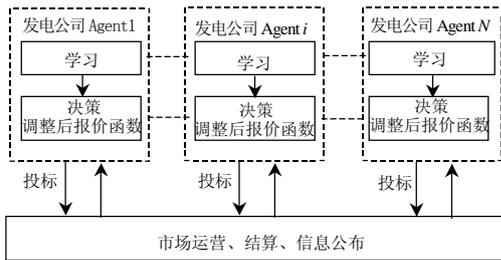


图 1 电力市场的 Multi-Agent 模型

Fig. 1 Multi-agent model of electricity market

表 2 各算例市场均衡结果

Tab. 2 Numerical results of equilibrium in each case

	市场结清电价/(\$/MWh)	总出力/MW	公司 1	公司 2	公司 3	公司 4	公司 5	公司 6
算例 1:	8.5046	1400						
V			194.77	190.61	201.17	201.17	219.58	165.12
出力/MW			258.8	296.96	183.66	183.66	111.92	365
利润(\$/h)			1013.6	1234.2	589.35	589.35	448.48	1362.4
算例 2:	7.7345	1400						
V			418.86	397.32	424.58	428.84	489.19	329.47
出力/MW			256.15	298.97	173.08	173.22	104.34	394.24
利润(\$/h)			812.77	1007.1	444.99	445.05	362.47	1119.9

5 算例结果及分析

本文以 IEEE6 机 30 母线系统为数值仿真系统, 其中该 6 台机分别属于 6 家公司。各发电公司的典型成本函数系数如表 1 所示, a 、 b 、 c 为发电公司二次生产成本函数的系数。假设市场中预测负荷为 1400MW, 此时该模拟电力市场为无弹性市场, 需求曲线对应为 $D=e=1400MW$, $f=0$ 。

表 1 生产成本函数系数

Tab. 1 Factors of quadratic cost functions

	公司 1	公司 2	公司 3	公司 4	公司 5	公司 6
a	0	0	0	0	0	0
b	2	1.75	3	3	1	3.25
c	0.02	0.0175	0.025	0.025	0.0625	0.00834

根据历史数据, 6 家发电公司的初始微增响应猜测分别为 300、150、200、250、500 和 30。图 2 为简单学习算例(算例 1)和增强型学习算例(算例 2)中的市场结清电价轨迹。可见, 各公司采用简单学习规则时, 市场所达到的均衡电价要高于增强型学习算例。这是由于这两种学习规则情况下各公司所采取的供给函数猜测不同引起的。

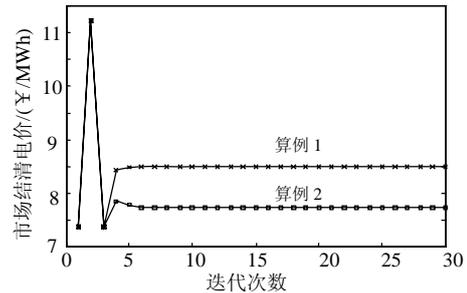


图 2 两算例市场结清电价

Fig. 2 Market clearing prices in two cases

表 2 和图 3 分别给出了算例 1 中各公司的供给函数猜测轨迹以及两个算例中市场达到的均衡运行时各结果。由于学习规则不同, 各发电公司制定的现阶段策略在增强型学习过程中受到以前各阶段的策略影响较大, 或者说策略有延续性。而在简单学习规则过程中, 每一次发电公司的策略与前阶段的策略无关, 而只与前阶段的市场运行情况有关系。

图 4 为公司 6 采取不同的初始猜测 (30 或者 300), 在两个算例中的猜测轨迹。

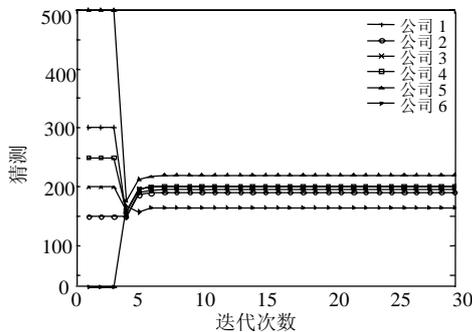


图 3 算例 1 中各公司的猜测
Fig. 3 Conjecture, V, of individual firm in case 1

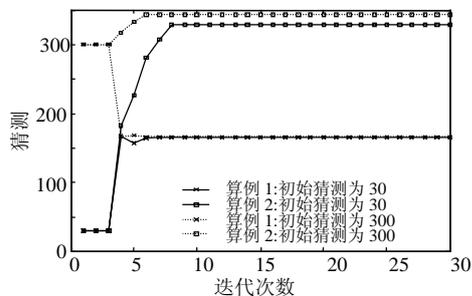


图 4 不同初始猜测情况下公司 6 的猜测
Fig. 4 Conjectures of firm 6 with different initial values

6 结论

本文提出了一种新的基于猜测供给函数均衡的重复博弈电力市场的多代理模型。以 IEEE6 机 30 母线系统为算例, 根据实际情况假设电力需求无弹性, 按各公司简单学习和增强型学习为不同策略进行仿真, 结果可以说明本文所提出的电力市场多代理模型具有可行性和有效性。另外, 简单学习规则下的市场结清电价相对比增强型学习规则要高, 市场均衡运行状态与各发电公司的策略有很大关系。

参考文献

[1] 康重庆, 白利超, 夏清, 等. 电力市场中发电商的风险决策[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 1-6.
Kang Chongqing, Bai Lichao, Xia Qing *et al.* Risk decision-making of generators in electricity market[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 1-6.

[2] 高鑫, 王秀丽, 雷兵, 等. 独立发电商的策略报价研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 41-46.
Gao Xin, Wang Xiuli, Lei Bing *et al.* Research on Bidding Strategy for an Independent Power Plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 41-46.

[3] 袁智强, 侯志俭, 宋依群, 等. 考虑输电约束古诺模型的均衡分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 73-79.
Yuan Zhiqiang, Hou Zhijian Song Yiqun *et al.* Analysis of equilibrium of cournot model with considering transmission constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 73-79.

[4] 姚建刚, 唐捷, 李西泉, 等. 发电侧电力市场竞价交易模式的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 78-83.
Yao Jiangan, Tang Jie, Li Xiquan *et al.* Research on Bidding Mode in a Generation-Side Power Market[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(5): 78-83.

[5] Day C J, Bunn D W. Agent-based simulation of competitive electricity markets: a comparison with the supply function equilibrium approach [C]. In: Proceedings of the 19th Annual North American Conference of International Association for Energy Economics (IAEE), Oct. 1998.

[5] Bower J, Bunn D W. Model-based comparisons of pool and bilateral markets for electricity[J]. The Energy Journal, 2000, 21(3): 1-29.

[7] Bower J, Bunn D W, Wattendrup C. A model-based analysis of strategic consolidation in the german electricity industry[J]. Energy Policy, 2001, 29: 987-1005.

[8] Bunn D W, Oliveira F S. Agent-based simulation - an application to the new electricity trading arrangements of england and wales[J]. IEEE Trans Evolutionary Computation, 2001, 5(5): 493-503.

[9] Wei P, Yan Y, Ni Y *et al.* A decentralized approach for optimal wholesale cross-border trade planning using multi-agent technology [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(5): 833-838.

[10] Praca I, Ramos C, Vale Z *et al.* A new agent-based framework for the simulation of electricity markets[C]. In: Proceedings of IEEE/WIC International Conference on Intelligent Agent Technology. 2003.

[11] Visudhiphan P, Ilic M D. Dynamic game-based modeling of electricity markets[C]. In: Proceedings of the IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, New York, 1999, (1): 274-281.

[12] 宋依群, 焦连伟, 倪以信, 等. 应用动态学习改进对竞争对手微增响应猜测的发电公司投标策略[J]. 中国电机工程学报, 23(12): 23-27.
Song Yiqun, Jiao Lianwei, Ni Yixin *et al.* An improvement of generation firm's bidding strategies based on conjectural variation via dynamic Learning[J]. Proceedings of the CSEE, 23(12): 23-27.

[13] Day C J, Hobbs B F, Pang J. Oligopolistic competition in power networks: a conjectured supply function approach[J]. IEEE Trans Power Systems, 2002, 17(3): 597-607.

[14] 宋依群, 倪以信, 吴复立, 等. 基于猜测供给函数均衡的发电公司策略行为[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(13): 15-18.
Song Yiqun, Ni Yixin, Wu F Felix *et al.* A novel model of gencos' strategic behaviors based on conjectured supply function equilibrium[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(13): 15-18.

[15] Mitchell T M. Machine learning [M]. The McGraw-Hill Companies, Inc. 1997.

收稿日期: 2004-09-25。

作者简介:

宋依群(1970-), 女, 博士, 副教授, 主要从事电力系统分析及电力市场研究。