

基于博弈论的发电侧竞价市场均衡特性分析

周建中, 李清清, 李超顺, 莫莉, 张勇传

(华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 利用供给函数均衡模型分析发电侧竞价市场均衡的性质。求解出市场均衡下市场出清电价、发电商上网电量和收益等市场出清结果的解析解, 通过推导这些市场出清结果相对需求价格函数参数和发电商成本函数参数的导数并确定其性质, 揭示了电力需求和需求价格弹性及其组合影响市场均衡的规律, 结合两种不同发电商成本结构分析了发电商成本特性对市场均衡的影响。算例验证了导数性质及相关结论。

关键词: 电力市场; 供给函数均衡; 导数; 需求价格弹性; 发电成本

Analysis on equilibrium characteristics of supply side bidding market based on game theory

ZHOU Jian-zhong, LI Qing-qing, LI Chao-shun, MO Li, ZHANG Yong-chuan

(College of Hydroelectric and Digitization Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper utilizes supply function equilibrium model to analyze the equilibrium characteristics of supply side bidding market. Firstly, analytic solutions of clearing results such as market clearing price, the generation quantities and profits of independent power producers (IPPs) under market equilibrium are derived. The derivative of these market clearing results relative to the parameters of demand-price function and IPP's generation cost function are deduced and its characteristic is determined, then the rule that power demand and demand-price elasticity and their combination affect on equilibrium is revealed. The impact of IPP's generation cost characteristics on equilibrium are concluded using two different generation cost structures. An example validates the derivative property and corresponding conclusions.

This work is supported by National Science and Technology Support Plan of China (No.2008BAB29B08) and the Special Research Foundation for the Public Welfare Industry of the Ministry of Science and Technology and the Ministry of Water Resources of China (No.200701008).

Key words: electricity market; supply function equilibrium; derivative; demand-price elasticity; generation cost

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0082-06

0 引言

在发电侧电力市场中, 发电商根据自身发电特性, 通过学习并优化竞价策略相互作用, 最终使市场达到稳定的均衡状态。市场均衡的性质以及其随各种因素变化的规律包含直观而有效的决策信息, 直接影响到发电商、电力用户、调度中心和监管单位等市场主体的经济效益和运营策略, 因此受到了广泛的关注和研究。

在现有市场均衡模型中, 供给函数均衡模型不仅能处理需求缺乏弹性的情况, 而且能很好地反映

市场主体之间的相互作用, 目前已广泛应用于市场竞价分析^[1]。利用供给函数均衡模型分析电力市场均衡特性已有一些研究成果^[2-15]。文献[2]指出不同供给函数均衡模型参数形式导致不同市场均衡解; 文献[3-4]证明, 在线性供给函数均衡模型中, 发电商通过学习可以使市场达到唯一稳定的均衡; 文献[5]利用最优潮流灵敏度分析求解出输电约束下的线性供给函数均衡, 并分析了输电约束对发电商策略性竞价的影响; 文献[6-8]建立了考虑远期合约的供给函数均衡模型, 得出了远期合约可以抑制发电商在现货市场行使市场力的结论; 文献[9]利用供给函数均衡模型和古诺模型分别对现货市场和期权市场进行建模, 并分析了电力期权对现货市场均衡的影响; 文献[10-12]利用供给函数均衡模型分析了需

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2008BAB29B08); 科技部水利部公益性行业科研专项基金(200701008)

求价格弹性对市场均衡和发电商报价行为的影响; 文献[13-14]建立了需求侧竞价下的供给函数均衡模型, 推导出需求侧参与竞价可以有效地降低电价并减小发电商市场力的结论。

对比上述研究成果, 本文侧重于利用解析方法分析发电侧市场均衡特性, 通过求解市场均衡下的出清电价、发电商电量和收益及其导数, 并根据导数的性质讨论需求价格特性和发电商成本特性影响均衡的规律, 继而对不同需求价格特性和发电商成本结构下的市场均衡进行对比分析。

1 发电侧竞价市场的供给函数均衡模型

以电力库模式日前市场为例。假设竞价时段长度为 1 h, 并且每个发电商在同一竞价周期只向交易中心提交一组报价数据, 交易中心在接收到发电商的报价数据后, 以供需平衡为目标进行出清。

发电商的收益最大化目标可表示为:

$$\max \pi_i = Pq_i - C_i(q_i) \quad (1)$$

式中: $i=1, 2, \dots, n$ 为发电商编号; π_i 和 q_i 分别为第 i 个发电商的收益和上网电量; P 为市场出清电价; C_i 为第 i 个发电商的成本函数。

$$C_i(q_i) = 0.5c_iq_i^2 + b_iq_i + a_i \quad (2)$$

式中: $c_i, b_i > 0$ 为第 i 个发电商的可变成本系数; $a_i > 0$ 为固定成本系数。假设 $\forall i, i=2, \dots, n, b_i=b$, 即所有发电商的成本函数系数 b_i 相同, 则各发电商的可变成本差异通过系数 c_i 表示。

假设各发电商的供给函数为:

$$q_i = \beta_i(P_{bi} - \alpha_i) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: $\beta_i, \alpha_i > 0$ 均为第 i 个发电商供给函数的系数, 记 β_i 为竞价系数; P_{bi} 为第 i 个发电商的报价。

考虑电价的影响, 将电力需求表示为:

$$D(P) = N - \lambda P \quad (4)$$

式中: N 为最大电力需求; λ 为表征需求价格弹性的系数。

市场出清条件为电力供需平衡, 即:

$$D(P) = \sum_{i=1}^n q_i \quad (5)$$

式 (1) 对 P 求导, 得出一阶最优条件为:

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial P} = q_i + (P - \frac{\partial C_i}{\partial q_i}) \frac{dq_i}{dP} = 0 \quad (6)$$

将式 (2)、(4)、(5) 带入式 (6) 可获得最优上网电量与市场出清电价的关系为:

$$q_i = \frac{\lambda + \sum_{j=1, j \neq i}^n \beta_j}{1 + c_i(\lambda + \sum_{j=1, j \neq i}^n \beta_j)} (P - b) \quad (7)$$

由式 (3)、(7) 可得发电商最优供给函数系数为:

$$\beta_i = \frac{\lambda + \sum_{j=1, j \neq i}^n \beta_j}{1 + c_i(\lambda + \sum_{j=1, j \neq i}^n \beta_j)} \quad (8)$$

$$\alpha_i = b \quad (9)$$

当所有发电商供给函数系数满足式 (8) 和 (9) 时, 各发电商能获得最大收益, 因此没有动机改变竞价策略, 此时竞价市场达到均衡。联立式 (1) ~ (5) 和式 (8) ~ (9) 可以推导均衡状态下各种结果:

$$P = \frac{N - \lambda b}{\lambda + \sum_{i=1}^n \beta_i} + b \quad (10)$$

$$q_i = \frac{\beta_i(N - \lambda b)}{\lambda + \sum_{j=1}^n \beta_j} \quad (11)$$

$$\pi_i = \frac{(\beta_i - 0.5c_i\beta_i^2)(N - \lambda b)^2}{(\lambda + \sum_{j=1}^n \beta_j)^2} - a_i \quad (12)$$

假设发电商对竞价市场具有完全信息, 则市场均衡可由如下迭代方式达到: 所有发电商首先以边际电价进行报价, 然后每个发电商通过估计得到上一次其他发电商的报价参数, 并假设其他发电商保持上一次的竞价参数不变, 从而根据式 (8) 调整竞价系数, 按照文献[4]的结论, 这种学习过程最终使竞价市场达到均衡。

1.1 与需求价格函数相关的导数

由式 (10) ~ (12) 可知, 市场出清电价、发电商的上网电量和收益为需求价格函数参数和各发电商竞价系数的函数, 而各发电商竞价系数同时为需求价格函数参数的函数。因此, 需要首先分析竞价系数随需求价格函数参数变化的规律。

由式 (8) 分别对 λ, N 求导可得,

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial \lambda} = \frac{1}{(1 - A)(B^2 + 1)}, \quad \frac{\partial \beta_i}{\partial N} = 0 \quad (13)$$

式中:

$$A = \sum_{j=1}^n \frac{1}{(1+c_j(\lambda+M-\beta_j))^2+1} \quad (14)$$

$$B = 1+c_i(\lambda+M-\beta_i) \quad (15)$$

$$M = \sum_{j=1}^n \beta_j \quad (16)$$

将式(8)代入式(14)可得,

$$A = \sum_{j=1}^n \frac{(\beta_j)^2}{(\lambda+M-\beta_j)^2+(\beta_j)^2} < 1 \quad (17)$$

由式(14)和式(15)可知, $B>1$, $0<A<1$, 则式(13)所示导数大于零, 则均衡状态下各发电商的竞价系数为参数 λ 的递增函数, 但与参数 N 无关。

结合式(13), 式(10)~(12)分别对 λ , $N(t)$ 求导可得:

$$\frac{\partial P}{\partial N} = \frac{1}{\lambda+M} \quad (18)$$

$$\frac{\partial P(t)}{\partial \lambda} = \frac{-b(\lambda+M)(1-A)-(N-\lambda b)}{(1-A)(\lambda+M)^2} \quad (19)$$

$\forall i, i=2, \dots, n$

$$\frac{\partial q_i}{\partial N} = \frac{\beta_i}{\lambda+M} \quad (20)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial \lambda} = \frac{b(\beta_i(1-A)(B^2+1)+\lambda)}{(1-A)(B^2+1)(\lambda+M)} - \frac{\beta_i(N-\lambda b)}{(1-A)(\lambda+M)^2} \quad (21)$$

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial N} = \frac{(2\beta_i - c_i \beta_i^2)(N-\lambda b)}{(\lambda+M)^2} \quad (22)$$

$$\frac{\partial \pi_i}{\partial \lambda} = \frac{B^2(\lambda+M-\beta_i)(N-\lambda b)^2}{W_i^2(1-A)(B^2+1)} - \frac{b(N-\lambda b)}{W_i} \quad (23)$$

式中: $W_i = 2(\lambda+M-\beta_i) + c_i(\lambda+M-\beta_i)^2$ 。根据 $N-\lambda b>0$, $c_i \beta_i < 1$, $B>1$, $0<A<1$, 可推导出式(18)、

(20)和(22)所示导数均大于零, 而式(19)、(21)和(23)中的导数均小于零。因此, 市场均衡时的出清电价、各发电商的电量和收益均为需求价格函数参数 λ 的递减函数, 同时是参数 N 的递增函数。

1.2 与发电成本相关的导数

不失一般性, 以第一个发电商为研究对象, 分析各市场要素随其发电成本变化的规律。

市场均衡下各发电商竞价系数对 c_1 的导数为:

$$\frac{\partial \beta_1}{\partial c_1} = \frac{-(\lambda+M-\beta_1)^2(1-F)}{E^2-F(E^2+1)} \quad (24)$$

$$\frac{\partial \beta_i}{\partial c_1} = \frac{-(\lambda+M-\beta_i)^2}{((1+c_i(\lambda+M-\beta_i))^2+1)(E^2-F(E^2+1))} \quad (25)$$

$$i=2, \dots, n$$

式中:

$$E = 1+c_1(\lambda+M-\beta_1) \quad (26)$$

$$F = \sum_{i=2}^n \frac{1}{(1+c_i(\lambda+M-\beta_i))^2+1} \quad (27)$$

根据式(24)、(25), 可以推导出:

$$F(E^2+1) = ((1+2c_1(Y-\beta_1^*))^2+1) \cdot \sum_{j=1}^n \frac{(\beta_j^*)^2}{(Y-\beta_j^*)^2+(\beta_j^*)^2} - 1 < (1+2c_1(Y-\beta_1^*))^2 = E^2 \quad (28)$$

由式(28)可知, $E^2-F(E^2+1)>0$, 又 $E>1$, $0<F<A<1$, 可得式(24)、(25)所示的导数均小于零, 即市场均衡下各发电商竞价系数均为第一个发电商发电成本函数参数 c_1 的递减函数。

结合式(24)、(25), 由式(10)~(12)对 c_1 求导可得:

$$\frac{\partial P(t)}{\partial c_1} = \frac{(N-\lambda b_s)(\lambda+M-\beta_1)^2}{(\lambda+M)^2(E^2-F(E^2+1))} \quad (29)$$

$\forall i, i=2, \dots, n$

$$\frac{\partial q_i(t)}{\partial c_1} = \frac{\beta_i(N(t)-\lambda b_s)(\lambda+M-\beta_1)^2}{(\lambda+M)^2(E^2-F(E^2+1))} \cdot \frac{(\lambda+M-\beta_i)((\lambda+M-\beta_i)-\beta_i)}{(\lambda+M-\beta_i)^2+\beta_i^2} \quad (30)$$

$$\frac{\partial \pi_i(t)}{\partial c_1} = \frac{(N-\lambda b_s)^2(\lambda+M-\beta_1)^2}{(\lambda+M)^3(E^2-F(E^2+1))} \cdot \left(\beta_i + \frac{\beta_i^2((\lambda+M-\beta_i)-\beta_i)}{(\lambda+M-\beta_i)^2+\beta_i^2} \right) \quad (31)$$

$$\frac{\partial q_1}{\partial c_1} = \frac{-(N-\lambda b_s)(\lambda+M-\beta_1)^2}{(\lambda+M)^2(E^2-F(E^2+1))} \quad (32)$$

$$\sum_{i=2}^n \frac{\beta_i(\lambda+M-\beta_i)((\lambda+M-\beta_i)-\beta_i)}{(\lambda+M-\beta_i)^2+\beta_i^2}$$

$$\frac{\partial \pi_1}{\partial c_1} = \frac{F\beta_1(\lambda+M-\beta_1)^2(N-\lambda b_s)^2}{(E^2-F(E^2+1))(\lambda+M)^3} - \frac{0.5\beta_1^2(N-\lambda b_s)^2}{(\lambda+M)^2} \quad (33)$$

由式(29)~(32)可得, 市场均衡下市场出清电价、第 i ($i=2, \dots, n$)个发电商的上网电量和收益对 c_1 的导数均大于零, 即这些市场要素均为 c_1 的递增函数, 而均衡状态下第一个发电商的上网电量对 c_1 的导数小于零, 即为 c_1 的递减函数。

式(33)右边的第一部分大于零, 表示 c_1 变化时通过引起市场出清电价相同趋势的变化, 使自身收益发生相同趋势的变化, 而第二部分小于零, 表示发电商可变成本的变化使自身收益呈相反趋势的变化, 导数性质决定于两种影响的综合作用。

2 发电侧市场均衡特性

2.1 需求价格特性对市场均衡的影响

根据式(4)所示的需求价格函数可以推导出:

$$\lambda = \frac{D}{P} \cdot \left(-\frac{\Delta D/D}{\Delta P/P} \right) \quad (34)$$

等式(34)右边括号内即为需求价格弹性的表达式。由式(34)可知, 当在需求价格曲线某一点上, 即 D 和 P 确定时, 需求价格弹性越大, 参数 λ 的值越大, 反之则越小。

由式(18)~(23)以及参数 $N(t)$ 和 λ 的经济意义可知, 市场出清电价、各发电商的上网电量和收益随着电力需求的增大而增大, 随着市场内电力需求价格弹性的增大而减小。不同电力需求和电力需求价格弹性组合下各市场要素如表1所示。

表1 不同电力需求价格特性下各市场要素的比较

Tab.1 Comparison of market factors under different

demand-price relationships

市场要素	HDLE	HDHE/LDLE	LDHE
市场出清电价	最高	居中	最低
各发电商上网电量	最大	居中	最小
各发电商收益	最多	居中	最少

注: H (High) 表示高; L (Low) 表示低; D (Demand)

代表电力需求; E (Elasticity) 代表电力需求价格弹性。如

HDLE 表示高电力需求低电力需求价格弹性, 其余依此类推。

在表1中, 市场出清电价、各发电商的上网电量和收益在高需求、低需求价格弹性组合下最高(大/多), 在低需求、高需求价格弹性组合下最低(小/少), 其他情况时居中。因此, 当电力需求较高和需求价格弹性较低的情况下, 会出现高电价, 不利于市场稳定和保障用户的利益。为避免这种情况, 可以通过推行需求侧管理和参与竞价等措施来提高电力需求弹性, 从而提高市场稳定性。

2.2 发电商成本对市场均衡的影响

为讨论发电成本对市场均衡的影响, 设计出两种发电商成本结构: 第一种为同源结构, 即所有发电商均为火电厂; 第二种为异源结构, 即第一个发电商为水电厂, 其他发电商为火电厂。假设除第一个发电商之外其他发电商的成本特性在两种结构下都相同, 第一个发电商成本特性差异表示为:

$$c_1^H < c_1^{TH}, \quad a_1^H > a_1^{TH} \quad (35)$$

式中: 上标“H”和“TH”分别表示水电厂和火电厂。式(35)表示, 当第一个发电商为水电厂时, 其可变成成本小于其为火电厂时的值, 其固定成本大于其为火电厂时的值。这种假设与实际相符。

从式(10)~(12)可以看出, 市场出清电价、自身上网电量以及其他发电商的上网电量和收益与第一个发电商的固定成本参数无关, 而且第一个发电商的收益是其固定成本参数的递减函数。

根据式(35), 结合式(29)~(33)及相关结论可得:

(1) 在同源结构下, 市场均衡下的市场出清电价、第 i ($i = 2, \dots, n$) 个发电商的上网电量和收益都高(大/多)于异源结构下的相应值, 第一个发电商的上网电量小于异源结构下的相应值。

(2) 相比同源结构, 异源结构时市场均衡下第一个发电商的收益受三个方面的影响: 首先, 水电厂可变成成本小于火电厂, 使自身发电收益具有增加趋势的同时也使市场出清电价有下降的趋势; 而市场出清电价的下降使第一个发电商的收益有下降的趋势; 另外, 水电厂的固定成本大于火电厂, 使第一个发电商的收益具有下降的趋势。两种结构下市场均衡时第一个发电商收益的差异取决于这三个方面的综合作用。

(3) 另一个角度可以看出, 当不同发电能源进入市场时, 水电相比火电更能有效降低市场出清电价, 但较高的固定成本不利于其进入市场。

3 算例分析

某日前市场包括三个发电商(IPP1~IPP3), 各发电商成本函数系数如表2所示。市场需求价格函数形式如式(4)所示, 其中电价和电量的单位分别为元/MWh 和 MWh。

表2 发电商发电特性参数

Tab.2 Generation parameters of IPPs

	$c_i / (\text{元}/(\text{MW})^2)$	$b_i / (\text{元}/\text{MW})$	$a_i / \text{元}$
IPP1	0.24	70	1450
IPP2	0.2	70	1700
IPP3	0.19	70	1800

首先分析不同需求价格特性下各市场要素的变化。不同需求价格特性下的市场出清电价、发电商(以IPP2为例)的电量和收益如图1所示。

从图1可以看出, 市场出清电价、IPP2的上网电量和收益的变化趋势相同, 即在固定的最大需求下均随着参数 λ 的增加而减小, 在某一固定参数 λ 值下均随最大需求的增大而增大。这些现象与式(18)~(23)以及其相关结论吻合。

以市场出清电价为例, 分析不同需求价格弹性组合下的差异。图1中, 市场出清电价曲线上的A、B、C、D点分别代表LDLE(低电力需求低需求价

格弹性)、LDHE、HDLE、HDHL 四种情况。在这四点,市场出清电价的大小顺序为 $P_C > P_B, P_D > P_A$, 即较高的电力需求和较低的电力需求弹性组合导致较高的电价,而较低的电力需求和较高的电力需求弹性组合造成较低的低价。分析图 1 中 IPP2 的上网电量和收益可得类似结论。这些结论与表 1 相符。

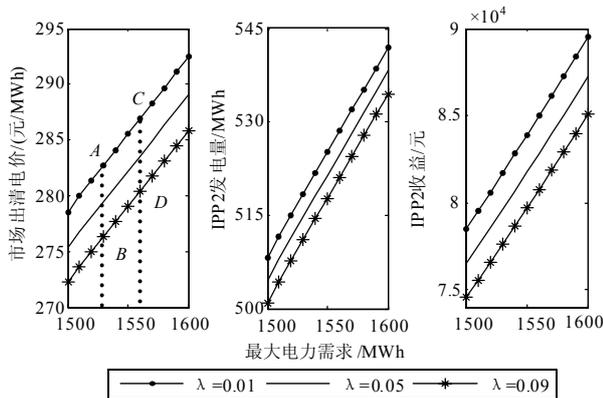


图 1 不同电力需求价格特性下的各种市场要素值

Fig.1 Market factors in equilibrium under different maximum demand and demand/load elasticity

假设表 2 中所示的各种参数为所有发电商均为火电厂时的值,即同源结构,与此相应,异源结构下的参数设计如下:第一个发电商的可变成本参数 c_1 和 a_1 分别为 0.15 (元/(MW)²) 和 $8\ 000$ (元),反映出水电厂与火电厂的发电成本特性差异;其他发电商的发电成本参数与表 2 中的相应参数相同。考虑需求价格弹性和电价范围的合理性,假设两种结构下需求价格函数均为 $D(P) = 1\ 950 - 0.01P$ 。根据以上条件,求解出两种结构下均衡时各种市场要素,具体如表 3 所示。

对比表 3 中两种结构下的市场出清电价可以看出,第一个发电商成本函数的变化导致异源结构下

表 3 不同发电商结构下市场均衡时的市场要素

Tab.3 Market clearing results on equilibrium under different power generation resource structures

市场要素	同源结构	异源结构
电价/(元/MWh)	341.15	302.26
IPP1 售电量/MWh	612.34	693.45
IPP1 收益($\times 10^4$ 元)	11.96	11.70
IPP2 售电量/MWh	660.67	619.86
IPP2 收益($\times 10^4$ 元)	13.38	10.39
IPP3 售电量/MWh	673.58	633.67
IPP3 收益($\times 10^4$ 元)	13.77	10.72
总和 售电量/MWh	1 946.59	1 946.98
总和 收益($\times 10^4$ 元)	39.11	32.81

的市场出清电价为 302.26 元/MWh, 小于同源结构下的电价,同时电价的下降导致市场总发电量增加。这些结果可以由式 (4) 和式 (30) 推导出。

在表 3 中,异源结构下市场均衡时 IPP2 和 IPP3 的上网电量和收益均小于同源结构下的相应值。这种差异与式 (29)~(31) 及其相关结论是相符的。与此相反,市场均衡时 IPP1 的上网电量在异源结构下大于同源结构,符合式 (32) 及其结论,这是因为 IPP1 可变发电成本减小,从而在竞价中具有更大优势。

此外,异源结构下市场均衡时 IPP1 的发电收益小于同源结构下的发电收益。这种差异表示,尽管水电厂在可变发电成本上比火电厂具有优势,但固定成本是其获得收益的巨大负担。

4 结论

本文通过求解均衡状态下市场出清电价、发电商上网电量和发电收益及其相关导数,并确定所有导数的性质,归纳了需求价格特性对市场均衡的影响,并结合两种不同发电商结构分析了发电商成本特性对市场均衡的影响,主要结论如下:

1) 市场均衡下的市场出清电价、各发电商的上网电量和收益为最大电力需求的递增函数和需求价格弹性的递减函数,在较高的电力需求和较低需求价格弹性组合下数值较大,反之则较小;

2) 市场均衡下的市场出清电价、其他发电商的上网电量和收益随某一发电商可变成本的增大而增大,该发电商的上网电量随自身可变成本的增大而减小,其收益的变化规律由自身可变成本变化引起的两种相反效果的影响综合决定;

3) 对比两种不同发电商结构的情况可知,水电厂降低市场出清电价和增加市场总发电量的效果比火电厂好,但较高的固定成本提高了其进入市场的“门槛”,是其获得收益的巨大负担。

参考文献

[1] Ross Baldick, Ryan Grant, Edward Kahn. Theory and applications of linear supply function equilibrium in electricity markets[J]. Journal of Regulatory Economics, 2004, 25 (2): 143-167.

[2] Ross Baldick. Electricity market equilibrium models: the effect of parameterization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (4): 1170-1176.

[3] LIU You-fei, NI Yi-xin, Wu F F. Impacts of suppliers' learning behavior on market equilibrium under repeated linear supply function bidding[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153 (1): 44-50.

- [4] LIU You-fei, NI Yi-xin, Wu F F. Existence, uniqueness, stability of linear supply function equilibrium in electricity markets[C]. //Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2004: 249-254.
- [5] XU Lin, YU Yi-xin. Transmission constrained linear supply function equilibrium in power markets: method and example[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 3 (3) : 1349-1354.
- [6] YUAN Zhi-qiang, LIU Dong, JIANG Chuan-wen. Analysis of equilibrium about bidding strategy of suppliers with future contracts[J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48 (3) : 1016-1020.
- [7] NIU Hui, Ross Baldick, ZHU Gui-dong. Supply function equilibrium bidding strategies with fixed forward contracts[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (4) : 1859-1867.
- [8] 张少华, 王晔, 李渝曾. 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, 27 (21) : 17-21.
ZHANG Shao-hua, WANG Xian, LI Yu-zeng. Piecewise linear supply function equilibrium model for power generation markets with forward contracts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (21) : 17-21.
- [9] 王瑞庆, 李渝曾, 张少华. 考虑金融期权的电力市场供应函数均衡分析[J]. 华东电力, 2007, 35 (12) : 6-8.
WANG Rui-qing, LI Yu-ceng, ZHANG Shao-hua. Supply function equilibrium in electricity markets with financial option contracts[J]. East China Electric Power, 2007, 35 (12) : 6-8.
- [10] Ettore Bompard, Ma Yuchao, Roberto Napoli, et al. The demand elasticity impacts on the strategic bidding behavior of the electricity producers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22 (1) : 188-197.
- [11] 胡军峰, 李春杰, 赵会茹, 等. 基于博弈论的电力需求价格弹性与发电市场均衡关系[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (1) : 89-94.
HU Jun-feng, LI Chun-jie, ZHAO Hui-ru, et al. The relationship between price elasticity of demand and generation market equilibrium analysis based on game theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (1) : 89-94.
- [12] 张晓东, 高波. 基于供给函数均衡模型的区域电力现货市场模拟分析[J]. 电网技术, 2005, 29 (13) : 80-84.
ZHANG Xiao-dong, GAO Bo. Simulation of a real spot market based on supply function equilibrium model[J]. Power System Technology, 2005, 29 (13) : 80-84.
- [13] 宋宏坤, 汤玉东, 唐国庆, 等. 考虑需求侧竞价的发电公司竞价策略分析[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (6) : 43-47.
SONG Hong-kun, TANG Yu-dong, TANG Guo-qing, et al. Analysis of power generation enterprise bidding strategies considering demand-side bidding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (6) : 43-47.
- [14] 陈晓明, 余贻鑫, 许琳. 计及输电约束和需求方投标的线性供给函数均衡点的求解算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (8) : 17-23.
CHEN Xiao-ming, YU Yi-xin, XU Lin. Linear supply function equilibrium with demand side bidding and transmission constrain[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (8) : 17-23.

收稿日期: 2009-12-13; 修回日期: 2010-04-15

作者简介:

周建中 (1959-), 男, 教授, 研究方向为人工智能与电力系统自动化; E-mail: prof.zhou.hust@263.net

李清清 (1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail: kaiser_lee@yahoo.cn

李超顺 (1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为人工智能。

(上接第 81 页 continued from page 81)

- LU Chao, CUI Wen-jin, LI Hong-jun, et al. Problems and solutions of transient voltage stability load of China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 9-13.
- [6] 王仲鸿, 姜齐荣, 沈东. 关于新型静止无功发生器模型参数及暂态控制模型选择的讨论[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(24): 43-45.
WANG Zhong-hong, JIANG Qi-rong, SHEN Dong. Determination of the model and parameters of the static reactive compensation in controller designing[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (24): 43-45.
- [7] 刘隽, 李兴源, 汤广福. SVC 电压控制与阻尼调节间的相互作用机理[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 12-17.
LIU Jun, LI Xing-yuan, TANG Guang-fu. Interrelations between SVC voltage control and damping control[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 12-17.
- [8] 常勇, 徐政. SVC 广域辅助控制阻尼区域间低频振荡[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 40-46.
CHANG Yong, XU Zheng. SVC supplementary controller based on wide area signals to enhance damping of inter-area oscillation[J]. Transactions of China Electrical Society, 2006, 21(12): 40-46.

收稿日期: 2010-04-16; 修回日期: 2010-06-29

作者简介:

丁理杰 (1981-), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定及控制. E-mail: ding_lj@163.com