

基于猜测供给函数的需求弹性 对电力市场运行的影响

马豫超¹, 蒋传文¹, 侯志俭¹, 王承民¹, Ettore Bompard²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海市 闵行区 200240; 2. 意大利都灵理工大学电力工程系, 意大利)

The Impacts of Demand Elasticity on the Electricity Markets Performance based on the Conjecture Supply Function

MA Yu-chao¹, JIANG Chuan-wen¹, HOU Zhi-jian¹, WANG Cheng-ming¹, Ettore Bompard²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Minhang District, Shanghai 200240, China;

2. Department of Electrical Engineering, Politecnico Di Torino, Italy)

ABSTRACT: One of the most important aspects that may affect market welfare is that related to the low demand elasticity. This situation may greatly impact the market performance causing low efficiency, high prices and a disproportional allocation of surpluses. The structure of electricity markets is usually oligopolistic. The possibility of gaming the market is amplified in the presence of low demand elasticity. This paper proposes a model to assess the role of demand elasticity in mitigating the effects of supply side strategic bidding behavior. We model the supply side in a Conjecture Supply Function (CSF) framework, which allows incorporation of exogenous changes in demand elasticity and different levels of competition in a given market. The impacts of demand responsiveness on the market performances are assessed through a set of proposed indices that are applied to a model of the Italian market.

KEY WORDS: electricity markets; demand elasticity; strategic bidding; conjecture supply function

摘要: 影响市场运行的一个重要因素是需求弹性。低需求弹性将导致市场出清价格高, 市场运行效率低, 经济效益分配不合理。由于电力商品的特殊性, 目前电力市场本质上具有寡头竞争的特点。相对较完全的竞争市场, 发电商的策略竞标行为将导致市场运行在低效率水平下, 这一消极因素在低需求弹性下尤为突出。为此提出了一个能评估需求弹性对发电商策略竞标行为影响的模型。该模型将发电商的博弈行为模拟成猜测供给函数(conjecture supply function, CSF) 竞争, 同时将交易市场中的用户需求弹性包含在数学模型中。通过对意大利电力市场的单时段交易的模拟, 运用一系列指标来量化评估需求弹性对具有寡头竞争性质的市场运行的影响。

关键词: 电力市场; 需求弹性; 策略竞标; 猜测供给函数

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(50539140); 中国-欧盟电气工程合作项目(ASI/B7-301/98/679-026- ECLÉE)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50539140).

0 引言

旨在促进市场参与者公平竞争的电力市场改革在中国和意大利已经开始。一种典型的市场结构是联营体(Pool)模式, 电力交易在一个系统运营者(ISO)的协调下进行。电力现货市场的一个典型特征是需求价格弹性低, 这不仅是由于电力能源商品的特殊性(如不能储存, 缺乏良好的替代品等), 而且现货电力和零售电力市场的联系也是一个因素。事实上, 只有一少部分消费者能够将单时段需求竞标送到交易中心, 大部分消费者是通过电力零售商购买电力商品的, 而后者成交的零售价格独立于前者交易中心的批发价格^[1]。既然大部分最终用户看不到“真实”的现货电力市场价格, 他们不能够通过现货市场价格来决策自己的电力消费, 这种“弱价格弹性”行为会通过电力零售商的中间传递表现在整个电力需求侧^[2-3]。

目前的电力市场已经引入了电力供应者之间的自由竞争。电力供应商运用市场力来进行旨在最大化自身生产效益的策略报价。然而, 策略性的寡头竞争行为是以整个系统运行效率为代价的, 市场出清价格的升高和交易量的减少是此类市场力行为的直接后果^[4-7]。从抑制电力供应侧寡头市场力行为的观点看, 已经有一些积极的措施引起市场管理者的重视, 如鼓励电力供需双边交易模式、风险管理、价格封顶(price caps)、折扣机制和剥离拥有不正常的、过大的市场份额的竞争实体^[8-10]。然而, 上述措施没有考虑需求弹性的作用。到目前为止, 大部

分研究市场参与者策略竞标的文献都集中于探讨供求侧行为，而将需求侧模拟为固定不变的线性需求曲线^[11-13]。只有较少的文献研究了需求侧的价格灵敏特性，而且这类文献又大都是讨论消费者策略性改变负荷需求时段构成(load profile)的问题，称为需求价格交叉弹性(cross elasticity)^[14-15]。本文欲藉一系列的电力市场运行指标，如价格、运行效率和发电商生产效益的重新分配等，探讨需求侧自身弹性(own elasticity)针对供应商市场力行为的抑制作用。通过调整需求自身价格弹性值，在发电商猜测供给函数^[16](conjectural supply function, CSF) 模型框架下，来评估需求弹性的提高对电力市场运行的影响。

1 一种电力交易市场需求弹性模型

给定用户的多样性，电力零售商可起到综合零散用户需求的作用，从而可在交易市场中更有效地进行投标。这种情况下，交易市场中的需求曲线综合了所有有资格在市场中投标的电力用户的需求特性。交易市场需求特性可由线性需求曲线描述如下：

$$r = d_1 + d_2 D \quad (1)$$

式中： r 为价格； D 为市场需求量； d_1 为截距值； d_2 为斜率值(负值)。

需求弹性的表达式为

$$e_r = (dD/dr) \cdot (r/D) = r/d_2 D \quad (2)$$

参数 d_1 和 d_2 在特定时间段的电力市场中可以设定为固定值。对不同的用户价格需求响应可通过调整需求曲线上的参考价格-数量点的弹性值来进行模拟。为了评估需求价格弹性对一个给定电力市场的运行影响，本文认为做为当前电力装置和设备容量水平的量值反映的最大用户需求量 D_{max} ，应当在短期内被认为是固定的，即所有需求曲线都应当通过此最大需求量点，但它们具有不同的价格响应程度，见图 1。作为调整线性需求曲线的价格响应程度，本文选择一典型峰荷交易时段的市场价格-需求量数值对 r_0^r 和 D_0^r 作为参考点，并赋予此点参考需求弹性 e_0^r ，以形成该电力市场的参考需求曲线如下：

$$r = r_0^r - (r_0^r / e_0^r) + (r_0^r \cdot D) / (e_0^r D_0^r) \quad (3)$$

然后，基于式(3)可以得到 D_{max} 表达式为

$$D_{max} = D_0^r (1 - e_0^r) \quad (4)$$

式(4)可用来形成不同价格响应程度的在既定电力交易市场下的一族需求曲线，如图 1 所示。在这种情况下，提高需求价格响应程度意味着增大在参考价格点(r_0^r)下的需求弹性。在此价格水平下，用户将不会购买原先的数量 D_0^r ，他们的需求量将变成

新的较小的值 (D_1^r 或 D_2^r)，见图 1。另一方面，用户可能仍然从交易市场中购买同等数量的电力能源， D_0^r ，但在经过调整价格响应特性后得到的新的需求曲线下，用户所愿意接受的市场价比调整前的市场价格低。因此，通过增大在固定参考价格水平 (r_0^r)下的需求弹性，一族通过固定最大需求量点的线性曲线可以表达为

$$r(e^r) = -\frac{r_0^r(1-e^r)}{e^r} + \frac{r_0^r(1-e^r)}{e^r D_0^r(1-e_0^r)} D = d_1(e^r) + d_2(e^r) D \quad (5)$$

式中 $|e_0^r| < |e_1^r| < |e_2^r|$ 。

其中： $|e_0^r| = \frac{D_0^r D_{max}}{OD_0^r}$ ， $|e_1^r| = \frac{D_1^r D_{max}}{OD_1^r}$ ， $|e_2^r| = \frac{D_2^r D_{max}}{OD_2^r}$ ， $D_0^r D_{max} < D_1^r D_{max} < D_2^r D_{max}$ ； $OD_0^r > OD_1^r > OD_2^r$ 。

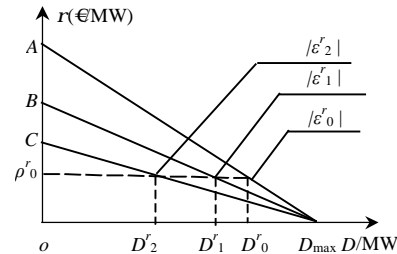


图 1 评估价格响应程度的用户需求模型

Fig. 1 Demand model for assessing price responsiveness

2 弹性需求下的发电商策略竞标模型

本文采用猜测供给函数^[16](CSF)来模拟电力供应侧的策略博弈行为，以得出能够反映交易市场中需求弹性变化的供应商最优供给函数。完全竞争市场(供应商无策略博弈行为，用边际生产成本曲线进行竞标)下的市场出清价和出清量分别为 $I^*(e^r)$ 和 $D^*(e^r)$ 。总交易量中的 $P_f^*(e^r)$ 为除供应商 f 外其余所有竞争者的供应量； $P_f^*(e^r)$ 为供应商 f 的生产量。

在策略竞标下，供应商 f 将用不同于边际成本的策略供给函数进行竞标如下：

$$r_f = b_f p_f + a_f \quad (6)$$

CSF 模型描述了供应商 f 对其余所有竞争者的供给量 p_f 与供应商 f 竞标价格 r_f 之间的关系，见图 2，其表达式为

$$p_f(r_f, e^r) = P_f^*(e^r) + r_f (r_f - I^*(e^r)) \quad (7)$$

其中猜测参数 r_f 反映了供应商 f 的价格竞标对竞争者总供给量的变化响应。不同的参数设定值可以用来描述不同程度的寡头策略竞争模型($r_f = 0 \Rightarrow$ 古诺模型， $r_f = \infty \Rightarrow$ Bertrand 模型^[16])。在剩余需求下(即 $D(r_f, e^r) - p_f(r_f, e^r)$)，供应商 f 可以做为垄断者以确定自身最优供给函数，并获得最大化生产效益。

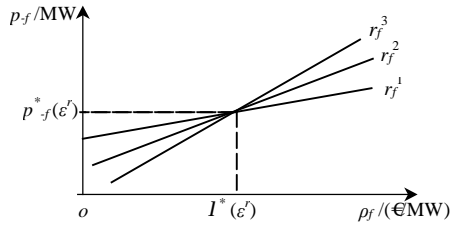


图2 基于目前需求曲线不同猜测参数下的CSF曲线

Fig. 2 The CSF curves with different conjecture parameters at current reference pair

其剩余需求函数为

$$p_f(r_f, e^r) = -d_1(e^r)/d_2(e^r) - P_f^*(e^r) + r_f I^*(e^r) + (1/d_2(e^r) - r_f)r_f = h_1(e^r) - P_f^*(e^r) + r_f I^*(e^r) + (h_2(e^r) - r_f)r_f \quad (8)$$

从式(8)可看到,需求弹性作为一个外在参数将影响供应商的最优供给函数的形成,从而最终影响策略竞标下寡头电力供应市场下的运行情况。当设定的策略供给函数斜率与其边际成本曲线斜率值相同时,供应商的最优供给函数可由最优截距值来定义,以找到式(6)中的最优 a_f 值。相应的供应商 f 的最大化生产效益函数模型为

$$\max \pi_f = r_f(p_f, e^r)p_f - C_f(p_f) + r_f(p_f, e^r)H_f \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \quad \begin{cases} p_f \leq \bar{P}_f \\ -p_f \leq -\underline{P}_f \end{cases}$$

式中: $\underline{P}_f/\bar{P}_f$ 为供应商 f 的最小/大生产量(不包括水电生产量); H_f 为供应商 f 的水电机组生产量; $C_f(p_f) = c_{0f} + c_{1f}p_f + c_{2f}p_f^2$,为 f 的生产成本函数; $r_f(p_f, e^r)$ 为 f 所面临的剩余需求函数。

本文在定义式(9)时额外考虑了发电商的水电机组生产量,并在参考意大利电力市场生产容量构成特征时,考虑了被调度的发电商水电机组生产量为零生产成本。运用一阶导数条件,对应于最大生产效益的价格和供给量点 $(p_f^+(e^r), P_f^+(e^r))$ 可由式(11)~(13)得到。则供应商 f 的最优供给函数为

$$r_f = b_f p_f + a_f^+(e^r) \quad (10)$$

式中: $a_f^+(e^r) = r_f^+(e^r) - 2c_{2f}P_f^+(e^r)$; $b_f(e^r) = 2c_{2f}$; 当 $\underline{P}_f < P_f^+(e^r) < \bar{P}_f$ 时,有

$$\begin{cases} P_f^+(e^r) = \frac{h_1(e^r) - P_f^*(e^r) + r_f I^*(e^r) + (h_2(e^r) - r_f)c_{1f} - H_f}{2[1 - c_{2f}(h_2(e^r) - r_f)]} \\ r_f^+(e^r) = \frac{h_1(e^r) - P_f^*(e^r) + r_f I^*(e^r) + (h_2(e^r) - r_f)c_{1f} - H_f}{2[(h_2(e^r) - r_f) - c_{2f}(h_2(e^r) - r_f)^2]} \\ \frac{h_1(e^r) - P_f^*(e^r) + r_f I^*(e^r)}{h_2(e^r) - r_f} \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{当 } \bar{P}_f \leq \frac{h_1(e^r) - P_f^*(e^r) + r_f I^*(e^r) + (h_2(e^r) - r_f)c_{1f} - H_f}{2[1 - c_{2f}(h_2(e^r) - r_f)]} \text{ 时}$$

$$\begin{cases} P_f^+ = \bar{P}_f \\ r_f^+(e^r) = -\frac{h_1(e^r) - P_f^*(e^r) + r_f I^*(e^r)}{h_2(e^r) - r_f} + \frac{1}{h_2(e^r) - r_f} \bar{P}_f \end{cases} \quad (12)$$

$$\text{当 } \frac{h_1(e^r) - P_f^*(e^r) + r_f I^*(e^r) + (h_2(e^r) - r_f)c_{1f} - H_f}{2[1 - c_{2f}(h_2(e^r) - r_f)]} \leq \underline{P}_f \text{ 时}$$

$$\begin{cases} P_f^+ = \underline{P}_f \\ r_f^+(e^r) = -\frac{h_1(e^r) - P_f^*(e^r) + r_f I^*(e^r)}{h_2(e^r) - r_f} + \frac{1}{h_2(e^r) - r_f} \underline{P}_f \end{cases} \quad (13)$$

市场出清模型为

$$\begin{aligned} \max \quad & S^S \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} p_f \leq \bar{P}_f \leftrightarrow \bar{g}_f \forall f \\ -p_f \leq -\underline{P}_f \leftrightarrow \underline{g}_f \forall f \\ D = \sum_f p_f \leftrightarrow I \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: S^S 为系统效益,其值等于用户侧消费效益减去发电商生产成本; p_f 为供应商 f 的生产量(不包括水电生产量); I 为等式约束的Lagrange变量; $\bar{g}_f, \underline{g}_f$ 为不等式约束的Lagrange变量。

从最优化问题式(14),可得到完全竞争市场平衡点(perfect competition equilibrium PCE)下相应的市场出清价 $I^*(e^r)$ 和市场调度量 $P_f^*(e^r)$ 为

$$\begin{cases} I^*(e^r) = \left[\sum_f \frac{c_{1f} + \bar{g}_f^* - \underline{g}_f^*}{c_{2f}} - \frac{d_1(e^r)}{d_2(e^r)} \right] / \left[\sum_f \frac{1}{2c_{2f}} - \frac{1}{d_2(e^r)} \right] \\ P_f^*(e^r) = \frac{I^*(e^r) - \bar{g}_f^* + \underline{g}_f^* - c_{1f}}{2c_{2f}} \end{cases} \quad (15)$$

上述变量用于形成式(8)所求的供应商 f 的市场剩余需求函数。在策略性最优供给函数式(10)下的寡头竞争平衡点(oligopoly competition equilibrium, OCE)的市场出清价 $I^o(e^r)$ 和市场出清调度量 $P_f^o(e^r)$ 为

$$\begin{cases} I^o(e^r) = \left[\sum_f \frac{a_f^+(e^r) + \bar{g}_f^o - \underline{g}_f^o}{2c_{2f}} - \frac{d_1(e^r)}{d_2(e^r)} \right] / \left[\sum_f \frac{1}{2c_{2f}} - \frac{1}{d_2(e^r)} \right] \\ P_f^o(e^r) = \frac{I^o(e^r) - \bar{g}_f^o + \underline{g}_f^o - a_f^+(e^r)}{2c_{2f}} \end{cases} \quad (16)$$

猜测供应参数 r_f 将影响 f 的生产效益。由式(9)可得

$$\frac{\partial p_f}{\partial r_f} = (H_f + p_f) \frac{\partial r_f}{\partial r_f} = (H_f + p_f) \frac{p_f - P_f^*(e^r)}{(h_2(e^r) - r_f)^2} \leq 0 \quad (17)$$

上述不等式意味着供应商 f 的生产效益关于 r_f 是递减函数,随 r_f 增大(市场竞争程度增大)而减小。

3 评估需求弹性对市场运行影响的指标

本文以下列指标来评估需求弹性对发电商实施市场力进行策略竞标的寡头竞争市场运行的影响。

(1) Lerner 指标:

$$K_\lambda(e^r)=[I^o(e^r)-I^*(e^r)]/I^o(e^r)$$

(2) 发电商生产效益份额指标:

$$K_{\Delta S^D}(e^r)=S_f^{Go}(e^r)/S^{Go}(e^r)$$

(3) 市场运行效率指标:

$$K_s(e^r)=[S^{S^*}(e^r)-S^{So}(e^r)]/S^{S^*}(e^r)$$

式中: I 为市场出清价,上标“*”为完全竞争市场下的出清结果,“ o ”为寡头竞争市场下的出清结果。

市场综合运行效率可由社会效益(S^S)和无谓损失(S)来表达,见图 3,其中无谓损失为面积 ACE。

(4) 生产效率指标:

$K_{\Delta C}(e^r)=[\sum_f C_f^o(D^o(e^r))-\sum_f C_f^m(D^o(e^r))]/\sum_f C_f^m(D^o(e^r))$
 式中: $D^o(e^r)$ 是寡头竞争市场下的市场出清量, C^o 是与 $D^o(e^r)$ 相对应的生产成本。 C^m 是针对相同出清产量 $D^o(e^r)$ 在完全竞争市场下的生产成本,也就是出清量为 $D^o(e^r)$ 的市场最低生产成本。

(5) 效益转移指标:

$$\Delta S^T(e^r)=[I^o(e^r)-I^*(e^r)]D^o$$

此指标可以用来量定由于发电商的寡头竞争行为而从用户侧总消费效益中所赚取的额外生产效益,见图3中的面积 AI^oI^*B 。这部分效益将随着需求弹性的提高导致寡头竞争市场向完全竞争市场过渡而转换回用户侧总消费者的效益中去。

(6) 效益变化指标: 无谓损失 S 可分为2部分,其中 $S^G(e^r)$ 为生产者无谓损失部分(面积 BCE), $S^D(e^r)$ 为消费者无谓损失部分(面积 ABE)。进而引入 $K_{\Delta S^D}(e^r)$ 和 $K_{\Delta S^G}(e^r)$ 2个指标来分别表达用户侧经济效益变化 ($\Delta S^D(e^r)$) 和供应商生产效益变化 ($\Delta S^G(e^r)$), 其表达式为

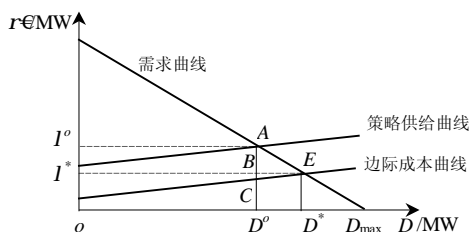


图 3 电力市场经济效益示意图

Fig. 3 Surplus metrics in electricity market

$$\begin{cases} \Delta S^D(e^r)=-[\Delta S^T(e^r)+S^{D-}(e^r)] \\ \Delta S^D(e^r)=\Delta S^T(e^r)-S^{D-}(e^r) \\ K_{\Delta S^D}(e^r)=\Delta S^D(e^r)/S^{S^*}(e^r) \\ K_{\Delta S^G}(e^r)=\Delta S^G(e^r)/S^{S^*}(e^r) \end{cases} \quad (18)$$

4 市场模拟

本文针对意大利电力市场进行模拟,设定意大利电力市场的供应侧由 7 个不同类型的发电商组成,见表 1。根据发电商的不同机组型号和容量来合成其综合生产成本(应用 OLS, Ordinary least square 来进行数据拟合, $R^2 > 87\%$),见表 2。

第 2 节的参考市场出清点 (r_0^r/D_0^r) 来自于意大利电力市场 2004 年,4 月 6 日,10 点单时段实际交易结果 $r_0^r=85.42 \text{ €/MW}$, $D_0^r=44450 \text{ MW}$, $e_0^r=-0.05$ 。另外,设定有 6000MW 进口电量,因此实际净交易需求量由该时段总出清量减去进口电量得到。表 3 是古诺模型计算结果 ($r_f=0$)。正如所预期的,提高参考价格点 r_0^r 的需求弹性 e^r 同样也会提高在寡头市场出清点的弹性值 e^o 。此时 K_λ 从 0.869 降至 0.336。 K_s 在 -14.29% 和 -8.7% 之间变动,说明市场运行效率的提高。将需求弹性从 -0.05 提高到 -0.1 使得由于发电商策略博弈行为而造成从用户侧转移到发电商侧的经济效益降低了近 50%,见表 3 第 12 栏。同时,用户侧经济效益变化指标 $\Delta S^D(e^r)$ 增大(绝对值减小)和供应商生产效益变化指标 $\Delta S^G(e^r)$ 减小都意味着存在发电商策略博弈行为的古诺模型市场向完全竞争市场的过渡。总的来

表 1 发电商机组型号组成
Tab. 1 Generation mix of the firms

机组 型号	发电商 /MW						
	1	2	3	4	5	6	7
水电机组	4500	4500	400	500	1100	800	2200
联合循环机组	500	0	0	0	0	900	2800
燃油机组	3000	3500	900	1100	0	0	300
燃油-汽机组	1600	1600	2400	1800	1100	1300	2200
燃油-煤机组	1800	1600	900	300	900	0	0
燃油-煤-汽机组	800	800	0	0	0	0	0
柴油机组	0	0	0	100	0	0	300
turbo gas 机组	1100	1200	300	0	0	400	200

表 2 发电商边际成本
Tab. 2 Marginal cost coefficients of generation firms

系数	发电商						
	1	2	3	4	5	6	7
$c_{2f}(10^{-3}) \text{ €/MW}^2$	3.15	3.15	5.715	6.64	10.77	10.37	4.29
$c_{1f}(\text{€/MW})$	12.61	13.76	13.92	17.11	10.33	15.65	14.86
容量/MW	8800	8700	4500	3300	2000	2600	5800
市场份额/%	24.65	24.37	12.61	9.24	5.6	7.28	16.25
水电机组/MW	4500	4500	400	500	100	800	2200
水电机组份额/%	34.62	34.62	3.08	3.85	0.77	6.15	16.92
总市场份额/%	27.31	27.1	10	7.8	4.31	6.98	16.43

说,需求弹性越低,提高需求弹性而得到的对发电商策略性行为抑制作用越明显。即提高需求弹性的边际效用在降低。考虑到电力市场中需求弹性通常较低,一般为-0.02到-0.2,所以提高需求弹性具有显著的作用。表4是在 r_f 为135的情况下所得到的市场运行结果。发电商的猜测参数值可以用来描述意大利电力市场的真实竞争程度。事实上,由这个猜测参数值模拟得到的市场出清结果和实际市场出清结果非常近似(比较表4第1行的价格/数量和前面所提到的参考实际市场结果: $I^E=85.87 \approx r_0^r=85.42; D^0=25.444\text{MW}+19.000\text{MW} \approx D_0^r=44.450\text{MW}$)。同样注意在寡头模拟市场出清点的需求弹性值(ϵ^0)等于参考需求弹性值($\epsilon_0^r=-0.05$)。相对于表3而言,提高需求弹性值对市场运行的积极作用变缓和。此时提高需求弹性依然对降低寡头竞争市场出清价作用明显,Lerner指标显著降低。同时,只有 $K_{\Delta^D}, K_{\Delta^G}$ 和 K_s 随需求弹性增高而向预期改善趋势单调变化。由图1和图3可知:这是因为需求弹性的提高对用户侧总经济效益计算的影响在寡头竞争市场下比在完全竞争市场下大,见表4第5、6列。比较表3和表4中具有相近似的市场出清价(λ^0)可看出:表3第6行的市场出清价和表4第1行的价格近似,而前者的需求弹性为-0.4,后者的需求

弹性为-0.05。因此,提高竞争程度(r_f 从0提高到135),具有和提高需求弹性(从-0.05到-0.4)在降低出清价有近似相同的作用。生产效率指标总体上随需求弹性的提高而改善,但这种趋势在低需求弹性情况下并不明显,这是因为寡头竞争市场内占市场份额大且生产成本低的发电商实施市场力行为减少产量和抬高市场价格,从而导致生产成本高的发电商以最大生产容量供给市场。只有当进一步提高需求弹性,市场主导发电商改变策略竞标(最优供给函数接近边际成本函数)致使高成本发电商的调度产量降低,从而使总生产成本降低。

图4为古诺模型下发电商生产效益份额指标变化趋势。在低需求弹性下,发电商1和2占市场容量份额大(分别为27.31%和27.1%,见表1、2),生产成本低(每个厂商有34.62%水电机组份额),但他们的生产效益份额相对却较小。与此相反,市场份额小的高生产成本厂商由于受宜于发电商1和2的强市场力行为,使得他们的生产效益份额相对大。随着需求弹性的提高,发电商1和2的生产效益份额增大,意味着大部分的生产效益向效率高的发电商1和2汇集。因此,需求弹性的提高促进了生产效益的有效再分配。

表3 市场运行指标(古诺模型)($r_1=r_2=r_3=r_4=r_5=r_6=r_7=0$)
Tab. 3 Market performance indices (cournot model) ($r_1=r_2=r_3=r_4=r_5=r_6=r_7=0$)

ϵ^r	ϵ^0	I^*	λ^0	D^*/MW	D^0/W	K_s	$K_s\%$	$\Delta S^T/(10^6 \text{€})$	$\Delta S^D/(10^6 \text{€})$	$\Delta S^G/(10^6 \text{€})$	$K_{\Delta SD}\%$	$K_{\Delta SG}\%$	$K_{\Delta C}\%$
-0.05	-0.28	51.5	392.73	25955	20872	0.869	-14.29	7.122	-7.989	11.385	-33.61	47.90	25.54
-0.10	-0.30	50.5	218.83	25290	20499	0.769	-13.00	3.45	-3.854	5.460	-31.18	44.18	27.47
-0.15	-0.32	49.7	159.96	24695	20195	0.689	-11.71	2.227	-2.475	3.714	-28.92	40.62	29.31
-0.20	-0.34	48.9	131.10	24172	19887	0.627	-10.82	1.634	-1.810	3.477	-27.17	38.00	28.13
-0.30	-0.39	47.6	103.18	23283	19274	0.538	-9.80	1.070	-1.182	2.531	-24.79	34.59	24.57
-0.40	-0.42	46.6	88.78	22558	18787	0.475	-8.81	0.793	-0.872	1.649	-22.83	31.64	23.61
-0.50	-0.46	45.7	80.90	21955	18287	0.435	-8.72	0.643	-0.708	1.209	-21.74	30.47	19.96
-0.60	-0.50	45.0	75.60	21445	17855	0.405	-8.69	0.546	-0.601	0.992	-20.89	29.58	17.45
-0.70	-0.53	44.3	71.80	21009	17472	0.382	-8.74	0.480	-0.528	0.851	-20.25	28.98	15.40
-0.80	-0.56	43.8	68.90	20632	17143	0.364	-8.75	0.430	-0.474	0.756	-19.67	28.42	13.96
-0.90	-0.59	43.3	66.60	20302	16858	0.349	-8.73	0.392	-0.432	0.685	-19.17	27.90	12.92
-1.00	-0.61	42.9	64.70	20011	16608	0.336	-8.70	0.361	-0.398	0.628	-18.71	27.41	12.14

表4 市场运行指标($r_1=r_2=r_3=r_4=r_5=r_6=r_7=135$)
Tab. 4 Market performance indices ($r_1=r_2=r_3=r_4=r_5=r_6=r_7=135$)

ϵ^r	ϵ^0	I^*	λ^0	D^*/MW	D^0/W	K_s	$K_s\%$	$\Delta S^T/(10^6 \text{€})$	$\Delta S^D/(10^6 \text{€})$	$\Delta S^G/(10^6 \text{€})$	$K_{\Delta SD}\%$	$K_{\Delta SG}\%$	$K_{\Delta C}\%$
-0.05	-0.05	51.5	85.87	25955	25444	0.40	-1.65	0.870	-0.88	1.28	-3.72	5.37	5.45
-0.10	-0.09	50.5	80.42	25290	24435	0.37	-2.67	0.730	-0.74	1.07	-6.01	8.68	5.93
-0.15	-0.13	49.7	76.58	24695	23598	0.35	-3.41	0.630	-0.65	0.94	-7.59	11.00	5.79
-0.20	-0.17	48.9	73.42	24172	22894	0.33	-3.93	0.560	-0.58	0.84	-8.65	12.60	5.74
-0.30	-0.23	47.6	68.87	23283	21750	0.31	-4.70	0.460	-0.48	0.70	-10.00	14.70	5.28
-0.40	-0.28	46.6	65.54	22558	20865	0.29	-5.19	0.395	-0.41	0.61	-10.76	15.95	4.95
-0.50	-0.33	45.7	62.96	21955	20157	0.27	-5.50	0.350	-0.36	0.54	-11.10	16.65	4.74
-0.60	-0.36	45.0	60.90	21445	19578	0.26	-5.71	0.310	-0.33	0.49	-11.30	17.05	4.59
-0.70	-0.40	44.3	59.21	21009	19094	0.25	-5.85	0.280	-0.30	0.45	-11.40	17.27	4.49
-0.80	-0.43	43.8	57.87	20632	18677	0.24	-5.98	0.260	-0.28	0.42	-11.50	17.45	4.33
-0.90	-0.46	43.3	56.73	20302	18315	0.24	-6.09	0.245	-0.26	0.40	-11.50	17.58	4.18
-1.00	-0.48	42.9	55.76	20011	18000	0.23	-6.18	0.230	-0.24	0.37	-11.50	17.66	4.05

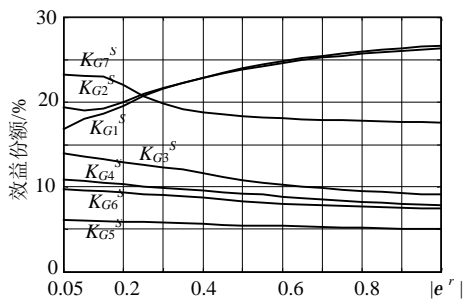


图4 发电商生产效益份额指标图

Fig. 4 Producer surplus share index under Cournot model

5 结论

电力交易市场中的电力需求弹性低,致使发电商有较大的需求空间实施市场力,导致市场运行效率低。一些提高需求弹性的措施已经引起市场管理者的重视,在这种情况下,量性评估市场需求弹性作用就具有重要意义。

本文提出了一个能够反映需求弹性变化的寡头竞争市场模型,运用一系列指标来量化评估需求弹性的影响。从对意大利电力市场的模拟来看,提高需求弹性具有积极作用。当市场竞争程度低时,如本文中的古诺模型案例,需求弹性的少量提高将对古诺模型市场运行产生重大影响,如显著降低市场出清价和提高市场运行效率及改善用户侧消费效益等。当市场竞争程度较高时(如本文中的高猜测参数市场模拟),提高需求弹性同样在降低市场出清价,改善用户侧消费效益和发电商生产效益再分配方面具有积极意义。另外,随着需求弹性的提高,相对于低效率发电商而言,高效率发电商可得到更高的生产效益份额也说明了提高需求弹性的作用。

参考文献

- [1] Lafferty R, Hunger D, Ballard J, et al. Demand responsiveness in electricity markets[EB/OL]. 2002 Online: http://www.naseo.org/committees/energyproduction/documents/demand_responsiveness_in_electricity_markets.pdf: 4
- [2] Taylor L D. The demand for electricity: a survey. *Bell Journal of Economics*, Spring75: 6(1).
- [3] Daniel S K. Demand-side view of electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(2): 520-527.
- [4] 姚建刚,唐捷,李西泉,等.发电侧电力市场竞争交易模式的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2004, 24(5): 79-83.
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): 79-83(in Chinese).
- [5] 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(in Chinese).
- [6] 甘德强,王建全,胡朝阳.联营电力市场的博弈分析:单时段情形[J]. *中国电机工程学报*, 2003, 23(6): 71-76.
Gan Deqiang, Wang Jianquan, Hu Zhaoyang. Auction games in pool-based electricity markets: single-period case[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(6): 71-76(in Chinese).
- [7] 胡朝阳,许婧,甘德强,等.电力市场竞价博弈实验方案设计和结果分析[J]. *电力系统自动化*, 2004, 28(4): 10-16.
Hu Chaoyang, Xu Jing, Gan Deqiang, et al. Design and analysis of auction experiment for electricity market[J]. *Automation of Electric Power System*, 2004, 28(4): 10-16(in Chinese).
- [8] Lusan D A, Yu Z, Sparrow F T. Market gaming and market power mitigation in deregulated electricity markets in *Power Engineering Society [C]. 1999 Winter Meeting, IEEE, New York, 1999, 839-843.*
- [9] 张宇波,罗先觉,邹晓松,等.发电市场势力研究与交易方式对发电市场势力影响的分析, *中国电机工程学报*, 2004, 24(4): 18-23.
Zhang Yubo, Luo Xianjue, Zou Xiaosong, et al. Generation market power and the influence of bilateral trade on it[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2004, 24(4): 18-23(in Chinese).
- [10] Chung T S, Zhang S H, Wong K P, et al. Strategic forward contracting in electricity markets: modeling and analysis by equilibrium method [J]. *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 2004 151(2): 141-149.
- [11] Tengshun P, Tomsovic K. Congestion influence on bidding strategies in an electricity market[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003 18(3): 1054-1061.
- [12] Wang X, Li Y Z, Zahng S H. Oligopolistic equilibrium analysis for electricity markets: a nonlinear complementarity approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(3): 1348-1355.
- [13] 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*, 2003, 23(12): 24-27.
Song Yiquan, Jiao Lianwei, Ni Yixin, et al. An improvement of generation firms' bidding strategies based on the conjectural variation regulation via dynamic learning[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(12): 24-27(in Chinese).
- [14] Strbac G, Kirschen D. Assessing the competitiveness of demand-side bidding, *IEEE Transactions on Power Systems*, 1999 14(1): 120-125.
- [15] Kirschen D S, Strbac G, Cumperayot P. Factoring the elasticity of demand in electricity prices[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000 15(2): 612-617.
- [16] Day C J, Hobbs B F, Pang J S. Oligopolistic competition in power networks: a conjectured supply function approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002 17(3): 597-607.

收稿日期: 2006-03-21。

作者简介:

马豫超(1974—),男,上海交通大学与 Politecnico Di Torino, Italy 联合培养博士生,现在 Politecnico Di Torino, Italy 做博士生研究,主要从事电力市场,电力系统分析等方面的研究, mayuchao@sjtu.edu.cn 或: yuchao.ma@polito.it;

候志俭(1942—),男,教授,博士生导师,主要从事电力市场,电力系统分析等方面的研究;

蒋传文(1967—),男,副教授,主要从事电力市场,电力系统分析等方面的研究。

(责任编辑 喻银凤)