

DOI: 10.7667/PSPC170250

多类型售电公司共存下竞价售电的市场均衡研究

石帮松, 张靖, 李博文, 何宇

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 通过引入竞争, 电力市场改革将打破市场垄断, 逐步形成发、输、配、售电分开的电力市场运营模式, 在该模式下售电侧市场中必然会存在多类型售电公司竞价售电问题。针对该问题研究了多类型售电公司竞价售电模型, 该模型以各售电公司获得最大收益为目标, 根据各自售电公司的售电侧电力市场结算电价微增响应猜测, 以此来调整自身的竞价策略。通过算例仿真分析了无弹性和有弹性两种售电侧市场模式下的市场均衡。仿真结果验证了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 电力市场改革; 售电侧市场; 竞价售电; 微增响应猜测; 市场均衡

Market equilibrium study on multiple types of electric power retailers bidding

SHI Bangsong, ZHANG Jing, LI Bowen, HE Yu

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: By introducing competition, the electricity market reform breaks the natural monopoly of the power system. The generation, transmission, distribution and sales separated electricity market will be formed gradually. Under this situation, there must be multiple types of electric power retailers existing in the market. Multiple types of retailers bidding models for retail electricity market are studied. In order to obtain the most profit, every electric power retailer regulates bidding strategy of their own according to its conjectural variation of clearing price of retail electricity market. The market equilibrium for both the inelastic mode and the elastic mode are studied by numerical simulation. The results show the feasibility and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51007009) and Guizhou Provincial Science and Technology Fund (No. (2016) 1036).

Key words: power market reform; retail electricity market; sale bidding; conjectural variation; power market equilibrium

0 引言

改革后的电力市场运营一直是倍受关注的课题^[1-5]。改革的目的是引入竞争, 打破电力市场的垄断性, 逐步形成发、输、配、售电分开的电力市场运营模式^[6-7]。在当前已经实现厂网分开和发电自由准入的基础上, 将可竞争的售电环节引入市场竞争是深化电力市场改革的基本内容^[8-9]。在发、输、配、售电分开的市场运营模式下, 输配电环节具有自然垄断属性^[6], 应在政府部门监管下使输配电公司成为服务型企业, 为电力市场交易参与者提供无歧视的输配电服务。在引入竞争的售电侧市场中售电公

司可以分为三种类型: 第一类是电网企业售电公司; 第二类是社会资本投资增量配电网, 拥有配电网运营权的售电公司; 第三类是独立售电公司, 不拥有配电网经营权。

多类型售电公司竞价售电是实现深化售电侧市场改革的重要环节, 但是目前的文献对发电商竞价上网问题研究较多, 而对多类型售电公司竞价售电开展深入研究较少。文献[10]基于机会约束规划方法框架, 构造了计及风险的供电公司最优购电决策的数学模型, 并对其求解。文献[11]研究了单一电能供应商通过参加长期合同市场及短期零售市场交易, 代替用户承担电力市场上电价波动的风险, 向用户提供较为稳定的供电价格, 并从中赚取差价, 但是其电价在交易前即可确定。文献[12]分析了批发竞争电力市场模式下发电商和供电商竞价模型,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51007009); 贵州省科学技术基金资助项目(〔2016〕1036)

推导出了完全信息情况下发电商和供电商最优竞价策略的解析解。上述工作对电力市场运营模式均进行了有益的探索, 但都未考虑在发、输、配、售电分开的电力市场运营模式下, 售电公司为了追求自身利益最大化, 必然面临竞价售电问题。

电力市场运营过程是一个多方互动、博弈的动态过程^[13], 在该过程中各售电公司以自身利润最大化为目标, 不断优化调整投标策略。本文研究了多类型售电公司竞价售电模型, 售电公司根据自身的售电侧市场结算电价微增响应猜测来调整竞价策略, 最终达到售电侧市场均衡, 通过算例仿真模拟无弹性和有弹性售电侧市场, 验证了所提模型的正确性。

1 售电公司竞价售电模型及竞价售电策略

1.1 售电公司竞价售电模型

以同一供电营业区内售电公司为研究对象, 假设该营业区内有 n 个独立的售电公司, 但为避免重复投资和资源浪费, 只能有一家售电公司拥有该供电营业区的配电网经营权, 该公司除了可以从事市场化售电业务外, 还需向配电网区域内的其他售电公司提供无歧视的电能输送服务, 并有权收取一定的服务费用。

各售电公司在购得电力后, 需向用户进行电量销售。本文考虑售电侧市场用户需求响应, 假设负荷电量需求与售电结算电价数学上呈反比例关系, 设曲线为 $D(p,t)=\mu-\lambda p(t)$, 其中 $D(p,t)$ 和 $p(t)$ 为 t 时段售电侧市场负荷电量需求和结算电价, μ 为负荷电量需求常数, λ 为市场弹性系数。

在 n 个独立的售电公司中, 本文假设第 n 家售电公司拥有配电网经营权, 而前 $n-1$ 家售电公司无配电网经营权。无配电网经营权的售电公司只能通过拥有配电网经营权的售电公司进行电能输送。在 t 时段售电公司 i ($i=1,2,\dots,n-1,n$) 的收益为

$$\max \pi_i(p,t) = \begin{cases} S_{iG}(p,t) - I_{iG}(p,t) - I_{iY}(p,t) - I_{iD}(p,t) - I_{iW}(p,t) - I_{iF}(p,t), & i=1,2,\dots,n-1 \\ S_{iG}(p,t) - I_{iG}(p,t) - I_{iY}(p,t) - I_{iD}(p,t) - I_{iW}(p,t) + S_{iH}(p,t) + S_{iF}(p,t), & i=n \end{cases} \quad (1)$$

$$S_{iG}(p,t) = p(t)q_i(p,t) \quad (2)$$

$$I_{iG}(p,t) = R_i w_i(p,t) \quad (3)$$

$$I_{iY}(p,t) = d_i w_i(p,t) + c_i w_i^2(p,t) \quad (4)$$

$$I_{iD}(p,t) = F q_i(p,t) \quad (5)$$

$$I_{iW}(p,t) = \alpha w_i(p,t) \quad (6)$$

$$I_{iF}(p,t) = \begin{cases} \beta q_i(p,t), & i=1,2,\dots,n-1 \\ 0, & i=n \end{cases} \quad (7)$$

$$S_{iF}(p,t) = \begin{cases} 0, & i=1,2,\dots,n-1 \\ \sum_{j=1}^{n-1} I_{jF}, & i=n \end{cases} \quad (8)$$

$$S_{iH}(p,t) = \begin{cases} 0, & i=1,2,\dots,n-1 \\ \sum_{j=1}^{n-1} I_{jD}, & i=n \end{cases} \quad (9)$$

$$q_i(p,t) = (1 - \eta_i) w_i(p,t) \quad (10)$$

式中: $S_{iG}(p,t)$ 为 t 时段售电公司 i 的售电收益; $I_{iG}(p,t)$ 为 t 时段售电公司 i 的购电成本; $I_{iY}(p,t)$ 为 t 时段售电公司 i 的运营成本; $I_{iD}(p,t)$ 为 t 时段售电公司 i 的配电网建设成本分摊; $I_{iW}(p,t)$ 为 t 时段售电公司 i 支付的配电网运行维护费用; $I_{iF}(p,t)$ 为 t 时段无配电网经营权的售电公司支付给有配电网经营权的售电公司的电能输送服务费; $S_{iH}(p,t)$ 为 t 时段有配电网经营权的售电公司的配电网建设成本回收; $S_{iF}(p,t)$ 为 t 时段有配电网经营权的售电公司的电能输送服务收益; $q_i(p,t)$ 为 t 时段售电公司 i 向终端用户的售电量; R_i 为 t 时段售电公司 i 的购电电价; $w_i(p,t)$ 为 t 时段售电公司 i 的购电电量; d_i 和 c_i 为售电公司 i 的运营成本系数, 公司的管理水平将直接影响其系数的大小; F 为配电网建设固定成本在单位售电量上的分摊; α 为配电网运行维护费用系数; β 为有配网经营权的售电公司提供电能输送服务费用系数; η_i 为售电公司 i 电能输送的网损率。

参照文献[14]发电侧固定成本分摊原理, 由配电网通道能输送的最大售电量求出配电网建设固定成本在单位售电量上的分摊为

$$F = G \cdot \sigma / (365 \cdot T \cdot Q) \quad (11)$$

式中: G 为配电网建设固定成本; σ 为经营期内年金系数; T 为一天划分的时段数; Q 为配电网通道能向用户终端输送的最大售电量。

此外, 在 t 时段售电侧市场满足式(12)。

$$D(p,t) = \sum_{i=1}^n q_i(p,t) = \mu - \lambda p(t) \quad (12)$$

式中: 第一部分为电量供需平衡约束; 第二部分为用户需求对售电结算电价 $p(t)$ 的响应。

1.2 售电公司竞价售电策略

根据文献[15], 优化问题式(1)的最优解应该满足一阶优化条件:

$$\frac{\partial \pi_i(p,t)}{\partial p(t)} = 0 \quad (i=1,2,\dots,n-1,n) \quad (13)$$

对于无配电网经营权的售电公司 k ($k=1,2,\dots, n-1$), 联立以上公式, 将式(1)代入式(13)并进行推导, 可得到式(14)。

$$q_k(p,t) + [p(t) - \frac{R_k + d_k + \alpha}{1 - \eta_k} - F - \beta - \frac{2c_k q_k(p,t)}{(1 - \eta_k)^2}] \cdot \frac{\partial q_k(p,t)}{\partial p(t)} = 0 \quad (14)$$

又有:

$$\frac{\partial q_k(p,t)}{\partial p(t)} = \frac{\partial D(p,t)}{\partial p(t)} - \frac{\partial [\sum_{j=1, j \neq k}^n q_j(p,t)]}{\partial p(t)} \quad (15)$$

$$\frac{\partial D(p,t)}{\partial p(t)} = -\lambda \quad (16)$$

假设把售电公司 k 所有竞争对手看成是一个虚拟的竞争对手, 其售电量为 $q_{-k}(p,t) = \sum_{j=1, j \neq k}^n q_j(p,t)$, 则该售电公司 k 关于虚拟竞争对手的售电侧市场结算电价微增响应猜测(以下简称微增响应猜测)可表示为^[16]

$$f_k(t) = \frac{\partial q_{-k}(p,t)}{\partial p(t)} \quad (17)$$

式中, $f_k(t)$ 的值可以根据售电市场历史信息估计^[17]。

联立式(14)一式(17)可以推出

$$q_k(p,t) + [p(t) - \frac{R_k + d_k + \alpha}{1 - \eta_k} - F - \beta - \frac{2c_k q_k(p,t)}{(1 - \eta_k)^2}] \cdot [-\lambda - f_k(t)] = 0 \quad (18)$$

式(18)可化解为

$$q_k(p,t) = \phi_k(p,t) + \varphi_k(p,t)p(t) \quad (19)$$

式中:

$$\begin{cases} \phi_k(p,t) = \frac{-[\frac{R_k + d_k + \alpha}{1 - \eta_k} + F + \beta] \cdot [f_k(t) + \lambda]}{1 + \frac{2c_k}{(1 - \eta_k)^2} \cdot [f_k(t) + \lambda]} \\ \varphi_k(p,t) = \frac{f_k + \lambda}{1 + \frac{2c_k}{(1 - \eta_k)^2} \cdot [f_k(t) + \lambda]} \end{cases}$$

即售电公司 k 的优化投标售电函数曲线必须满足式(19)的关系。

同理, 按照以上推导过程, 则有配电网经营权的售电公司投标售电函数曲线必须满足式(20)的关系。

$$q_n(p,t) = \phi_n(p,t) + \varphi_n(p,t)p(t) \quad (20)$$

式中:

$$\begin{cases} \phi_n(p,t) = \frac{-[\frac{R_n + d_n + \alpha}{1 - \eta_n} + 2F + \beta] \cdot [f_n(t) + \lambda] + \lambda \cdot (F + \beta)}{1 + \frac{2c_n}{(1 - \eta_n)^2} \cdot [f_n(t) + \lambda]} \\ \varphi_n(p,t) = \frac{f_n + \lambda}{1 + \frac{2c_n}{(1 - \eta_n)^2} \cdot [f_n(t) + \lambda]} \end{cases}$$

分析该函数曲线可知, 售电公司 i 的优化投标电量将直接依赖于购电批发电价 R_i 、自身运营成本系数 d_i 和 c_i 、配电网运行维护费用系数 α 、配电网建设固定成本在单位售电量的分摊 F 、电能输送服务费用系数 β 、负荷电量需求曲线系数 λ 、电能输送的网损率 η_i 及它自身的微增响应猜测 $f_i(t)$ 。

根据式(19)、式(20)分析可知, 如果售电公司的微增响应猜测为常数, 则其优化投标售电函数曲线式(19)、式(20)为线性; 如果微增响应猜测随售电侧市场结算电价 $p(t)$ 而变, 则其优化投标售电函数曲线为非线性。

2 售电侧市场均衡分析

假设市场采取统一价格结清机制, 如果无配电网经营权的售电公司为在 t 时段最大化自身收益按照式(19)优化投标售电函数曲线进行投标, 有配电网经营权的售电公司按照式(20)进行投标, 容易得出售电侧市场将达到如下均衡:

$$\begin{cases} p^*(t) = \frac{\mu - \sum_{i=1}^n \phi_i(p^*, t)}{\sum_{i=1}^n \varphi_i(p^*, t) + \lambda} \\ q_i^*(p^*, t) = \phi_i(p^*, t) + \varphi_i(p^*, t) \cdot p^*(t) \end{cases} \quad (21)$$

由以上分析可知, 售电公司各时段采用的微增响应猜测 $f_i(t)$ 为常数时, 式(19)和式(20)均为线性, 决定供给函数形状的参量 ϕ_i 和 φ_i 与售电市场结算电价 $p(t)$ 无关, 因而式(21)不存在多解, 即不存在多个市场均衡。如果售电公司在该时段采用的微增响应猜测 $f_i(t)$ 随 $p(t)$ 而变, 式(19)和式(20)均为非线性, 则式(21)可能存在多解, 即存在多个市场均衡。为简化分析, 本文中(19)和(20)均采用线性投标售电函数。

3 仿真结果与分析

假设所研究的市场中有三个售电公司, 售电公司一、二无配网经营权, 售电公司三有配网经营权。每个售电公司参与 t 时段现货售电侧市场竞价售

电, 初始微增响应猜测为 $[f_1(t) f_2(t) f_3(t)] = [44 \ 80 \ 22]$, 其相应部分参数在表 1 中列出。将一天划分的时段数 $T = 24$, 即计算时段为 1 h, 售电电量的单位用 MW 表示。

表 1 售电公司运营参数

售电公司	d_i	c_i	R_i	$\eta_i/\%$
售电公司一	2.6	0.0086	30.7	5.6
售电公司二	3.2	0.0095	30.4	5.2
售电公司三	2.4	0.0075	30	5.8

注: d_i 和 R_i 的单位为 $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$; c_i 的单位为 $\$/(\text{MW}^2\cdot\text{h})$ 。

3.1 无弹性售电侧市场售电均衡

算例 1: 模拟 t 时段无弹性售电侧市场运营。

当各售电公司竞争的市场为无弹性市场即 $\lambda = 0$, 假设在 t 时段负荷电量需求 $D(t)$ 为 1500 MW。 t 时段售电侧市场结算电价均衡迭代计算过程见图 1, 即 t 时段售电侧市场结算电价为 54.59 $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$, 各售电公司的迭代计算过程见图 2, 各售电公司均衡结果见表 2 所示。

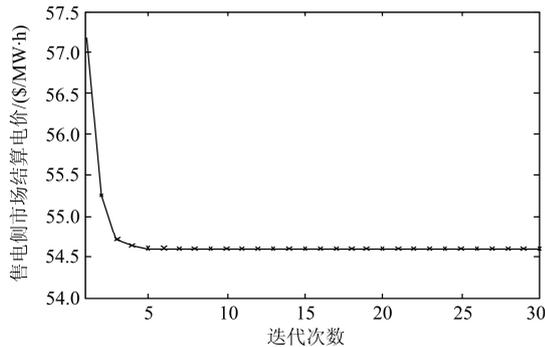


图 1 算例 1 售电侧市场结算电价均衡过程

Fig. 1 Equilibrium process of retail electricity market clearing price in case 1

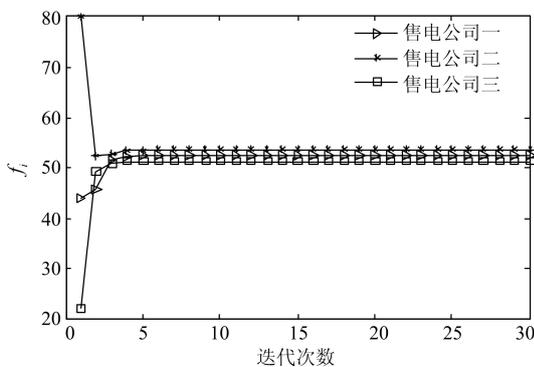


图 2 算例 1 中各售电公司的微增响应猜测均衡过程

Fig. 2 Equilibrium process of conjectural variation of individual electric power retailer in case 1

表 2 算例 1 售电侧市场均衡结果

Table 2 Equilibrium results of retail electricity market in case 1

算例 1	售电公司一	售电公司二	售电公司三	合计
f_i	52.56	53.54	51.20	
售电量	494.35	471.69	533.96	1500
收益	26 988.00	25 750.75	29 150.31	81 889.06
净利润	7027.95	6525.13	8517.63	22 070.71

注: 售电量的单位为 $\text{MW}\cdot\text{h}$; 售电利润和净利润单位均为 $\$$ 。

3.2 有弹性售电侧市场售电均衡

算例 2: 模拟 t 时段有弹性售电侧市场运营。

当各售电公司竞争的市场为有弹性市场, 假设 t 时段负荷电量需求曲线为 $D(t) = 1170 - 3.2p(t)$ 。 t 时段售电侧市场结算电价均衡迭代计算过程见图 3, 即 t 时段售电侧市场结算电价为 48.05 $\$/(\text{MW}\cdot\text{h})$, 各售电公司的微增响应猜测迭代计算过程见图 4, 各售电公司均衡结果见表 3 所示。

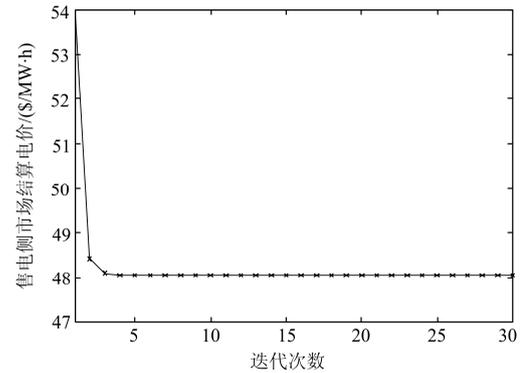


图 3 算例 2 售电侧市场结算电价均衡过程

Fig. 3 Equilibrium process of retail electricity market clearing price in case 2

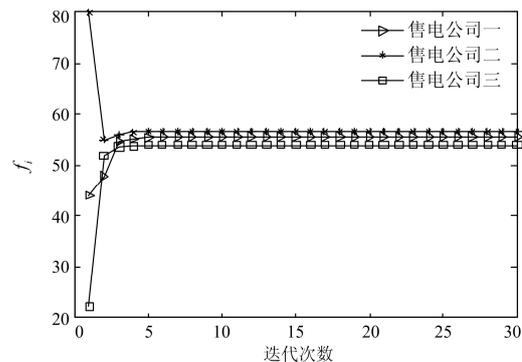


图 4 算例 2 中各售电公司的微增响应猜测均衡过程

Fig. 4 Equilibrium process of conjectural variation of individual electric power retailer in case 2

图 1、图 2、表 2 和图 3、图 4、表 3 分别为算例 1 和算例 2 的仿真结果。对比仿真结果可以发现, 无论是在有弹性或者无弹性的售电侧市场中, 结算

电价、各售电公司猜测以及各售电公司利润均随着负荷电量需求不同而不同, 负荷电量需求大则相应结算电价以及各售电公司利润也高, 反之结算电价以及各售电公司利润就低。进一步可以发现, 在有弹性市场中, 通过弹性系数调整电量供需平衡, 降低了电量需求, 进而降低了结算电价, 负荷的弹性需求使得各售电公司利润降低。

表3 算例2 售电侧市场均衡结果

Table 3 Equilibrium results of retail electricity market in case 2

算例2	售电公司一	售电公司二	售电公司三	合计
f_i	55.46	56.57	53.92	
售电量	341.15	323.07	374.54	1038.76
收益	16 390.82	15 522.33	17 994.82	49 907.98
净利润	3120.82	2861.62	4022.67	10 005.11

注: 售电量的单位为 MW·h; 售电利润和净利润单位均为\$。

4 结论

本文建立了在售电侧市场中存在多个售电公司竞价售电模型, 各售电公司通过自身售电公司的售电侧市场结算电价微增响应猜测, 来调整自身的竞价策略, 以获得最大利润。利用该模型对无弹性和有弹性两种售电侧市场模式下市场运营进行了模拟, 经过仿真分析, 得到以下结论。

1) 本文所提出的多售电公司竞价售电模型对于无弹性和有弹性两种售电侧市场均是可行和有效的。

2) 售电侧市场中负荷电量需求大, 相应的结算电价以及各售电公司利润就高, 反之结算电价以及各售电公司利润就低。

3) 在有弹性市场模式下, 各售电公司在竞价售电的同时, 通过弹性系数调整电量供需平衡, 降低了电量需求, 进而降低了结算电价。负荷的弹性需求使得各售电公司利润降低。

参考文献

- [1] 白杨, 李昂, 夏清. 新形势下电力市场营销模式与新型电价体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 10-16.
BAI Yang, LI Ang, XIA Qing. Electricity business marketing modes in the new environment and new electricity pricing systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 10-16.
- [2] 赵飞, 徐敏杰, 周渝慧. 一种由电网公司组织运营的金融输电权市场模式[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(20): 71-77.
ZHAO Fei, XU Minjie, ZHOU Yuhui. A new operation mode of financial transmission right market organized by
- grid corporation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(20): 71-77.
- [3] 白杨, 谢乐, 夏清, 等. 中国推进售电侧市场化的制度设计与建议[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 1-7.
BAI Yang, XIE Le, XIA Qing, et al. Institutional design of Chinese retail electricity market reform and suggestions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 1-7.
- [4] 朱文昊, 谢品杰. 基于 CVaR 的峰谷分时电价对供电公司购电组合策略影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 16-21.
ZHU Wenhao, XIE Pinjie. Influence analysis of CVaR model based TOU electricity price on portfolio strategy[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 16-21.
- [5] 谢青洋, 应黎明, 祝勇刚. 基于经济机制设计理论的电力市场竞争机制设计[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1709-1716.
XIE Qingyang, YING Liming, ZHU Yonggang. Competitive power market mechanism design based on the designing economic mechanisms theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1709-1716.
- [6] HOGAN S, MEADE R. Vertical integration and market power in electricity markets[R]. Wellington, New Zealand: New Zealand Institute for the Study of Competition and Regulation, 2009.
- [7] 姚建刚, 秦红三, 王路, 等. 电力市场中输电与配电分开的方略初探[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 70-73.
YAO Jiangang, QIN Hongsan, WANG Lu, et al. A preliminary study on approach of separation power transmission and distribution in electricity market[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 70-73.
- [8] O'MAHONEY A, DENNY E. Electricity prices and generator behavior in gross pool electricity markets[J]. Energy Policy, 2013, 63: 628-637.
- [9] IMRAN K, KOCKAR I. A technical comparison of wholesale electricity markets in North America and Europe[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108: 59-67.
- [10] 张钦, 王锡凡, 王建学. 需求侧实时电价下供电商购售电风险决策[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 22-27.
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue. Electricity purchasing and selling risk decision for power supplier under real-time pricing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 22-27.
- [11] 周明, 李庚银, 严正, 等. 考虑备用需求和风险的供电企业最优购电计划[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 33-38.
ZHOU Ming, LI Gengyin, YAN Zheng, et al. Optimal

- electricity procurement schedule for load service entities incorporating with reserve and rises[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(3): 33-38.
- [12] 王秀丽, 周鹏, 王锡凡. 发/供电公司市场均衡及竞价策略[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(6): 6-10.
WANG Xiuli, ZHOU Peng, WANG Xifan. Market equilibrium and bidding strategies of generation distribution companies[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(6): 6-10.
- [13] 李刚, 刘继春, 魏震波, 等. 含分布式电源接入的市场多主体博弈分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(19): 1-9.
LI Gang, LIU Jichun, WEI Zhenbo, et al. Analysis of game among multi-agents in electrical power market with integration of distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(19): 1-9.
- [14] 李俊, 刘俊勇, 谢连芳, 等. 发电侧与供电侧分时电价动态博弈联动研究[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(4): 16-19.
LI Jun, LIU Junyong, XIE Lianfang, et al. Dynamic game linkage of TOU pricing between generating side and retail side[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(4): 16-19.
- [15] DAY C J, HOBBS B F, PANG J. Oligopolistic competition in power networks: a conjectured supply function approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2002, 17(3): 597-607.
- [16] 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): 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*, 2003, 23(12): 23-27.
- [17] GARIA-ALCALDE A, VENTOSA M, RIVIER M, et al. Fitting electricity market models: a conjectural variations approach[C] // *Proceedings of 14th Power System Computation Conference*, June 24-28, 2002, Seville, Spain.

收稿日期: 2017-02-23; 修回日期: 2017-05-21

作者简介:

石帮松(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: bangsong2014@163.com

张靖(1979—), 男, 通信作者, 教授, 博士, 研究方向为电力系统分析、稳定和控制。E-mail: zhangjing@gzu.edu.cn

(编辑 周金梅)