

# 考虑期权合约的电力市场古诺-纳什均衡分析

王瑞庆, 李渝曾, 张少华

(上海大学自动化系, 上海市 闸北区 200072)

## Analysis of Cournot-Nash Equilibrium for Electricity Markets Considering Options Contracts

WANG Rui-qing, LI Yu-zeng, ZHANG Shao-hua

(Department of Automation, Shanghai University, Zhabei District, Shanghai 200072, China)

**ABSTRACT:** Option is an important financial instrument for generators developing strategic bidding and evading market risk. At present, investigation on options mainly focuses on its risk aversion behavior, yet there are a few literatures to investigate its effect on generators' strategic bidding. A two-stage Cournot equilibrium model considering power options contracts is developed and analytical formulas for market equilibrium are presented in this paper. The results show that the existence of options accelerates market competition and mitigates market power abuse of generators, and that in order to retain higher spot price and stable payoff, generators are interested in holding high volatility of spot price.

**KEY WORDS:** electricity markets; options; Cournot model; Nash equilibrium; game theory

**摘要:** 期权是发电商进行策略性竞价和规避市场风险的重要金融工具, 目前的研究主要集中在期权的风险规避功能, 关于期权对发电商竞价策略的影响研究甚少。该文建立了考虑电力期权的两阶段古诺博弈模型, 给出了市场均衡的解析解, 结果表明期权的存在增强了电力市场的竞争, 在一定程度上抑制了发电商的市场力滥用, 为保持较高的现货电价和稳定的收益, 发电商有兴趣维持现货电价的高波动性。

**关键词:** 电力市场; 期权; 古诺模型; 纳什均衡; 博弈论

## 0 引言

20 世纪 90 年代以来, 许多国家逐渐在电力工业中引入竞争机制, 以便打破垄断、促进资源的合理配置、实现社会效益最大化。这些努力导致了电力工业的市场化, 促进了电力市场的形成, 但由于电能不能存储, 电力工业进入壁垒高, 存在输电约

束和电能损耗的特性, 使得电力市场更接近于寡头垄断市场。电力工业的市场化, 使发电商面临着前所未有的价格波动风险, 因此如何制定竞争策略、规避风险、最大化企业效益成为各个市场主体关心的主要问题。

为规避市场风险, 远期合约、期货合约和期权等金融衍生产品逐步引入了电力市场, 这些金融衍生产品对电力市场效率和发电商竞价策略的影响成为了近几年国内外的热门研究课题。文献[1]在比较各种研究方法后, 认为较有实用价值的方法是预测市场统一出清价和根据市场上可获取的信息估计其他发电商的报价行为。目前的研究主要集中在考虑远期和期货合约时的电力市场均衡及发电商的竞价策略<sup>[2-8]</sup>, 而对于期权在电力市场中的应用研究主要集中在期权的定价及其风险规避功能<sup>[9-14]</sup>, 关于期权对市场均衡和发电商策略行为影响的研究还不多见。文献[15]基于发电商期望收益最大化, 构造了考虑期权时发电商的最佳供应函数, 但该文提出的方法不能用来求解市场均衡。文献[16]指出当发电商只出售看涨期权或购买看跌期权时, 市场存在纯策略纳什(Nash)均衡, 并给出了利用间隙理论(gap theorem)求解电力市场均衡的方法。文献[17]假设发电商可准确预测现货电价, 基于两阶段古诺(Cournot)博弈模型研究了寡头市场中发电商的策略行为, 结果表明期权可在一定程度上提高市场效率、抑制发电商的市场力滥用。

本文在假设电力市场为 Pool Co、发电商具有完全信息、现货电价不确定的基础上, 基于两阶段 Cournot 博弈模型, 研究了期权对电力市场效率、发电商竞价策略的影响。算例分析表明, 发电商有激励进入期权市场, 期权的存在降低了现货市场电

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50377023); 上海市教委科技发展基金项目(05AZ28)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (50377023) and the Development Foundation of Shanghai Municipal Education Commission (05AZ28).

价, 期权对电力市场的作用要强于远期合同。

## 1 基本假设

描述寡头垄断市场中市场主体博弈行为的常用方法主要有Cournot模型和供应函数模型。供应函数模型可较好地描述发电商在现货市场的竞争行为, Cournot模型的结果是供应函数模型的上限<sup>[1]</sup>, 但供应函数模型求解困难, 为了得到均衡解, 不得不作过多的假设。当发电商出售的合约电量占其发电出力的比例较大时, 发电商的策略行为更加接近于产量竞争, 且Cournot模型较易求解<sup>[4]</sup>。鉴于Cournot模型的上述特点, 本文采用两阶段Cournot博弈模型来描述发电商在期权和现货市场中的策略行为、分析期权对电力市场均衡的影响。模型的第1阶段为出售期权阶段, 各发电商在期权市场以Cournot方式出售欧式看涨期权, 即在假设竞争对手出售的期权电量给定的前提下各发电商同时决策自己的期权电量。模型的第2阶段为现货市场竞争阶段, 各发电商在期权电量给定的前提下按Cournot方式同时决策自己的发电出力。在第二阶段开始前, 各发电商可通过市场获悉其竞争对手出售的期权电量(即假设各发电商具有完全信息)。

考虑一个仅由期权市场和现货市场组成、按Pool Co方式运作的电力市场, 市场中存在 $n$ 个按Cournot方式竞争的发电商, 竞标的有效时间为单个时段。设各发电商的发电量不足以决定市场统一出清价, 但对市场统一出清价具有相当的影响力, 且各发电商在现货市场和期权市场中均没有相互勾结行为。

设该竞标时段的需求不确定, 现货市场电价可以表示为市场逆需求函数加上一个随机波动, 若设市场逆需求函数具有线性形式, 则现货市场电价 $\lambda$ 可表示为<sup>[2]</sup>

$$\lambda = r - sq + \varepsilon = r - s \sum_{i \in N} q_i + \varepsilon \quad (1)$$

式中:  $\lambda$ 为现货市场电价;  $N$ 为全体发电商的集合;  $q = \sum_{i \in N} q_i$ 为各发电商的发电量之和;  $r$ 和 $s$ 均为大于零的常数;  $s$ 反映了用户对电价变化的需求弹性;  $\varepsilon$ 为均值为0、方差为 $\sigma^2$ 的正态分布, 即 $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$ , 其累积分布函数和概率密度函数分别用 $\Phi_\varepsilon(x)$ 和 $\varphi_\varepsilon(x)$ 表示。

各发电商可为该竞标时段的售电向供电公司或用户出售欧式看涨期权(call options), 期权敲定价格 $f$ 为外生变量, 期权价格 $F$ 由市场无套利原则确

定。设该竞标时段发电商 $i$ 在期权市场上以期权价格 $F$ 出售电量为 $k_i$ 、敲定价格为 $f$ 的欧式看涨期权, 该期权赋予合约持有人在期权到期日以敲定价格 $f$ 购买 $k_i$ 电量的权力。在期权到期日, 若现货市场电价 $\lambda$ 高于期权敲定价格 $f$ , 期权将被执行, 发电商 $i$ 退还期权合约持有者价差 $k_i(\lambda - f)$ , 若 $\lambda$ 低于 $f$ , 期权自动失效。因此发电商 $i$ 出售欧式看涨期权的收益为

$$y_i = k_i \{F - \max(\lambda - f, 0)\} \quad (2)$$

设各发电商的发电机组的发电量连续可调, 没有容量限制, 发电成本为

$$C_i(q_i) = 0.5a_i q_i^2 + b_i q_i \quad (3)$$

式中:  $q_i$ 为发电商 $i$ 的发电机组在该竞标时段的发电出力;  $a_i$ 和 $b_i$ 为发电成本系数, 且 $a_i$ 大于零; 发电商 $i$ 具有线性的边际成本 $MC_i = a_i q_i + b_i$ 。

发电商的收益等于其售电收入减去发电成本, 售电收入由现货市场的售电收入和期权市场的收益两部分组成, 即

$$\begin{aligned} \pi_i &= \lambda q_i + y_i - C_i(q_i) \\ \text{s.t. 式(1)~(3)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $\pi_i$ 表示发电商 $i$ 的收益;  $\lambda$ 为现货市场电价;  $q_i$ 为发电商 $i$ 的发电量;  $y_i$ 为发电商 $i$ 在期权市场的收益;  $C_i(q_i)$ 表示发电商 $i$ 的生产成本。

## 2 模型的求解方法

模型的求解采用文献[2,17]中给出的反向推导方法(图1为求解思路): 第1步先求解现货市场的Nash均衡, 即各发电商在期权电量给定的前提下, 在现货市场按Cournot方式同时确定其发电量, 各发电商的均衡发电量可以表示为所有发电商期权电量的函数; 第2步是求解期权市场的Nash均衡, 即在完全套利的假设条件下, 各发电商利用第1步求出的现货市场均衡电量同时按Cournot方式决定其出售的期权电量。然后联立现货市场和期权市场

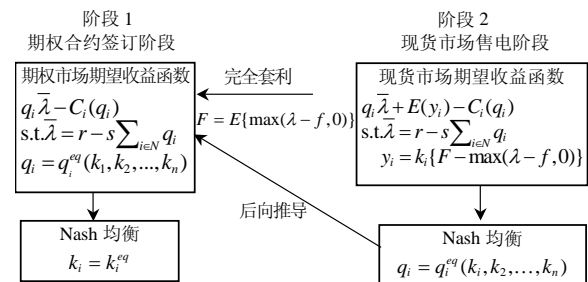


图1 考虑期权的两阶段Cournot模型及其反向求解方法  
Fig. 1 Two-stage Cournot game with options contracts and backward induction

的求解结果，可构成一组非线性方程组，求解该非线性方程组，即可决定市场的均衡解。图 1 给出了反向推导方法的求解思路。

### 3 发电商现货市场决策模型

由于现货电价的不确定性，发电商在现货市场的目标是追求期望收益最大化。发电商  $i$  在现货市场的优化问题可利用式(1)~(4)表示为

$$\begin{aligned} & \max_{q_i} E(\pi_i) \\ \text{s.t. } & \bar{\lambda} = r - s \sum_{j \in N} q_j \\ & E(\pi_i) = q_i \bar{\lambda} + k_i F - k_i (\bar{\lambda} - f + \\ & \int_{-\infty}^{f-\bar{\lambda}} \Phi_\varepsilon(x) dx - 0.5a_i q_i^2 - b_i q_i \end{aligned}$$

式中： $E(\pi_i)$  为发电商  $i$  的期望收益； $N$  为全体发电商的集合。利用该优化问题的一阶条件可得发电商  $i$  的反应函数：

$$q_i = \{r - s \sum_{j \in N, j \neq i} q_j + sk_i [1 - \Phi_\varepsilon(f - \bar{\lambda})] - b_i\} / (2s + a_i) \quad (5)$$

由式(5)可求出所有发电商的发电量之和为

$$q = \sum_{i \in N} \frac{r + sk_i \{1 - \Phi_\varepsilon[f - (r - s \sum_{j \in N} q_j)]\} - b_i}{s + a_i} \bigg/ \left(1 + \sum_{i \in N} \frac{s}{s + a_i}\right) \quad (6)$$

将式(6)代入式(1)可得现货市场电价的期望值：

$$\bar{\lambda} = \frac{r - s \sum_{i \in N} \frac{sk_i \{1 - \Phi_\varepsilon[f - (r - s \sum_{j \in N} q_j)]\} - b_i}{s + a_i}}{1 + \sum_{i \in N} \frac{s}{s + a_i}} \quad (7)$$

注意到  $\bar{\lambda} = r - s \sum_{j \in N} q_j$ ，对式(5)整理可得  $q_i = (\bar{\lambda} - MC_i) / s + k_i [1 - \Phi_\varepsilon(f - \bar{\lambda})]$ ，即随着现货市场电价期望值  $\bar{\lambda}$ 、发电商期权电量  $k_i$  和市场需求弹性  $1/s$  的增加，发电商的发电量逐渐增加，而随着发电边际成本  $MC_i$  的增加和期权执行可能性的减小，发电商的发电量逐渐减小。由于  $\Phi_\varepsilon(f - \bar{\lambda})$  是随机变量  $\varepsilon$  的累积分布函数，所以当期权电量  $k_i$  相同时， $f > \bar{\lambda}$  时  $k_i$  对发电商发电量  $q_i$  的影响要弱于  $f < \bar{\lambda}$  时  $k_i$  对发电商发电量  $q_i$  的影响。

由式(5)知  $\partial q_i / \partial q_j < 0$ ，表明随着发电商  $i$  发电量的增加其它发电商的发电量逐渐减小。由式(5)知  $\partial q_i / \partial k_i > 0$ ，表明发电商进入期权市场可增加其现

货市场的发电量，因此各发电商为扩大自己在现货市场的份额，会积极参与期权市场。由式(7)知  $\partial \bar{\lambda} / \partial k_i < 0$ ，即随着发电商期权电量的增加，现货市场电价的期望值逐渐下降，因此应鼓励发电商积极参与期权市场。

### 4 发电商期权市场决策模型

设期权市场中的买方风险中立且具有理性的期望，此时发电商在期权市场的期望收益将等于零，即  $F = E\{\max(\lambda - f, 0)\}$ ，则发电商  $i$  在期权市场的优化问题可表述为

$$\max_{k_i} \{q_i (r - s \sum_{j \in N} q_j) - 0.5a_i q_i^2 - b_i q_i\}$$

该优化问题的 KKT 条件为

$$(r - sq_i - s \sum_{j \in N} q_j - a_i q_i - b_i) \frac{\partial q_i}{\partial k_i} - sq_i \sum_{j \in N, j \neq i} \frac{\partial q_j}{\partial k_i} = 0 \quad (8)$$

将式(5)代入式(8)，整理后得发电商  $i$  的期权电量为

$$k_i = -q_i \sum_{j \in N, j \neq i} \frac{\partial q_j}{\partial k_i} / (1 - \Phi_\varepsilon(f - \bar{\lambda})) \frac{\partial q_i}{\partial k_i} \quad (9)$$

$$\frac{\partial q_i}{\partial k_i} = \frac{s}{s + a_i} \{1 - \Phi_\varepsilon(f - \bar{\lambda}) - [1 + sk_i \varphi_\varepsilon(f - \bar{\lambda})] \frac{\partial q_i}{\partial k_i}\} \quad (10)$$

$$\frac{\partial q_j}{\partial k_i} = -\frac{s}{s + a_j} (1 + sk_j \varphi_\varepsilon(f - \bar{\lambda})) \frac{\partial q_j}{\partial k_i} \quad (\forall j \in N, j \neq i) \quad (11)$$

$$\frac{\partial q}{\partial k_i} = \frac{s[1 - \Phi_\varepsilon(f - \bar{\lambda})]}{(s + a_i) \{1 + \sum_{j \in N} \frac{s[1 + sk_j \varphi_\varepsilon(f - \bar{\lambda})]}{s + a_j}\}} \quad (12)$$

式(9)给出了发电商  $i$  在期权市场中的均衡选择，表明发电商  $i$  的期权电量跟其余发电商的发电量对发电商  $i$  的期权电量变化的反应程度直接相关。当其余发电商的发电量对发电商  $i$  的期权电量的变化没有反应时，发电商  $i$  的期权电量为零；当其余发电商的发电量对发电商  $i$  的期权电量的变化反应较强烈时，发电商  $i$  将出售更多的期权电量。因此影响其它发电商的策略行为是鼓励发电商出售期权的一种有效机制。

给定期权敲定价格、现货市场电价方差，联立求解式(5)、(7)、(9)~(12)，可计算出各发电商的均衡发电量、期权电量和现货市场电价的期望值，进而可计算出各发电商的期望收益和整个社会福利。

## 5 算例分析

### 5.1 期权对市场均衡结果的影响

设某时段的逆需求函数为  $\lambda = r - sq + \varepsilon$ ，其中

$r=100$  \$/MW·h,  $s=0.52$  \$/(MW·h)<sup>2</sup>,  $\varepsilon$  是一个均值为0, 方差为  $\sigma^2$  满足正态分布的随机量。市场中有2个发电商, 发电商1的生产成本参数  $a_1$  和  $b_1$  分别为  $0.35$  \$/(MW·h)<sup>2</sup> 和  $10$  \$/MW·h; 发电商2的生产成本参数  $a_2$  和  $b_2$  分别为  $0.45$  \$/(MW·h)<sup>2</sup> 和  $10$  \$/MW·h。

表1给出了均方差  $\sigma=10$  \$/MW·h 时, 单独现货市场、考虑远期合约及期权时 Cournot 竞争的市场均衡结果。从表中可以看出, 相对于单独现货市场 Cournot 竞争, 远期合约和期权的存在均不同程度地降低了现货电价、抑制了发电商利用其市场力抬高现货电价的兴趣。同时也应注意到, 考虑期权时现货市场电价的期望值低于考虑远期合约时现货市场电价的期望值, 这表明期权对电力市场的影响要强于远期合约。

从表中还可看出, 随着期权敲定价格的提高, 发电商出售的期权电量逐渐增加, 且发电商2的期权电量占其发电量的比例明显高于发电商1的期权电量占其发电量的比例, 因此发电成本较高的发电商更有兴趣进入期权市场。

另外也应注意到, 当预期期权被执行时, 发电商在期权市场出售的期权电量小于其总发电量; 而预期期权不会被执行时, 发电商在期权市场出售的期权电量大于其总发电量。随着期权执行可能性的减少, 发电商出售的期权电量迅速增加。这里需要

说明的是, 本文所考虑的期权属于金融期权而非物理期权, 绝大部分金融期权在期权到期日前均被平仓, 只有很小一部分金融期权被实际执行。当金融期权被执行时, 发电商退还合约持有者超过期权敲定价格的差额, 该差额等于现货市场电价与期权敲定价格的差值乘以期权合约的规定电量。有关金融期权与物理期权的区别可参见文献[17]附录 B。

表2给出了均方差  $\sigma=10$  \$/MW·h 时, 发电商1或发电商2单独进入期权市场及二者同时进入期权市场时的均衡结果。与表1中单独现货市场 Cournot 竞争的情形相比, 当发电商1或发电商2单独进入期权市场时, 进入期权市场的发电商的市场份额和售电收益均有所提高, 而不进入期权市场的发电商的市场份额和售电收益均有所下降。从表2中也可以看出, 发电商1和发电商2同时进入期权市场时发电商1的市场份额和收益均大于发电商1不进入期权市场而发电商2进入期权市场时的结果, 对发电商2而言也是如此。因此各发电商为提高自己的市场份额和售电收益, 将自愿进入期权市场, 但当两个发电商同时进入期权市场时, 与表1中单独现货市场 Cournot 竞争情形相比, 各发电商的收益均有所下降。这说明发电商在期权市场中的行为类似于博弈论中的“囚徒困境”, 即各发电商为了提高自己的收益与市场份额, 将自愿进入期权市场, 但另一

表1 Cournot 远期合约和期权的市场均衡结果比较

Tab. 1 Comparison among equilibria of markets with Cournot, forward contracts and options

市场状态	发电商1			发电商2			现货电价的期望值/(\$/MW·h)	期权敲定价/(\$/MW·h)	社会福利/\$
	发电量/(MW·h)	合约量/(MW·h)	收益/\$	发电量/(MW·h)	合约量/(MW·h)	收益/\$			
Cournot	48.48	0	1 633.54	43.48	0	1 408.63	52.18		5 241.10
远期合同	53.89	18.81	1 491.07	47.84	17.90	1 260.02	47.10		5 441.75
期权	$\bar{\lambda} > f$	37.94	1 417.39	49.52	35.84	1 185.80	45.09	40.00	5 502.52
	$\bar{\lambda} = f$	62.42	1 366.07	50.53	58.44	1 134.16	43.82	43.82	5 535.54
	$\bar{\lambda} < f$	75.57	1 347.43	50.86	70.50	1 115.46	43.37	45.00	5 546.00

注: 表中合约量是指发电商出售的远期合约电量或期权电量。

表2 某一发电商或所有发电商进入期权市场时的均衡结果比较

Tab. 2 Comparing equilibrium results of one or all generators to sign options

期权敲定价/(\$/MW·h)	发电商1			发电商2			现货电价的期望值/(\$/MW·h)	社会福利/\$
	发电量/(MW·h)	合约量/(MW·h)	收益/\$	发电量/(MW·h)	合约量/(MW·h)	收益/\$		
25.00	57.05	20.06	1 671.23	40.49	0	1 221.59	49.28	5 366.53
	45.61	0	1 445.59	51.57	19.27	1 441.13	49.68	5 321.63
	54.02	19.54	1 486.73	47.95	18.60	1 255.68	46.98	5 445.85
30.00	57.05	20.46	1 671.23	40.49	0	1 221.59	49.28	5 366.53
	45.61	0	1 445.59	51.57	19.62	1 441.13	49.68	5 321.63
	54.28	21.17	1 478.28	48.16	20.14	1 247.20	46.73	5 453.62
35.00	57.05	21.56	1 671.23	40.49	0	1 221.59	49.28	5 366.53
	45.61	0	1 445.59	51.57	20.76	1 441.13	49.68	5 321.63
	54.87	25.60	1 458.55	48.62	24.32	1 227.34	46.18	5 470.77

方面，电量合同化程度的提高导致了现货市场电价的下降，因此尽管各发电商的发电量增加了，但最终其收益反而减少。

### 5.2 期权敲定价格和方差对市场均衡结果的影响

图 2 给出了均方差  $\sigma$  为 8、10、12  $\$/\text{MW}\cdot\text{h}$  时，发电商的总发电量  $q$  和期权电量  $k$  随期权敲定价格  $f$  的变化结果。从图中可以看出：①发电商在期权市场出售的期权电量随期权敲定价格  $f$  的增加而增加，且  $f$  较高时的增加速度要远大于  $f$  较小时的增加速度；期权敲定价格  $f$  较小时，发电商出售的期权电量与现货电价的方差关系不大，但当  $f$  较大时随着现货电价方差的增加发电商出售的期权电量较少。这说明随着期权执行可能性的减小，发电商将期权作为其策略性竞标工具时，出售的期权电量将大量增加；②发电商的发电量  $q$  随期权敲定价格  $f$  的变化趋势与期权电量随期权敲定价格  $f$  的变化趋势相同，即随着发电商期权电量的增加其发电量也同时增加。

图 3 给出了均方差  $\sigma$  为 8、10、12  $\$/\text{MW}\cdot\text{h}$  时，期望的现货市场电价和发电商收益随期权敲定价格  $f$  的变化结果。可以看出：①现货市场电价的期望值随着期权敲定价格  $f$  的增加而减小，且  $\sigma$  较大时现货市场电价的期望值的减小速度要低于  $\sigma$  较小时的减小速度；②发电商的收益随着期权敲定价格  $f$  的增加而减小，且  $\sigma$  较大时其收益的变化幅度较小，因此为维持收益的相对稳定和较高的现货市场电价，发电商有兴趣维持现货市场电价的高波动性。

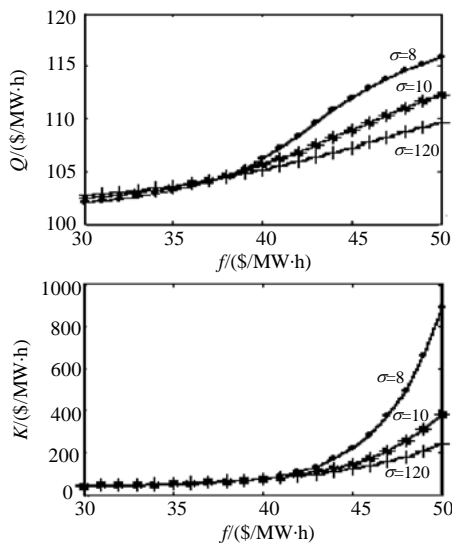


图 2 市场发电量与期权电量随期权敲定价格的变化  
Fig. 2 Production quantity and options quantity for varying levels of strike price

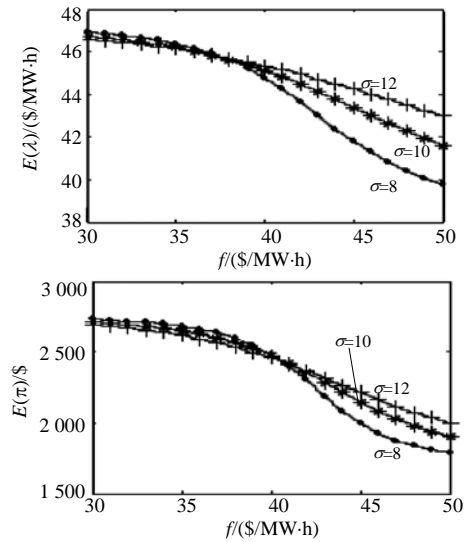


图 3 期望的现货电价和发电商收益随期权敲定价格的变化  
Fig. 3 Expected spot price and generators' payoff for varying levels of strike price

## 6 结论

本文假设发电商具有完全信息，以欧式看涨期权为例，建立了考虑期权时的电力市场两阶段 Cournot 博弈模型，分析了期权对市场效率和发电商竞价策略的影响。在本文假设条件下的结果表明：①期权的存在，可促使发电商增加发电量，降低现货市场电价，提高市场效率，在一定程度上抑制发电商的市场力滥用；②期权对电力市场的作用要强于远期合同，因此电力监管机构应鼓励或强制发电商进入期权市场；③当单个发电商进入期权市场时，可扩大其市场份额和售电收益，但当所有发电商均进入期权市场时将产生囚徒困境；④发电商为维持较高的现货电价和相对稳定的收益，有兴趣维持现货电价的高波动性。

本文的模型仅考虑了发电商在期权与现货市场的策略行为对电力市场均衡的影响，未计及输电约束和用户的策略行为对市场均衡的影响，因此如何进一步优化模型，使之能处理输电约束和用户对市场均衡的影响，是下一步要做的工作。

## 参考文献

[1] Ventosa M, Baillo A, Ramos A, et al. Electricity market modeling trends[J]. Energy Policy, 2005, 33: 897-913.  
 [2] Powell A. Trading Forward in an imperfect market: the case of electricity in Britain[J]. The Economic Journal, 1993, 103 (March): 444-453.  
 [3] Haili S, Chenqing L, Jacques L. Nash equilibrium bidding strategies in a bilateral electricity market [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2002, 17(1): 73-79.

- [4] Batstone S. An equilibrium model of an imperfect electricity market [C]. In Proceedings of the 35th ORSNZ Conference, University of Victoria, Wellington, New Zealand, 2000.
- [5] 袁智强, 刘东, 蒋传文, 等. 考虑远期合约基于古诺模型的市场参与者策略研究[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 72-76.  
Yuan Zhiqiang, Liu Dong, Jiang Chuanwen, et al. Study on Cournot model based market participants' strategies considering forward contracts[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 72-76(in Chinese).
- [6] 宋依群, 倪以信, 侯志俭, 等. 基于均衡分析的总统调合同电量比例研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 64-67.  
Song Yiqun, Ni Yixin, Hou Zhijian, et al. Studies on centralized contract generation amount based on equilibrium theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 64-67(in Chinese).
- [7] 张显, 王锡凡, 王建学, 等. 发电商长期电能分配策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 6-12.  
Zhang Xian, Wang Xifan, Wang Jianxue, et al. A long-term allocating strategy of power generations[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 6-12(in Chinese).
- [8] 江健健, 夏清, 祁达才, 等. 基于期货的新型电力交易模式[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 31-37.  
Jiang Jianjian, Xia Qing, Qi Dacai, et al. New mechanism of electricity trade based on futures[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 31-37(in Chinese).
- [9] Bessembinder H, Lemmon M L. Equilibrium pricing and optimal hedging in electricity forward markets[J]. The Journal of Finance, 2002, LVII(3): 1347-1382.
- [10] 张显, 王锡凡, 王建学, 等. 可中断电力合同中新型期权的定价[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 18-23.  
Zhang Xian, Wang Xifan, Wang Jianxue, et al. Pricing for exotic option of interruptible electricity contracts[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 18-23(in Chinese).
- [11] Tanlapco E, Lawarrée J, Chenching L. Hedging with futures contracts in a deregulated electricity industry[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 577-582.
- [12] 徐善鹏, 任震, 黄雯莹. 电力市场的双边优先权保险机制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 32-35.  
Xu Shanpeng, Ren Zhen, Huang Wenyong. A bilateral priority insurance scheme in electricity market [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 32-35(in Chinese).
- [13] 陈晓林, 刘俊勇, 宋永华, 等. 利用差价合同和金融输电权的组合规避电力市场风险[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 75-81.  
Chen Xiaolin, Liu Junyong, Song Yonghua, et al. Use of CFDs and FTRs to hedge against risks of power market [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 75-81(in Chinese).
- [14] 马歆, 蒋传文, 侯志俭, 等. 基于摆动期权合约的发电商风险回避模型研究[J]. 继电器, 2004, 32(19): 1-4.  
Ma Xin, Jiang Chuanwen, Hou Zhijian, et al. Study of generators risk-avoiding model based on swing options contract[J]. Relay, 2004, 32(19): 1-4(in Chinese).
- [15] Anderson E D, Huifu X. Optimal supply function in electricity markets with option contracts and non-smooth costs[R]. University of New South Wales, AGSM working paper, April 2005.
- [16] Barquin J. On oligopolistic electricity market equilibria and contingent claims[R]. University of Pontificia Comillas, 28015, Madrid, Spain.
- [17] Willems B. Cournot Competition, Financial option markets and efficiency [R]. CSEM Working Paper of California 94720-5180, Berkeley, University of California.

收稿日期: 2007-01-26.

作者简介:

王瑞庆(1965—), 男, 博士研究生, 主要从事金融衍生工具在电力市场中的应用研究, ayrqwang@163.com;

李渝曾(1947—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事电力市场输电定价、可中断负荷管理、博弈分析等研究;

张少华(1966—), 男, 博士生导师, 教授, 主要从事电力市场风险管理、远期合同定价、可中断负荷管理等研究。

(编辑 王彦骏)