

对电力市场中发电商的微观行为分析

游义刚¹, 周晓阳²

(1. 华中科技大学水电学院, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学数学系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 对电力市场中发电商的生存环境进行博弈分析, 引入对手环境约束曲线的概念, 通过研究发电商价格可控区间和市场力度的关系, 提出市场力信息反馈环的概念, 并利用信息反馈环建立了一个猜测函数模型, 给出了一个合理的发电商不完全信息学习机制: 由于信息匮乏, 发电商只能用历史数据估计对手环境约束曲线, 并将其利润最大化的决策问题改为追求某种特定目标。最后对算例进行观察和分析, 得出结论: 市场力是导致电力市场不稳定的最主要因素, 它将通过信息反馈环逐步加强。

关键词: 电力市场; 博弈; 市场力; 对手环境约束曲线; 信息反馈; 不完全信息

Analysis of generation company's micro-behavior in electricity markets

YOU Yi-gang¹, ZHOU Xiao-yang²

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Mathematic Department, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper investigates the generation company's survival condition from the point of game analyzing. It probes into the internal relationship between control interval and market power of the generation company. So the concept of opponent environment constrain curve and information feedback cycle come forth. And we find a reasonable studying mechanism in case of incomplete information. Because the information is inadequate, the generation company has to estimate its opponent environment constrain curve based on the historical data. Then the generation company's target is not the maximal profit but the customized one. At last we can make the conclusion that the market power is the main factor led to the instability of power market. It will be strengthened via the information feedback cycle.

Key words: electricity market; game; market power; opponent environment constrain curve; information feedback; incomplete information

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)23-0035-06

0 引言

随着电力市场改革的深入开展, 人们更为关注对电力市场稳定性问题的研究。Alvarado 首次提出了电力市场稳定性问题^[1], 通过假设发电商电量增加的速度正比于价格与成本之差, 而用户电力增加的速度正比于收益与价格之差, 建立了两个一阶微分方程, 研究平衡点附近的静态稳定性问题。Alvarado 在后续的研究中考虑了频率的二次调节与报价的关系模型^[2,3], 试图研究当负荷发生变动时系统的稳定性问题。文献[4]建立了电力市场的框架模型, 倡导用实验电力市场方法探索电力市场和电力系统的内在规律。

在开放的电力市场中, 博弈论是研究和理解竞争行为的重要工具之一, 对探讨电力市场稳定性的

本质具有指导作用。经典博弈模型^[5]以讨论均衡点为主, 然而在电力市场中, 基于某些因素, 即使均衡点的存在, 也不能保证参与者在实践中可以达到均衡态。博弈学习理论^[6]将均衡看作在具有有限理性的参与人之间为寻求各自利益最优化而展开长期博弈的极限状态, 分析有限理性的参与者通过各种学习过程, 以达到稳定的均衡状态, 其中心问题之一是参与者如何形成对手行动的预期(即学习)。文献[7,8]提出了猜测函数均衡的概念, 建立了相应的电力市场的模型。文献[9]用猜测函数模型比较了几种常用博弈模型, 建立了这些模型的统一描述。

以复杂系统自动机网络建模^[10]的观点来看, 博弈学习规则只是底层单元的部分演化机制。电力市场演化机制是多样性的, 因此其演化结果也是多样和复杂的, 只有从创新市场机制入手, 才能有效地

维持电力市场的稳定。

本文以博弈学习理论作为基础,从单个发电商的生存环境入手,引入对手环境约束曲线的概念,分析发电商价格可控区间和市场力的关系,提出市场力的信息反馈环的概念,并利用信息反馈环建立了一个猜测函数模型,给出了一个合理的厂商不完全信息学习机制,在学习中所用的信息是可行的。最后通过算例分析,得到市场力通过信息反馈环逐步加强的结论。

1 博弈基础

在博弈理论中,总假定每个参与人试图最大化自身期望效用 $u^i(\sigma^i, \sigma^{-i})$, 如何达到这一目的取决于参与人如何评估其对手采用的行动。对手行动由混合策略 σ^{-i} 所决定,在环境不变的长期博弈中,参与人 i 观测到对手的博弈行为 σ^{-i} , 则他可通过对 σ^{-i} 的最优响应达到期望效用最大化的目的。即选择混合策略 $\hat{\sigma}^i$, 使得

$$u^i(\hat{\sigma}^i, \sigma^{-i}) = \max_{\sigma^i \in \Sigma^i} u^i(\sigma^i, \sigma^{-i})$$

称 $\hat{\sigma}^i$ 为对对手策略 σ^{-i} 的最优响应。

假定博弈环境是不变的,参与人可获得对手的历史信息,并根据这些信息预测或假定对手行动的分布,从而在下阶段采用对这一预期分布的最优响应:

(1) 在初始阶段,参与人 i 有一个外生的初始权重函数 $k_0^i: S^{-i} \rightarrow R^+$, 即对所有 $s^{-i} \in S^{-i}$, $k_0^i(s^{-i}) \geq 0$ 。

(2) 在博弈的第 t 期,参与人 i 观测到上一期 $t-1$ 对手采用的策略 s_{t-1}^{-i} , 根据这一观察更新自己的权重,更新公式为

$$k_t^i(s^{-i}) = k_{t-1}^i(s^{-i}) + \begin{cases} 1 & \text{if } s_{t-1}^{-i} = s^{-i} \\ 0 & \text{if } s_{t-1}^{-i} \neq s^{-i} \end{cases}, \quad \forall s^{-i} \in S^{-i}$$

上式意味着随着博弈的进展,对手重复使用频率高的策略将得到大的权重,反之将被参与人 i 忽略。

(3) 归一化权重得到参与人 i 对对手在 t 期采用纯策略 s^{-i} 的概率分布预期。

$$\gamma_t^{-i}(s^{-i}) = \frac{k_t^i(s^{-i})}{\sum_{\tilde{s}^{-i} \in S^{-i}} k_t^i(\tilde{s}^{-i})}, \quad \forall s^{-i} \in S^{-i}$$

(4) 参与人 i 自己根据对对手的行为概率分布预期,在 t 期选择任一对 γ_t^{-i} 的最优响应 $\rho_t^i(\gamma_t^{-i}) \in BR^i(\gamma_t^{-i})$ 作为本期的博弈策略。

(5) 参与人 i 在估计对手行为概率预期的同时,也可得到自身的边际经验分布:

$$d_t^i(s^i) = \frac{k_t^i(s^i) - k_0^i(s^i)}{t}, \quad \forall s^i \in S^i$$

显然 $d_t^i(s^i)$ 是 i 使用纯策略 s^i 的频率。

2 发电商生存环境分析

电力市场中的发电商,受到市场出清规则和其它发电商综合作用的影响,其报价策略应使自身游向高利润的地方。设有 K 个厂商,发电商 i 的成本函数为:

$$C(q_i) = a_i q_i^2 + b_i q_i + c_i \quad (1)$$

发电商采用边际成本的倍数报价:

$$\lambda = \lambda_i(q_i) = s^i \cdot (2a_i q_i + b_i),$$

$$s^i \in S^i = \{s_l, l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm L, s_l \geq s_{\text{low}}\} \quad (2)$$

其中: s^i 为厂商 i 报价的纯策略, S^i 为纯策略集; $s_0 = 1$, $s_l = s_0 + l \cdot \delta s$, $\delta s > 0$ 为离散策略间距, $s_{\text{low}} > 0$ 为策略之下界。令 $\beta_i(s^i) = 1/(2a_i s^i)$, $\alpha_i = -b_i/(2a_i)$, 则厂商 i 的供应函数为:

$$q_i = \hat{q}_i(\lambda) = \begin{cases} 0 & \lambda < \underline{\lambda}_i \\ \beta_i(s^i)\lambda + \alpha_i, & \underline{\lambda}_i \leq \lambda \leq \bar{\lambda}_i \\ \bar{q}_i, & \lambda > \bar{\lambda}_i \end{cases} \quad (3)$$

这里 $\underline{\lambda}_i = s^i \cdot b_i$, $\bar{\lambda}_i = s^i(2a_i \bar{q}_i + b_i)$, $i = 1, 2, \dots, K$ 。

发电商 i 的利润函数为 $u_i(\lambda, q_i) = \lambda q_i - C_i(q_i)$, $\underline{q}_i \leq q_i \leq \bar{q}_i$ 。作为价格和出力的二元函数, $u_i(\lambda, q_i)$ 给出了 i 的利润场,发电商 i 的报价策略总会是指向高利润的方向。然而,处于竞争中的发电商的利润场受到竞价规则和对手行为的限制,这些限制将恶化其生存环境。市场出清价和发电商 i 的出力是由发电商及其对手策略 (s^i, s^{-i}) 综合确定的,即这些变量具有函数形式 $\lambda = \lambda(s^i, s^{-i})$, $q_i = q_i(s^i, s^{-i})$ 。市场出清价由方程 $\sum_{i=1}^S \hat{q}_i(\lambda) + r\lambda = Q$ 所决定,令 $q_{-i}(\lambda) = \sum_{j \neq i} \hat{q}_j(\lambda)$ 为厂商 i 的对手报价合成曲线。当对手报价策略给定时, i 的决策必须满足市场出清条件:

$$q_i + q_{-i}(\lambda) + r\lambda = Q \quad (4)$$

设对手的报价区间为 $[\underline{\lambda}_{-i}, \bar{\lambda}_{-i}]$, 其中 $\underline{\lambda}_{-i} = \min\{\underline{\lambda}_j, j \neq i\}$, $\bar{\lambda}_{-i} = \max\{\bar{\lambda}_j, j \neq i\}$ 。对手合成报价函数 $q_{-i}(\lambda) = \sum_{j \neq i} \hat{q}_j(\lambda)$ 在 $[\underline{\lambda}_{-i}, \bar{\lambda}_{-i}]$ 上为严格

单调递增函数, 因而 $q_{-i} = q_{-i}(\lambda) + r\lambda$ 存在严格递增的反函数, 记其反函数为 $\lambda_{-i} = \lambda_{-i}'(q_{-i})$, 这里 q_{-i}, λ_{-i} 分别为当厂商 i 不加入市场时其对手的总供给和市场价格, 上标 r 表示反函数与弹性系数有关。令 $\underline{q}_{-i} = q_{-i}(\underline{\lambda}_{-i}) + r\underline{\lambda}_{-i}$, $\bar{q}_{-i} = q_{-i}(\bar{\lambda}_{-i}) + r\bar{\lambda}_{-i}$, 则 $\lambda_{-i} = \lambda_{-i}'(q_{-i})$ 在出力区间 $[q_{-i}, \bar{q}_{-i}]$ 和价格区间 $[\underline{\lambda}_{-i}, \bar{\lambda}_{-i}]$ 构成 1-1 对应。由式 (4) 有 $q_{-i}(\lambda) + r\lambda = Q - q$, 解之得

$$\lambda = \lambda_{-i}'(Q - q_i), \quad \underline{q}_i \leq q_i \leq \bar{q}_i \quad (5)$$

将其定为发电商 i 的对手环境约束曲线, 如图 1 所示。

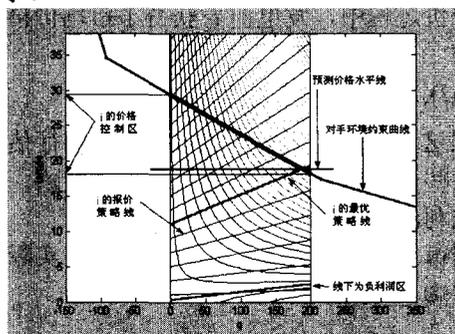


图 1 发电商的生存环境

Fig.1 The generation company's survival condition

由图可见, 发电商 i 的对手环境约束曲线在 i 的出力区间内是单调递减函数, 其形状完全由对手的报价策略和市场弹性所决定, 发电商 i 无法决定该曲线的形状。对手环境约束曲线在发电商的最小供应 $\underline{q}_i = 0$ 和最大供应 \bar{q}_i 处所对应的价格构成了 i 的价格可控区间。发电商 i 按边际成本倍数报价, 得到一簇报价策略线, 每一条报价策略线与对手环境约束曲线的交点均满足市场出清条件(4), 这意味着发电商 i 只能在其价格控制区内改变市场价格, 因此价格控制区反映了发电商 i 的市场力。将发电商 i 的利润等值线与其价格控制区叠加在一起, 可以完整地反映出发电商 i 的生存环境。在图 1 中, 报价曲线和环境约束曲线的每一个交点都是发电商 i 一种可能选择, 由图可见, 大多数交点可获得正利润。而最优利润则发生在对手环境约束曲线与等值线的切点处, 即图 1 中的最优策略报价曲线, 因此, 发电商不一定追逐价格可控区间中的高价格, 利润是决定其市场力发挥的主要因素。

对手环境约束曲线越平缓、发电商可供应的发电量越少, 其市场力就越低。发电商不能直接决定对手环境约束曲线, 但每一发电商的报价函数均为其它对手环境约束曲线的一部分, 因而其策略对该曲线将产生不同程度的影响, 这样的影响又通过环

境约束曲线反馈给发电商, 形成信息反馈环。而诸发电商市场力的发挥与反馈环性质有关, 如果市场中所有发电商均以利润最大化为追逐目标, 则最终可能会形成均衡市场力, 使市场价位进入均衡状态; 如果某些发电商恒以控制区间的高价格为追逐目标, 不断加大释放其市场力的力度, 其市场力就可能在信息反馈环的作用下不断被放大, 并诱导其它发电商市场力的增加, 加大市场风险, 最终导致电力市场不稳定。假定市场中有一部分发电商或发电量, 其用于抑制市场力, 则这种力量也将通过反馈环施加给其余发电商, 并且应具有相当的力度。同时, 信息结构对发电商市场力的发挥起着至关重要的作用, 不同的信息结构导致了发电商之间不同的演化机制, 因而会表现出不同的市场形态。就此意义而言, 市场一定具有多样性和复杂性。首先, 不对称信息结构和对称信息结构下的均衡态应该是完全不同的, 这导致了均衡态的多样性。其次, 如果考虑到均衡不存在的情形, 市场性态就会更复杂。同时, 发电商之间可能通过信息交换达成某种形式的共谋, 共谋意味着多个发电商将自己的市场分力预先加以合成并通过信息反馈环共同释放, 因而是维持电力市场稳定性需要特别加以关注的情形。除此之外, 信息的不完全可能使保守型的发电商循规蹈矩, 通过市场的历史数据逐步学习报价策略, 也可能使冒险型的发电商抬高报价, 试图获取更高利润, 等等。

3 对手环境约束曲线的猜测

从上面的分析可知, 当对手的报价策略给定之后, 发电商 i 可通过选择其出力变量 q_i 获得在其生存环境约束下的较大利润。如果发电商 i 决定了 t 期的出力 q_i , 则很容易确定其边际成本的倍数策略 s_t^i , 这时厂商 i 可求出对对手策略的最优响应:

$$\begin{aligned} \max_{q_i} E_{\sigma_{-i}} \{u(\lambda_{-i}'(Q - q_i), q_i)\} \\ \text{s.t. } \underline{q}_i \leq q_i \leq \bar{q}_i \end{aligned} \quad (6)$$

注意到当 q_i 固定时, $C_i(q_i)$ 与对手策略无关, 因此

$$E_{\sigma_{-i}} \{u(\lambda_{-i}'(Q - q_i), q_i)\} = E_{\sigma_{-i}} \{\lambda_{-i}'(Q - q_i)\} \cdot q_i - C_i(q_i)$$

于是式 (6) 可化为

$$\max_{q_i \in [\underline{q}_i, \bar{q}_i]} \{E_{\sigma_{-i}} (\lambda_{-i}'(Q - q_i)) \cdot q_i - C_i(q_i)\} \quad (7)$$

其中: $E_{\sigma_{-i}} (\lambda_{-i}'(Q - q_i))$ 是发电商 i 的对手环境约束曲线的期望, 为厂商 i 对对手环境约束曲线的估计。若厂商 i 可以准确估计这条曲线, 则对于理性的厂

商, 式(7)是一个很好的决策特性指标。

在完全信息的情形下, 厂商根据对手报价的历史信息, 确定本期的对手行动的预期, 从而可做出本期的正确决策。在不完全信息的情形下, 对手报价的历史信息不能被观察到: 对手的成本函数和报价策略未知, 或者 ISO 不公布各厂商的历史报价函数, 则厂商不能构造出精确的对手环境约束曲线 $\lambda_{-i}(Q - q_i)$, 其预期自然也无法得到。

但是, 发电商至少知道市场出清价和自身出力的历史信息, 也知道对手环境约束曲线为单调下降函数。利用这些信息, 厂商可粗略评估自身的生存环境, 给出较好的报价决策。

对手环境约束曲线整合了厂商的多个对手信息, 在这条曲线下, 厂商如同面对一个竞争对手。虽然无法知道该曲线的细节, 但假设其为单调递减的线性函数具有一定的合理性, 在不完全信息的情形下, 获得分段点的信息是困难的, 因此可简单猜测对手供应函数具有如下形式:

$$q_{-i} = q_{-i}(\lambda) = \begin{cases} \beta_{-i}\lambda + \alpha_{-i} & \lambda \leq \bar{\lambda}_{-i} \\ \bar{q}_{-i} & \lambda > \bar{\lambda}_{-i} \end{cases} \quad (8)$$

这里, $\bar{q}_{-i} = \sum_{j \neq i} \bar{q}_j$ 为对手的最大总供给, $\bar{\lambda}_{-i}$ 为对手以总供给 \bar{q}_{-i} 发电时所要求的最高价格。 q_{-i} 为对手的供给变量, 其意义是厂商 i 不加入市场时对手所发出力总和。根据市场出清条件 $q_i + q_{-i} = Q - r\lambda$, 可以得到对手环境约束曲线为:

$$\lambda = \begin{cases} \frac{1}{\beta_{-i} + r}(Q - \alpha_{-i} - q_i) & \text{if } \lambda \leq \bar{\lambda}_{-i} \Leftrightarrow q_{-i} \leq \bar{q}_{-i} \\ \frac{1}{r}(Q - \bar{q}_{-i} - q_i) & \text{if } \lambda > \bar{\lambda}_{-i} \Leftrightarrow q_{-i} > \bar{q}_{-i} \end{cases} \quad (9)$$

令 $s_{-i} = 1/(\beta_{-i} + r)$ 。从厂商 i 的角度看, 若市场需求不超过对手供应总量上限时 ($q_{-i} \leq \bar{q}_{-i}$), 市场价格由 $s_{-i} \cdot (Q - \alpha_{-i} - q_i)$ 所决定, 这时因对手对厂商 i 的生存环境限制, 市场价格不可能太高。但当需求超过对手的总供给时 ($q_{-i} > \bar{q}_{-i}$), 价格则由 $\frac{1}{r}(Q - \bar{q}_{-i} - q_i)$ 决定: 仅与市场弹性系数和厂商 i 的自身策略有关, 从而在低弹性或无弹性市场, 厂商 i 的市场力将得到最大释放, 导致市场不稳定。

4 发电商微观行为分析

假定发电商 i 的对手采用混合策略, 因此环境约束曲线中的系数 (s_{-i}, α_{-i}) 是随机的, 则发电商 i 对对手环境约束曲线的预期是:

$$\lambda = \bar{s}_{-i} \cdot (Q - \bar{\alpha}_{-i} - q_i), \quad 0 \leq q_i \leq \bar{q}_i \quad (10)$$

其中: $\bar{s}_{-i} = E_{\sigma_{-i}} s_{-i}$, $\bar{\alpha}_{-i} = E_{\sigma_{-i}} \alpha_{-i}$, 这里 $E_{\sigma_{-i}}$ 表示厂商 i 对对手的混合策略取平均。因此对手的实际报价策略可通过两个系数表为 $s_{-i} = \bar{s}_{-i} + \varepsilon_1$, $\alpha_{-i} = \bar{\alpha}_{-i} + \varepsilon_2$, 其中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为零均值的随机误差。于是实际的环境约束曲线可写为:

$$\lambda = (\bar{s}_{-i} + \varepsilon_1) \cdot (Q - (\bar{\alpha}_{-i} + \varepsilon_2) - q_i), \quad 0 \leq q_i \leq \bar{q}_i \quad (11)$$

对式(11)进行简化, 得:

$$\lambda = \bar{s}_{-i} \cdot (Q - \bar{\alpha}_{-i} - q_i) + \varepsilon, \quad 0 \leq q_i \leq \bar{q}_i \quad (12)$$

其中: ε 为零均值的随机误差。在这些假定下, 可分析发电商 i 在不完全信息情形下的博弈行为, 即在持续的报价过程中, 发电商 i 获得了市场价格和自身出力的一系列样本:

$$\{\lambda^R(l), q_i^R(l), l = 1, 2, \dots, m\}$$

根据这些样本对未知参数 ($\bar{s}_{-i}, \bar{\alpha}_{-i}$) 进行估计, 并根据这些估计自适应地改进 i 的报价策略, 使之获得最优利润。

根据市场出清规则 $q_i + q_{-i} = Q - r\lambda$, 实际价格和出力需满足方程

$$\lambda^R = \bar{s}_{-i} \cdot (Q - \bar{\alpha}_{-i} - q_i^R) + \varepsilon^R$$

则厂商 i 的预期对手环境约束曲线为:

$$\lambda = E\lambda^R - \bar{s}_{-i} \cdot (q_i - E q_i^R), \quad 0 \leq q_i \leq \bar{q}_i \quad (13)$$

发电商 i 根据式(13)可确定其最优报价策略, 该策略对应一个厂商 i 所预期的最优价格。由式(13), 可知厂商 i 的利润函数为 $u_i = (E\lambda^R - \bar{s}_{-i} \cdot (q_i - E q_i^R)) q_i - C_i(q_i)$, 其最优出力可通过求解下面的利润最大化问题得到:

$$\max_{q_i \in [0, \bar{q}_i]} u_i \quad (14)$$

5 案例分析

本文使用 IEEE 30 模型进行案例分析。其中, 各厂商的成本参数如表 1 所示。

表 1 厂商成本系数及发电量

Tab.1 GenCO's cost coefficient and generation					
厂商	a	b	c	最小出力	最大出力
1	0.003 7	200	0	0	200
2	0.008 34	325	0	0	200
3	0.017 5	175	0	0	200
4	0.025	300	0	0	200
5	0.025	300	0	0	200
6	0.062 5	100	0	0	200

考虑如下两种初始环境: 1) 低初始报价: 各厂商以等概率随机选取策略 $\{0.8, 0.9, 1\}$ 之一乘以边际成本作为报价函数, 这时各厂商报价总是低于边际成本(但仍获得正利润), 市场价位偏低。2) 高初始报价: 各厂商以等概率随机选取策略 $\{1.3, 1.4, 1.5\}$ 之一乘以边际成本作为报价函数。这时报价策略中则总是高于边际成本, 市场价位较高。

各厂商按上述方案之一产生一组随机策略组合, 并通过市场得到统一出清价及自身的出力; 如此重复 30 次得到 30 组初始样本, 用这种方式描述市场不同的初始状态。在实验中负荷取为 695 MW, 弹性系数为 0。

对环境 1 进行了多组实验, 结果表明市场价格总是保持持续上扬的趋势, 发电商行为表现出正反馈的特性。我们执行了近 2 000 次迭代, 在前 100 次迭代中, 除厂商 1 外, 其它厂商均估计对手斜率参数等于 0。由于厂商 1 估计的斜率参数不等于 0, 这一策略信号通过市场出清过程和信息反馈环反馈给其余厂商, 并在不断重复中逐渐被放大。放大强化的过程大致为: 其余厂商逐渐开始以非零的斜率参数估计对手预期环境约束函数, 从而开始抬升报价, 这些信号重复进入市场, 通过价格反馈给其余厂商。如此, 这种正反馈过程不断强化诸厂商抬升报价策略的信念, 使市场价格不断抬升。我们观察到利润分配格局基本与厂商的成本保持一致, 且所有发电商均在这种正反馈过程中得益, 即各厂商的利润函数随着迭代次数的增加保持递升趋势。因此如果没有外力的作用, 所有的厂商都将乐意将此过程维持下去, 这必将导致电力市场的不稳定。结果表明: 迭代开始阶段, 由于正反馈信号较弱, 市场价格增速较小, 价格增加缓慢。但随着正反馈信号不断加强, 价格增速变快, 这最终将而导致电力市场不稳定性。

当初始环境处于高价格的情形(环境 2), 正反馈现象仍然存在。通过观测, 可发现各发电商的对对手环境斜率参数曲线同步平行缓慢增长, 策略概率接近于退化分布, 即某一主策略具有接近于 1 的概率, 但是在该策略两端的邻近策略具有很小的正概率。小概率策略的存在表明厂商仍存在改变报价的微弱动力。这导致了比环境 1 弱的正反馈, 因此价格增速较环境 1 缓慢。在对环境 2 的多次实验中, 我们还观察到负反馈的情形: 在前 2 000 次迭代中, 市场价格快速下降。然而市场价格不会为负, 存在下界, 因此下降不可永远持续下去, 一定会在某个位置出现转折。在后 2 000 余次迭代中, 价格开始缓步上升, 负反馈结束, 正反馈开始。

在电力市场中, 当各发电商均以价格逼近为追求目标时, 信息反馈环的作用较为明显。在长期迭代过程中, 每个厂商的策略通过市场信号反馈给其它厂商, 并通过他们的对手环境约束曲线中影响其报价策略, 这种反馈作用在各厂商的斜率参数的迭代过程线中得到直观表达。通过这种反馈, 市场合力得到加强或减弱, 其过程较为缓慢并且是渐进式的。市场价位及趋向与初始环境有关, 如果市场价位接近于完全竞争的边际成本价格, 处于寡头地位的厂商将希望释放其市场力, 因而价格有抬高的趋势, 但市场价格可能会在一个较长调整期内增加缓慢, 随着正反馈作用逐渐增强, 价格增速加快, 价格增长曲线变陡, 最终很可能趋向无穷(理论上), 这提示电力市场在危机爆发之前可能存在一个较长的市场力聚集过程。在高价位的初始环境, 正反馈和负反馈可能并存, 市场价格有可能先下降后上升, 也可能直接上升, 但上升速度非常缓慢, 反馈作用较弱, 这可能是由于各厂商已有足够的利润空间的缘故所至。

6 结束语

在电力市场中, 发电商在进行报价时可利用对手的平均策略信息, 对对手的行为了解更加充分, 从而能够更好地释放自身市场力, 以获得更高的利润。市场力是导致电力市场不稳定的最主要因素。本文对完全信息结构下发电商的生存环境进行分析, 通过对对手环境约束曲线的猜测, 引出了发电商在不完全信息下的演化机制: 由于信息的匮乏, 发电商不得不将其利润最大化的决策问题改为追求某种特定目标。例如: 发电商获得额外信息可附加在优化问题的约束域上, 从而形成不同的目标博弈模型; 或者, 只有一部分厂商使用价格逼近法, 而另一部分保守型厂商宁愿使用水平直线作为对手环境约束曲线的估计, 则市场的表现可能会完全不同。总之, 演化机制是可创新的, 市场表现是多样的、复杂的, 这是在研究电力市场稳定性时需要面对的问题。

参考文献

- [1] Alvarado F T. The Stability of Power System Markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 505-511.
- [2] Alvarado F, Mota W. The Role of Energy Imbalance Management on Power Market Stability[A]. in: Proceedings of the 31th Hawaii International Conference on System Science[C]. Hawaii: 1998.
- [3] Alvarado F, Meng J, DeMarco C, et al. Stability Analysis of Interconnected Power Systems Coupled with Market Dynamics[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001,

16(4).
 [4] 薛禹胜. 电力市场稳定性与电力系统稳定性的相互影响[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 1-6; 26(22): 1-4.
 XUE Yu-sheng. Interactions Between Power Market Stability and Power System Stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 1-6; 26(22): 1-4.
 [5] Rudukevich A. Supply Function Equilibrium in Supply Markets: Learning All the Way TCA Technical Paper, 1999.
 [6] Fudenberg, Drew and David K. Levine The Theory of Learning in Games[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 1998.
 [7] Day C J, Hobbs B F, Pang Jong-Shi. Oligopolistic Competition in Power Networks: A Conjectured Supply Function Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 597-606.
 [8] Aleksandr Rudkevich. Tabors Caramanis Supply

Function Equilibrium: Theory and Applications[A]. in: 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'03) - Track 2[C]. Big Island, Hawaii: 2003.
 [9] 宋依群, 倪以信, 侯志俭, 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).
 [10] Gerard Weisbuch. Complex Systems Dynamics: an Introduction Automata Networks[M]. Addison-Wesley, 1991.

收稿日期: 2008-12-09; 修回日期: 2009-04-16
 作者简介:

游义刚 (1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为均衡理论在电力市场中的应用; E-mail: cn_youyi@sina.com
 周晓阳 (1956-), 男, 博士, 教授, 研究方向为复杂系统建模和分析、应用概率统计, 有电力市场的演化分析, 复杂自动机网络方法建模分析探索; 流体计算的格子 Boltzmann 方法研究; 经济和洪水数据的风险分析。

(上接第 22 页 continued from page 22)

在不同的直流控制电流下, 磁阀宽度不同、长度相同的模型-1 与模型-2 的仿真结果数据如表 1 所示 (表中电流单位为 A, 1 表示模型-1, 2 表示模型-2), 从表中可以看出磁阀越宽电抗可调范围越小。

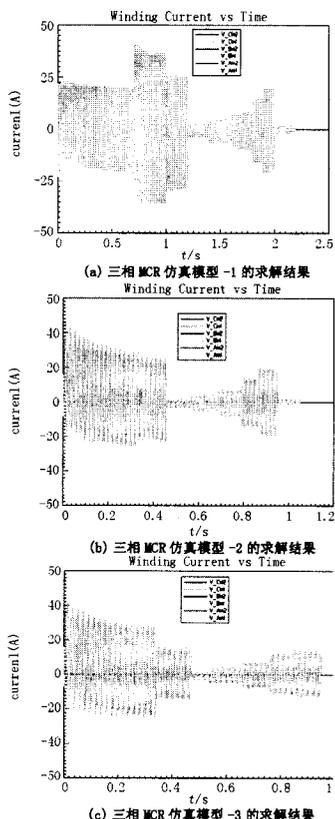


图 5 3 个三相 MCR 仿真模型的求解结果

Fig.5 The solution results of three three-phase MCR simulation models

4 结论

本文提出了一种新型三相磁阀式可控电抗器, 介绍了它的结构和工作原理, 同时对建立的三相磁阀式可控电抗器的分析模型进行了电磁计算及磁阀分析, 通过分析可以得出如下结论:

- (1) 磁路不饱和时情况下, 磁阀的高度调节作用不明显。
- (2) 在磁阀高度不变的情况下, 调节磁阀宽度, 磁阀越宽电抗可调范围越小。

参考文献

[1] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
 [2] 宋子强, 赵巍然, 孙守海, 等. 磁控电抗器的原理及应用[J]. 江西电力职业技术学报, 2006: 7-8.
 [3] 陈柏超, 田翠华, 等. 谐波双级饱和磁控电抗器研究[J]. 电工技术学报 2006: 19-23.
 [4] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅 Ansoft 工程电磁场子有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
 [5] Guru B S. 电磁场与电磁波[M]. Hizirolgu. H R 周克定, 张肃文, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2000.

收稿日期: 2008-12-10; 修回日期: 2009-01-07
 作者简介:

宋江保 (1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为滤波器, 磁控电抗器; E-mail: 136258976@163.com
 王贺萍 (1973-), 女, 工程师, 主要从事无功补偿等电能质量技术的设计研究工作;
 张战永 (1966-), 男, 高级工程师, 主要从事中压变电电力系统技术以及电能质量技术的研究和管理工作。