

电力市场中 MCP 和 PAB 机制的 Swarm 仿真分析

刘贞, 任玉琰, 曹端

(重庆大学经济与工商管理学院, 重庆 400030)

摘要: 竞价机制的设计一直是电力市场设计的难点。采用 Swarm 仿真的研究方法对两种竞价机制的均衡过程进行了比较分析。仿真发现, 在市场出清价 MCP (Market clearing price) 和按报价支付 PAB (Pay-as-Bid) 机制下, 在发电商博弈过程中, PAB 机制中出清电价低于 MCP 机制; 在发电商博弈达到市场均衡后, MAC 机制中出清电价低于 PAB 机制; 在 PAB 机制中, 每个发电商成交量和成交价格的波动幅度要小于 MCP 机制。在竞争博弈过程中发电商的无意识共谋行为也是两种竞价机制中存在市场力的原因之一。

关键词: 电力市场; PAB; MCP; 机制设计; Swarm 仿真

Simulating analysis on MCP and PAB mechanism based on Swarm in power market

LIU Zhen, REN Yu-long, CAO Duan

(Economy and Management School, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The research of compete price mechanism always is the difficulty to design power market. This paper uses the Swarm simulation as a research technique, to carry on the comparative analysis in two kinds of compete price mechanism. Through the simulation, it discovers some phenomena in MCP (Market clearing price) and PAB (Pay-as-Bid) under the mechanism. In the electricity generation business and gaming process, the price in PAB mechanism is lower than it in MCP mechanism. After electricity generation business gambling achieved market equilibrium, the price under the MAC mechanism is lower than it in PAB mechanism. After the PAB mechanism achieved market equilibrium, the electric quantity and the deal price volatility margin is smaller than the MCP mechanism. Unconscious collusion in competition gambling process also is one of cause which generator implement cause market power in PAB and MCP mechanism.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No.90510016).

Key words: power market; PAB; MCP; mechanism design; Swarm simulation

中图分类号: TM74 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)01-0037-06

0 引言

随着电力市场化改革的不断深化, 如何构建一个好的交易规则和竞价机制成为电力市场改革能否成功的关键。由于电力市场中电力具有不可储存性、资源有限性和社会必须性, 且又必须保证市场供需实时平衡。较多的约束条件导致设计有效的竞价机制一直是电力市场设计的难点。如 MCP 和 PAB 两种竞价机制中, 哪种竞价机制能够更好地减少发电商市场力, 提高市场效率。

目前对电力市场竞价机制的研究主要分为二

类, 一类是把经济理论方法应用到市场机制分析中, 如文献[1]较全面地利用经济学手段从市场交易量、市场效率、消费者剩余等方面对两种竞价机制进行了分析比较。又如文献[2, 3]把经济博弈论应用到电力市场机制设计中, 利用拍卖理论进行分析研究。一类采用实验经济学的方法, 对竞价机制进行实验模拟分析。个体决策的不可控性使博弈过程变得不确定^[4], 而采用实验或仿真可以对博弈过程进行观察, 从而可以更好地分析博弈过程中的不确定行^[5]。

近年来复杂适应系统 CAS (Complex Adaptive System) 理论与 Swarm 仿真分析方法也得以应用。CAS 是霍兰于 1994 年, 在圣塔菲研究所 SFI 成立 10 周年时正式提出的^[6]。基于 CAS 理论, 圣塔菲研究

基金项目: 国家自然科学基金项目 (90510016)

所 SFI 开发了多主体软件工具——Swarm。由于 Swarm 没有对模型和模型要素之间交互作任何约束,各主体在定义时是相互独立。Swarm 提供了一个通用框架,使工作人员可以将精力集中在感兴趣的特定系统中,而不会被数据处理、用户界面及其他纯软件工程和编程等问题所困扰。Swarm 中主体交互独立性、软件简单易用性和源代码开放性等特点,使非计算机专业人士可以方便使用此工具来研究复杂系统问题。Swarm 很快被广泛推广到各个领域应用,并不断得到扩充。

国外研究中,Swarm 主要应用在生态学、生物学、经济学、社会学、物理学和化学^[5]。采用 Swarm 对电力市场机制进行仿真分析研究才刚刚兴起,文献[7~9]给出了对电力市场进行了模拟仿真,这些研究集中在电力市场竞争、价格形成机制和监管措施等问题上。国内基于 Swarm 模拟仿真实验主要集中在国外比较成熟的领域,如文献[10~12]分别对经济学、生态学和社会学等领域进行了系统仿真。在国内电力市场研究领域中,采用 Swarm 对电力市场机制进行仿真分析的文献尚不多见。

电力市场是一个由多主体构成的复杂适应系统^[13]。在这个复杂适应系统中,每个主体都有自己的行为规则和信息,并在接收其它主体信息过程中,不断通过学习来修改规则。因此它具有复杂适应系统的许多特点,所以很难用单一完全的动力学模型来描述发电市场。本文针对发电市场多主体博弈的复杂性,基于 CAS 理论,采用 Swarm 仿真的研究方法对现货市场中的两种竞价机制过程进行了比较分析,给出了定量分析结果。与其它机制比较文献相比,本文更注重对两种机制均衡过程的比较分析。通过仿真发现,在 MAC 和 PAB 机制下,在发电商博弈过程中,PAB 机制中的出清价低于 MCP 机制;在发电商博弈达到市场均衡后,MAC 机制中的出清价低于 PAB 机制中的出清价;在 PAB 机制中,发电商实施调整价格和发电量策略对自己的收益更有效,从而其在达到市场均衡后的成交量和成交价格的波动幅度要小于 MCP 机制。PAB 的市场出清价的波动幅度也小于 MCP 机制。实验结果对电力市场竞争机制设计具有一定的借鉴意义。

1 两种机制的 Swarm 仿真模型

Swarm 的建模思想是让一系列独立的 Agent 通过独立事件进行交互,帮助研究由多主体组成的复杂适应系统行为。Swarm 的建模原理是通过信号传递来实现各主体之间的交互,经济主体通过接受信号确定自己的收益,进而调整自己的策略。Swarm 对

外生初始变量值的要求不严,因为系统的环境变量将通过微观主体的自适应过程得到合理修正。

1.1 两种机制下市场主体博弈过程概述

电力市场的特点是其在一一定的价格范围内,其需求具有刚性的特点。如图 1 所示的市场需求曲线,为了便于描述,我们把弯折点以上的需求曲线仍称为需求线,弯折点下的需求曲线称为分割线。当发电商的价格处在分割线上时,市场的需求量不随价格的变化而变化,这主要是由于电力是生活和生产的必需品。当价格高达一定程度时,开始减少用电量,则市场的需求量开始下降。事实上,我们主要研究处于分割线上和分割线左侧的发电商的行为。分割线右边的发电商的报价过高,不能参与市场竞争。分割线上及其左侧的发电商可以通过调理和调价来实施市场力。

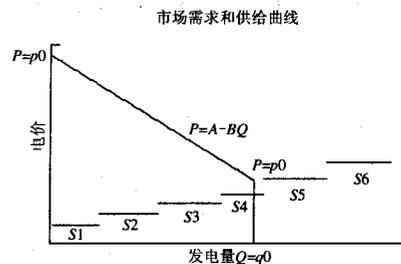


图 1 市场需求和供给曲线

Fig.1 Market demand and supply curve

在 PAB 机制中,分割线上及其左边发电商的成交价与其报价相等。右边发电商不存在成交价。在 MCP 机制中,分割线上的发电商报价即为成交价,也是市场出清价。分割线上及其左边发电商成交价均为市场出清价。同样,右边的发电商不存在成交价。

在实际博弈过程,由于发电商进行价格和产量的调整,最终使自己处于分割线上,从而通过产量和价格决策影响市场出清状态。市场主体的博弈过程可以描述如下:

- (1) 对 $t=0$ 期各个发电商和交易中心初始变量赋值。
- (2) 发电商向交易中心申报上网电价和电量。
- (3) 交易中心依据发电商上报电量、电价和市场需求函数按照 PAB/MCP 机制进行匹配。
- (4) 交易中心依据匹配结果,计算出 PAB/MCP 机制下各个发电商的成交价和成交量。并把这些信息分别传送给各个发电商。
- (5) 发电商依据市场成交价和成交量计算出自己的利润,通过与上期利润进行对比,调整 $t+1$

期电价和发电量调整策略。具体调整策略：发电商进行价格调整，若发现其调整后利润高于调整前利润，则沿用上次策略。否则发电商①进行价格反向调整。②发电商进行发电量调整。调整极限在于[0, 最大有效容量]。若发现调整后利润高于调整前利润，则继续调整，否则反向调整。转向 2，开始新一轮博弈。

1.2 发电商主体博弈规则

在模拟系统中，每个发电商是一个独立的参与者，具有独立的决策能力和自适应学习能力，并且可以依据利益最大化原则动态调整自己的产量和报价决策。

设市场中有 n 个发电商，发电商 i 初始报价 $p_{i,0}$ 和供电量 $q_{i,0}$ ，发电商 i 第 t 次博弈时所获取的利润见公式 (1)：

$$\pi_{i,t} = q_{i,t} \times (p_t - c_i) \quad (1)$$

其中： $q_{i,t}$ 为发电商 i 在第 t 次博弈时的成交量， p_t 为第 t 次博弈时的成交价， c_i 为发电商单位成本。

发电商 i 的调整目标见公式 2，其中 $q_{i,max}$ 为发电商 i 的最大发电容量。

$$\begin{aligned} \text{Max } \pi_{i,t} &= q_{i,t} \times (p_t - c_i) \\ \text{ST. } q_{i,t} &\in [0, q_{i,max}] \end{aligned} \quad (2)$$

发电商 i 的调整策略：发电商 i 先调节价格，然后调整了发电量。发电商 i 报价策略见公式(3)。发电商 i 发电量调整策略见公式 (4)。

$$p_{i,t+1} = \begin{cases} p_{i,t} + \Delta p & \text{if } \pi_{i,t} - \pi_{i,t-1} > \varepsilon \\ p_{i,t} - \Delta p & \text{if } \pi_{i,t} - \pi_{i,t-1} < -\varepsilon \\ p_{i,t} & \text{if } |\pi_{i,t} - \pi_{i,t-1}| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (3)$$

$$q_{i,t} = \begin{cases} q_{i,t+1} = q_{i,t} + \Delta q & \text{if } \pi_{i,t} - \pi_{i,t-1} > \xi, q_{i,t+1} < q_{i,max} \\ q_{i,t+1} = q_{i,t} - \Delta q & \text{if } \pi_{i,t} - \pi_{i,t-1} < -\xi, q_{i,t+1} \geq 0 \\ q_{i,t+1} = q_{i,t} & \text{if } |\pi_{i,t} - \pi_{i,t-1}| \leq \xi \end{cases} \quad (4)$$

1.3 电力交易中心的主体博弈规则

在博弈过程中，电力交易中心依据发电商的报价、对应的发电量、市场需求函数来确定每个发电商的成交价、成交量及市场出清价。

(1) MCP 交易机制

交易中心依据各发电商的报价、供电量、市场需求曲线确定市场出清价格(每个发电商的成交价)。当所有的发电商的发电总量低于 Q_{max} 时，则依据市场需求曲线决定市场出清价。若发电商的报

价低于成交市场出清价，则以市场出清价发电商的成交价。若发电商的报价高于市场出清价，则达不成交易。

$$p_{i,t} = \begin{cases} p_{m+1,t} & \text{if } \sum_{i=1}^m q_{i,t} \leq Q_{max}, \sum_{i=1}^{m+1} q_{i,t} > Q_{max}, \\ A - B \times \sum_{i=1}^n q_{i,t-1} & \text{if } \sum_{i=1}^n q_{i,t} \leq Q_{max} \\ 0 & \text{if } \sum_{i=1}^m q_{i,t} \leq Q_{max}, \sum_{i=1}^{m+1} q_{i,t} > Q_{max}, i > m+1 \end{cases} \quad (5)$$

交易中心依据各发电商的报价、供电量、市场需求曲线确定各发电商的供电量。如果价格小于出清价，则成交量为上报发电量。若报价与出清价相等，则以上报发电量在等价总发电量中所占的比例分配发电量。若大于出清价，则成交量为 0。

$$q_{j,t} = \begin{cases} q_{i,t-1} & \text{if } p_{i,t-1} < p_{m,t} \\ \left(Q_{max} - \sum_{j=1}^i q_{j,t} \right) \times q_{j,t} & \text{if } p_{i+1,t} = \dots = p_{i+w-1,t} = p_{m,t} \\ \sum_{j=i+1}^{i+w-1} q_{j,t} & \\ 0 & \text{if } p_{i,t-1} > p_{m,t} \end{cases} \quad (6)$$

各个发电商在交易过程采用同样的方法来动态调整自己的价格和发电量策略。在博弈过程中，每个发电商只允许和交易中心交换信息，发电商之间对价格和发电量策略信息不进行交换。

(2) PAB 交易机制

交易中心依据各发电商的报价、供电量、市场需求曲线确定每个发电商的成交价，见公式(7)，在分割线上和分割线左边的成交价即为报价。在分割线右边的发电商不能达成交易。当所有发电商的发电商小于 Q_{max} ，则在需求曲线折点上端，由总供量确定成交价。

$$p_{i,t} = \begin{cases} p_{i,t-1} & \text{if } \sum_{i=1}^m q_{i,t} \leq Q_{max}, \sum_{i=1}^{m+1} q_{i,t} > Q_{max}, i \leq m+1 \\ A - B \times \sum_{i=1}^n q_{i,t-1} & \text{if } \sum_{i=1}^n q_{i,t} \leq Q_{max} \\ 0 & \text{if } \sum_{i=1}^m q_{i,t} \leq Q_{max}, \sum_{i=1}^{m+1} q_{i,t} > Q_{max}, i > m+1 \end{cases} \quad (7)$$

在 PAB 机制下，市场出清价格为各发电商成交价的加权平均数：

$$p_t = \frac{\sum_{i=1}^{m+1} p_{i,t-1} \times q_{i,t-1}}{\sum_{i=1}^{m+1} q_{i,t-1}} \quad (8)$$

交易中心依据各发电商的报价、供电量、市场需求曲线确定各发电商的供电量。若报价低于最高成交价，则按上报电量成交。若报价等于最高成交价，则按上报电量所占的比例进行成交量的分配。若高于最高成交价，则成交量为 0。

$$q_{j,t} = \begin{cases} q_{j,t-1} & \text{if } p_{i,t-1} < p_{m,t} \\ \left(Q_{\max} - \sum_{j=1}^i q_{j,t} \right) \times q_{j,t} & \text{if } p_{i+1,t} = \dots = p_{i+w-1,t} = p_{m,t} \\ \sum_{j=i+1}^{m+1} q_{j,t} & \\ 0 & \text{if } p_{i,t-1} > p_{m,t} \end{cases} \quad (9)$$

2 Swarm 仿真实验

考虑电价、用电量，及物价上涨和 GDP 的增长影响等因素，通过 Eviews 回归得到电力市场需求函数： $P_d = 1.5986 - 0.0055Q_d$ ，其中无弹性市场需求函数为： $Q_d = 230$ 万 kWh。各发电商的最大供电量及成本价如表 1 所示。价格调整： $\Delta P = \pm 0.01$ 元，缩量调整： $\Delta Q = -0.1$ 万 kWh。

为了比较两种机制的运行情况，仿真实验分两次进行。第一次是对 MCP 机制进行模拟仿真。第二次对 PAB 机制进行模拟仿真。

表 1 各发电商最大发电量及初始成本报价

Tab.1 Maximal quantity and unit cost for each generator

发电商	最大发电量/万 kWh	成本价/(元/kWh)
发电商 0	75.4	0.26
发电商 1	16.5	0.24
发电商 2	30.0	0.28
发电商 3	20.0	0.34
发电商 4	44.0	0.38
发电商 5	144.0	0.31
发电商 6	40.6	0.33

2.1 第一次仿真实验

图 2 给出了 MCP 机制下各发电商的价格变化曲线。图 3 给出了 MCP 机制下各发电商的发电量变化曲线。初始时，发电商承担成交风险，仅给出成本报价及对应的发电量。在第一个回合中，7 个发电商报价中，共有 4 个发电商交易成功。在 MCP 机制中，经过一个回合的博弈之后，发电商可以了解市场的出清价，则在下一次报价时，依据市场出清价作为调整基准，在这个基准上进行价格和发电量的调整。发电商开始时只进行价格调整，当调整到

0.33 元时，市场上第 7 个发电商进入，此时市场供给大于需求，则发电商开始进行发电量调整。主要原因在于，如果发电商再调整价格，其发电量将不能卖出。此时发电商开始调整产量，同时提高价格。以提高整体利润。

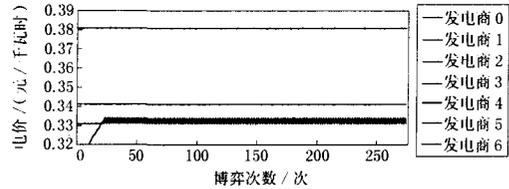


图 2 MCP 机制各发电商的报价变化曲线

Fig.2 Price curve for each generator under MCP

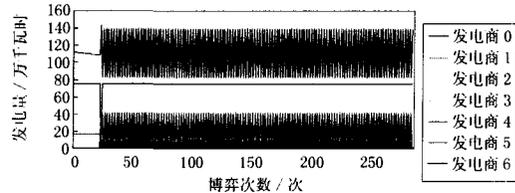


图 3 MCP 机制下各发电商的成交电量变化曲线

Fig.3 Quantity curve for each generator under MCP

2.2 第二次仿真

图 4 给出了 PAB 机制下各发电商的价格变化曲线。图 5 给出了 PAB 机制下各发电商的发电量变化曲线。初始时，发电商担心不能成交，给出了成本报价及对应发电量。在第一个回合中，共有 4 个发电商成交。这 4 个发电商为了获取更高利润，尝试不断提高价格。由于并不知对手成交价，因此，只有在自己成交价基础上进行微调。其具体过程参见图 4。经过 20 次博弈，发电商 5 达到分割线上，发电商 5 再次提高价格会引起新的发电商 6 的进入。因此，发电商 5 开始在调整价格的同时，调整产量。随着博弈的进行，在进行到 50 次、70 次和 90 次博弈时，发电商 2、0、1 均调整到市场出清价格附近。此时，5 个发电商均在分割线上，它们要提高利润，调高价格，必须对产量进行调整。其具体过程参见图 5。

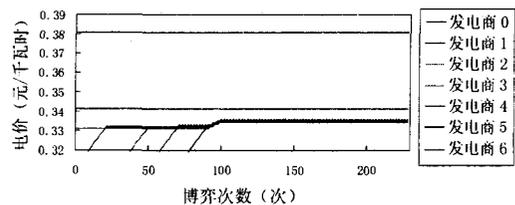


图 4 PAB 机制下各发电商的价格变化曲线

Fig.4 Price curve for each generator under PAB

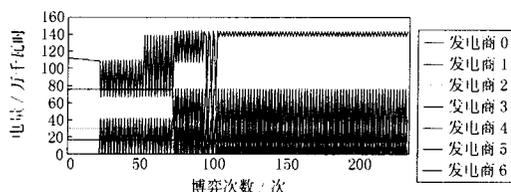


图 5 PAB 机制下各发电商的发电量变化曲线

Fig.5 Quantity curve for each generator under PAB

2.3 仿真结果分析

对两次仿真结果进行观察分析可以发现:

(1) 在发电商博弈均衡的过程中, MCP 机制比 PAB 机制较早出现较强的市场力。MCP 机制中, 由于发电商通过竞价机制可以得到市场出清信息, 较早地实施较强市场力。在 PAB 机制下, 发电商不能及时了解市场出清信息, 只能通过调整自己的价格和产量, 不断提高利润, 达到影响市场出清价的目的, 因此在早期, 其实施的市场力要弱于 MCP 机制。事实上, 这一结论也可以在拍卖理论中得以体现。一级密封拍卖较好的体现出发电商的成本, 但在多次重复一级密封拍卖时, 由于投标者对自己和对手报价有所了解, 此时, 揭示投标者真实信息的作用要减弱。

(2) 在发电商博弈均衡后期, PAB 机制比 MCP 机制表现出较强的市场力行为。这主要是因为 PAB 机制采用的是针对发电商个体进行支付, 因此其调整价格和调整发电量的策略要比 MCP 更有效。在 MCP 机制下, 发电商的有效调整可能因其它发电商的存在而变得弱有效, 其主要原因有两个: 一个是其它发电商的反向调整使该发电商的调整效率变弱; 一个是该发电商的调整使价格增高, 而这种调整因其它发电商的存在而减弱了整体效用。

(3) 在市场均衡时, PAB 机制的价格和发电量波动幅度弱于 MCP 机制。价格波动性可以从图 2 和图 4 中成交价的曲线图中直接观察到。在图 6 中, 是把两个实验中的出清价数据放到 Excel 中做出的图, 从中更可以清晰的发现这一结论。每个发电量的波动幅度可以从图 3 和图 5 中直接观察到。其原因主要是: 在 PAB 机制下, 发电商博弈均衡过程, 由于采用的是按报价支付的方式, 发电商进行价格调整和发电量调整策略和意图更强。其调整策略准确度也更高。而在 MCP 机制下, 发电商进行价格调整和发电量调整策略, 可能使其它的发电商受益, 而自己作为为了提高市场报价的牺牲者。从图 3 和图 5 可以明显地看出, 第 6 发电商的成交量在 PAB 机制下一直在 144 下方波动, 而且波动的幅度远小于

在 MCP 机制下的成交量。而且其平均成交量要高于 MCP 机制下的成交量。

(4) 通过仿真还可以发现这两种机制中存在一些共同的缺陷: 在 MCP 和 PAB 机制下的发电商报价均高于其真实成本的现象。也是这两种机制都没有解决发电商实施市场力的问题。这种现象通常被解释为发电商之间进行有意识的合谋, 但这里可以看出, 市场力产生的原因是发电商独立追求自身利润最大化时产生的无意识合谋。仿真中, 发电商之间并没有进行信息交换, 发电商只是从交易中心得到自己的成交量和成交价格, 并依据利润最大化目标, 对下一次博弈中的发电量和报价进行调整。而这种追求利润最大化的行为在市场运行过程表现出部分发电商集体调整价格和产量, 从而导致市场出清价格上涨。有些文献把这种行为理解为默契合谋, 事实上, 即使发电商不知道其它发电商是否提高报价或缩减发电量, 当其在分割线时也会采用价格和发电量调整策略。

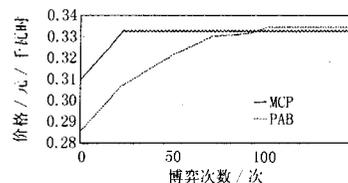


图 6 两种机制中市场出清价的变化曲线

Fig.6 Clearing price curve in MCP and PAB

3 结论

本文针对发电市场多主体博弈的复杂性, 基于 CAS 理论, 采用 Swarm 仿真的研究方法对 MCP 和 PAB 两种竞价机制进行了仿真比较分析, 给出了定量分析结果。通过分析发现现存机制存在的问题和不足, 将有利于我们设计新的电力市场竞价机制。研究发现两种竞价都不能很好地解决发电商的市场力问题, 产生这一缺陷的本质在于电力市场存在一段完全刚性的市场需求曲线。在这一区域中也是发电商市场力作用范围。解决这一问题的主要手段在于引入需求侧电力市场, 增加市场需求曲线的倾斜度。

另外, 发电商市场力的作用域会随着价格提高更多的发电商进入而不断减小。随着更多的发电商的进入, 同时实施市场力的机率也降低, 从而削弱了共谋产生的概率。因此更多的引入中小型发电商, 在发电商提高价格和产量时, 则会有更多的发电商进入市场。更多的发电商的存在会使实施市场力的发电商之间更难达成同步, 从而削弱其市场力。

参考文献

- [1] 王雁凌, 张粒子, 杨以涵. 边际电价结算和发电方报价价格结算竞价机制的经济分析[J]. 电网技术, 2004, 28(11):14-18.
WANG Yan-ling, ZHANG Li-zi, YANG Yi-han. An Economic Analysis of Competition Mechanisms for System-margin-pricing and Pay-as-bid[J]. Power System Technology, 2004, 28 (11) :14-19.
- [2] Son Y S, Baldick R, Leek H, et al. Short Term Electricity Market Auction Game Analysis; Uniform and Pay-as-bid Pricing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4):1990-1998.
- [3] Ren Y, Galiana F D. Pay-as-bid Versus Marginal Pricing Part I: Strategic Generator Offers[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(4):1771-1776.
- [4] 孙志明, 黄民翔, 迟峰. 基于实验经济学的电力市场竞争模式研究[J]. 华北电力, 2004, 32(10): 7-10.
- [5] Miller J H. The Co Evolution of Automata in the Repeated Prisoner's Dilemma[J]. Journal of Economic Behavior and Organization, 1996, 29(3): 87-112.
- [6] Luna F, Stefansson B. Economic Simulations in Swarm[M]. Social Sciences Documentation Publishing House, 2004.4-5.
- [7] Koesrindartoto D, SUN Jun-jie, Tesfatsion L. An Agent-based Computational Laboratory for Testing the Economic Reliability of Wholesale Power Market Designs[A]. In:IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. San Francisco(United States):2005. 931-936.
- [8] Papageorgiou G. Modeling of Electricity Markets Using Software Agents[D]. Manchester: Manchester Institute of Science and Technology, 2002.
- [9] Bagnall A J, Smith G D. A Multi-agent Model of the UK Market in Electricity Generation[J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2005, 9(5): 522-536.
- [10] 周庆, 陈剑. 基于Swarm的供应链多主体聚集模型及其仿真[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(6):1308-1313.
ZHOU Qing, CHEN Jian. Swarm-based Aggregation Model and Simulation of Multi-agent in Supply Chain [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(6):1308-1313.
- [11] 魏一鸣, 张林鹏, 范英. 基于 Swarm 的洪水灾害演化模拟研究[J]. 管理科学学报, 2002, 5(6):39-46.
WEI Yi-ming, ZHANG Lin-peng, FAN Ying. Swarm Based Study on Complexity in Flood Disaster [J]. Journal of Management Sciences in China, 2002, 5(6):39-46.
- [12] 罗批, 司光亚, 胡晓峰. Swarm 及其平台下构建特定民意模型的探讨[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(1):5-7.
LUO Pi, SI Guang-ya, HU Xiao-feng. Swarm & Discussion of the Method of Constructing the Special Public Opinion Model[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(1): 5-7.
- [13] Chen H, Wong K P. Analyzing Oligopolistic Electricity Market Using Coevolutionary Computation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(1):1-10.

收稿日期: 2007-05-08; 修回日期: 2007-08-06

作者简介:

刘贞(1973-), 男, 博士研究生, 主要从事博弈论与经济学仿真及其在电力市场中的应用研究;

E-mail: cqsureness@tom.com

任玉琬(1944-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、电力经济方面的研究;

曹端(1965-), 男, 工程师, 主要从事电力技术经济研究。

(上接第 21 页 continued from page 21)

- [9] Thapar J, Vittal V, Kliemann W, et al. Application of the Normal Form of Vector Fields to Predict Interarea Separation in Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997: 844-850.
- [10] 邓集祥, 赵丽丽. 励磁调节器对模态非线性相关作用的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(1):69-74.
DENG Ji-xiang, ZHAO Li-li. Study on Effect of Excitation Regulator on Nonlinear Modal Interaction[J]. Power System Technology, 2005, 29(1):69-74.
- [11] Jang G, Vittal V. Effect of Nonlinear Modal Interaction on Control Performance: Use of Normal Forms Technique In Control Design Part I: General Theory and Procedure[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(2): 401-407.
- [12] 邓集祥, 赵丽丽. 大干扰下主导低频振荡模式作用的再研究[J]. 东北电力学报, 2004, 24(6):1-5.
DENG Ji-xiang, ZHAO Li-li. Study Once More on Effect of Critical Low Frequency Oscillation Modes in Large Disturbance Stability[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2004, 24(6):1-5.

收稿日期: 2006-10-23; 修回日期: 2007-02-16

作者简介:

李蓓(1980-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: libei_9080@163.com

李兴源(1945-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统分析、稳定和控制在高压直流输电的研究。