

结合强势卖方期权的电力远期合同模型

王 访¹, 邹锐标²

(1. 湖南农业大学东方科技学院, 湖南 长沙 410128; 2. 湖南农业大学理学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 随着电力市场垄断的不断减弱, 区域卖方垄断市场的发电商的风险日渐明显。结合期权思想, 设计了一种包含强势卖方期权的电力远期合同, 以发电商期望收益最大化建模, 得到了其在签订合同时应购买的强势卖方期权最优数量的解析解。通过理论研究和算例随机模拟分析, 说明了这种包含强势卖方期权的电力远期合同比普通单边差价合同更具实用性, 并证明了发电商通过签订该合同能提高期望收益。

关键词: 电力市场; 大发电商; 强势卖方期权; 风险管理; 最优决策

Modeling for electricity forward contracts combining with power put option

WANG Fang¹, ZOU Rui-biao²

(1. Oient Science and Technology College, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China;

2. Science College, Hunan Agriculture University, Changsha 410128, China)

Abstract: With the steady decline in the electricity market monopoly, the risks of generator in regional monopoly seller market become apparent. This paper designs an electricity forward contract involving power put options based on the option theory. The analytical solution of the optimal quantity of power put options that the large power plant should reserve is calculated by modeling the maximum expectation profit. It is verified that the contracts with the put option has more practicality than general forward contracts for differences from the theoretical studies and numerical analysis, and it also improves profits of the large power plant with the power put option.

Key words: power market; large power plant; power put option; risk management; optimal decision-making

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)01-0078-05

0 引言

从20世纪80年代开始, 世界上许多国家陆续进行了电力工业的市场化改革, 其主要目标是打破传统电力工业垄断运营的模式。但电能不能储存, 供应和需求应随时保持平衡, 需求弹性很小, 投资规模大, 运行费用高, 资金回收慢, 存在天然的市场进入壁垒。这些都使现阶段所形成的电力市场是一个不完全竞争的寡头垄断市场^[1]。在寡头垄断市场中, 占据大量市场份额的一方, 通常可以利用强大的市场势力^[2]获得远远高于边际成本的垄断利润^[3-4], 文献[5]研究垄断环境下的大发电商和大供电商是市场价格的制造者, 拥有较大的市场势力。

尽管暂时的区域垄断能为发电商带来高额利润, 但随着电力改革的深入及市场竞争机制的引入而使垄断局面逐步减弱。从而发电商在获得高额利润的同时也将面临着巨大的市场风险, 主要来自于实时市场电价的波动。因此如何进行风险管理已成为各类发电商不得不考虑的问题, 越来越多的发电商已意识到风险管理的重要性, 并积极采用合适的远期、期货、期权等风险管理工具和方法来回避与控制风险^[6]。

对于市场参与者的风险管理机制, 国内外学者做了大量的研究^[7-18]。期权作为一种风险管理强有力的工具广泛应用于不同的领域。文献[12]基于断电期权对电网公司购电价格风险管理进行了研究, 得到了其购买断电期权最优数量解析解。文献[13]借鉴金融学中的单指数模型, 建立了发电商基于 β 系数的投标组合决策模型。文献[14]引进金融领域常见的范围远期合同构造了一个电力范围远期合

基金项目: 湖南省教育厅资助项目 (09C510); 湖南农业大学青年基金资助项目 (08QN12)

同, 并利用期权思想对其定价, 推广了普通差价合同。文献[15-16]基于期权思想设计了单边可选择电力远期合同, 文献[17-18]研究了双边可中断的远期合同, 兼顾了市场双方的公平, 利用激励理论给出了期权中断价的均衡选择。

本文考虑一种在区域卖方寡头垄断市场中的发电商(本文称之为大发电商)的风险管理模式。大发电商通过与供电商签订强势卖电期权合同, 该合同较单边卖电方差价合同更具有实用性, 它使大发电商易与供电商签订合同从而完全回避了市场电价下跌的风险, 同时保留了市场电价上涨时获利的机会。并建立最优强势卖电期权数量模型, 对模型求解出大发电商所购买强势卖电期权的最优数量的解析解。通过算例分析, 说明该合同模型可以在一定程度上减少电力实时市场售电价格过低带来的损失风险, 为大发电商增加收益。

1 大发电商风险管理模型

在实时电力市场中, 电价受各种因素影响而实时波动, 这样大发电商面临着巨大的风险, 为规避电价波动的风险, 大发电商与供电商就某时刻 T 的售电量签订一个强势卖电期权合同。假设:(1)市场双方基于市场发布的远期公开信息或合同双方认可的市场协调或仲裁人的信息, 对将来时刻 T 的电力现货价格 P 的概率密度函数 $f(x)$ 和概率累加函数 $F(x)$ 有相同的估计, \bar{p} 为电价均值。(2)交易双方都是风险中性的, 可认为他们对风险的偏好相同。

(3)在 T 时刻的用户对电力的需求 D 也是公共信息, 且与实时电价 P 相互独立, 设需求 D 的概率密度函数为 $g(D)$ 、概率累加函数为 $G(D)$, \bar{D} 为需求均值。(4)大发电商的单位电量成本为 c , 由其自身的发电机组决定, 不影响用户电力需求 D 。

1.1 强势卖电期权合同简介

与普通单边差价合同中的卖电方差价合同相比, 强势卖电期权合同有着与之类似的规避风险的能力。二者都能使发电方完全回避市场电价下跌的风险, 同时保留了从市场涨价中获利的机会。不同的是普通卖电方差价合同的远期交易敲定价格一般定为实时电价的均值点, 这在不完全的卖方垄断市场(寡头垄断市场)中往往难以与供电商达成一致; 而强势卖电期权合同所选取的远期交易的敲定价格定在小于均值点的某一点上, 为供电商让出了一定的利润空间, 这样更有效地撮成了合同的达成, 促进了合同市场高效运作。

对于单位电量, 某大发电商与供电商签订的强势卖电期权合同规定: 若时刻 T 实时电价 $p < f$,

则市场双方按价格 p 进行交易, 但供电商把 f 与 p 的差价补偿给大发电商, 也就相当于他们以价格 f 进行成交; 若时刻 T 实时电价 $p \geq f$, 则市场双方仍按价格 p 进行交易, 但此时大发电商不需要把 p 与 f 的差价支付给供电商。

通过合同规则的说明, 可知强势卖电期权合同给予了大发电商在低现货电价时以相对较高的价格 f 出售电力的权利。按照期权理论, 这相当于大发电商向供电商够买一个卖方期权 s (敲定价格为 f)当时实时电价下跌时可以进行保值。图1为市场双方的权利和义务。

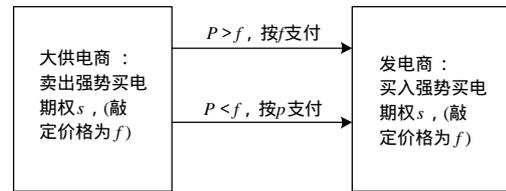


图1 强势卖电期权合同双方的权利和义务

Fig.1 Contractual obligations and payments in power put options contracts

合同敲定价格 f 的确定: 当时刻 T 实时电价 $p < f$ 时, 大发电商仍然以 f 出售电力, 这是因为它向电网公司购买了强势卖电期权, 因此必须为持有这个权力付出代价 s 。故大发电商在此时执行权利所产生的单位电量价值为 $(f - p)^+$ 的期望值, 应在合同电价中扣除(由于 p 为预测的合同交货时的现货市场价格, 因而强势卖电期权的时间价值在此也无需考虑)。

$$f = E[\text{公共市场信息下的实时电价}p] - E[\text{公共市场信息下强势卖电期权的内在价值}(0, f - p)^+]$$

$$\text{即 } f = \bar{p} - s = \int_0^{+\infty} pf(p)dp - \int_0^f (f - p)f(p)dp \quad (1)$$

$$s = \int_0^f (f - p)f(p)dp \quad (2)$$

记 $W(f) = f - \bar{p} + \int_0^f (f - p)f(p)dp$ 。因为 $\frac{dW}{df} = 1 + F(f) > 0$, $W(f)$ 关于 f 严格递增, 且 $W(0) = -\bar{p} < 0$, $W(+\infty) = \lim_{f \rightarrow +\infty} 2(f - \bar{p}) > 0$, 故 $W(f)$ 在 $(0, +\infty)$ 上有唯一解; 本文利用收敛速度较快的牛顿迭代法 ($f^{(k+1)} = f^{(k)} - \frac{W(f)}{W'(f)}$, k 为迭代次数) 求解合同价格 f 的值, 并得到强势卖权 s 的

价格。

1.2 最优强势卖权数量模型

在实时市场中，大发电商与供电商的决策过程如下：

(1) 在0时刻，大发电商与供电商签订在将来时刻 T 的强势卖电期权合同，合同规定大发电商向供电商购买 Q 个强势卖电期权。大发电商具有将来时刻 T 当实时电价 $p < f$ 时可以 f 卖电的权利，不失一般性，假设单位期权代表单位电量；当将来时刻 T 实时电价 $p > f$ 时，双方以 P 成交。

(2) 在 T 时刻，大发电商根据实时电价 P 与 f 的关系来决定是否执行强势卖电期权的数量。

由上述假设条件及决策过程，大发电商的利润函数为：

$$\pi_s = D_s(p-c) - sQ + q(s+f-c) \quad (3)$$

式中： D_s 分别表示大发电商满足用户需求的电量，一般地 $D_s \leq D$ ，大发电商为使自己利润最大化而将多余电力在实时市场中出售。 s 表示购买强势卖电期权的费用，可以通过式(2)求解。 q 为时刻 T 大发电商执行强势卖电期权的数量。

在将来时刻 T 用户需求 D 及实时电价 p 实现后：若 $p < f$ 大发电商执行强势卖电期权，供电商将 q 个单位的期权费补偿给大发电商，同时大发电商具有 q 个以价格 f 卖电的权利，对于多余电量（没有购买强势卖电期权的部分）以价格 p 在实时市场出售。通过以上分析得到 D_s 及 q 分别为：

$$D_s = \begin{cases} (D-Q)^+ & p < f \\ D & p \geq f \end{cases} \quad (4)$$

$$q = \min(D, Q)\lambda \quad (5)$$

其中， $\lambda = \begin{cases} 0 & p \geq f \\ 1 & p < f \end{cases}$ 。从而大发电商的期望收益可表示为：

$$E(\pi_s) = E(D_s(p-c)) - sQ + (s+f-c)E(q) \quad (6)$$

定理 1：为使大发电商的期望收益 $E(\pi_s)$ 达到最大值，其在时刻0应购买的最优强势卖电期权数量为

$$Q^* = G^{-1} \left[1 - \frac{1}{1+F(f)} \right] \quad (7)$$

证明：为使大发电商的期望收益最大，其应向供电商购买最优数量 Q^* 的强势卖电期权。对式(6)

左边进行如下处理。

$$\begin{aligned} ED_s(p-c) &= \int_0^{+\infty} (D-Q)^+ g(D)dD \cdot \\ &\int_0^f (p-c)f(p)dp + \\ &\int_0^{+\infty} Dg(D)dD \cdot \int_f^{+\infty} (p-c)f(p)dp = \\ &\int_Q^{+\infty} [1-G(D)]dD \cdot \int_0^f (p-c)f(p)dp + \\ &\bar{D} \cdot \int_f^{+\infty} (p-c)f(p)dp \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} E_q &= E[\min(D, Q)\lambda] = E_D[\min(D, Q)] \cdot E_p(\lambda) = \\ &\left[\int_0^Q Dg(D)dD + \int_Q^{+\infty} Qg(D)dD \right] \cdot \int_0^f f(p)dp = \\ &F(f) \cdot \int_0^Q [1-G(D)]dD \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(\pi_s)}{\partial Q} &= [G(Q)-1] \cdot \int_0^f (p-c)f(p)dp - s + \\ &(s+f-c)F(f)[1-G(Q)] = \\ &[G(Q)-1] \cdot \left[\int_0^f (p-c)f(p)dp - \right. \\ &\left. (s+f-c)F(f) - s \right] \\ &[G(Q)-1] \cdot (-s)[1+F(f)] - s \end{aligned} \quad (10)$$

$\frac{\partial^2 E(\pi_s)}{\partial Q^2} = g(Q)(-s)[1+F(f)] < 0$ ，从而式(6)是决策变量 Q 的凹函数，可由式(6)的一阶条件得到大发电商购买的最优卖电期权数量 Q^* 。令

$$\frac{\partial E(\pi_s)}{\partial Q} = 0, \text{ 得到 } Q^* = G^{-1} \left[1 - \frac{1}{1+F(f)} \right]$$

对于不同单位成本的大发电商， $E(\pi_s)$ 为 Q 的凹函数，利用式(7)得到的 Q^* 为 $[0, +\infty)$ 上唯一的最优解。因此有 $E(\pi_s(Q^*)) \geq E(\pi_s(Q))|_{Q=0}$ ，即大发电商通过购买强势卖电期权的期望收益要优于不购买期权时的期望收益。

从定理1可看出不同单位发电成本的大发电商的购买强势卖电期权的决策是相同的。即期权数量与单位成本 c 无关。因此由上述模型得到的最优卖权数量具有普适性，可适用于不同类型的大发电商。

2 算例分析

设电力市场需求 D 服从均值 \bar{D} 为1 000 MWh，标准差为300 MWh的正态分布；电力实时市场价格服从均值 \bar{p} 为500元/MWh，标准差为 σ 的对数正态分布，两者相互独立。由式(1)、(2)

和 (7) 可计算得到 σ 分别取 100 元/MWh 和 120 元/MWh 时的强势卖电期权合同敲定价格及强势卖电期权价格和数量, 如表 1 所示。

表 1 强势卖电价格与最优数量及合同价格

Tab.1 Price of the contracts and power put options, and its

optimal quantity			
$\sigma /$ (元/MWh)	$f /$ (元/MWh)	$s /$ (元/MWh)	$Q^* /$ (元/MWh)
100	473.44	26.56	843.25
120	468.45	31.55	846.46

从表1可以看出: 合同电价 f 随着时刻 T 的实时电价 p 波动的增大而减小, 强势卖电期权 s 随着变大; 这表明随着时刻 T 实时电价 p 的波动变大市场大发电商面临的风险变大, 为规避风险而应付出的代价也增多。最优强势卖电期权 Q^* 随着时刻 T 的实时电价 p 波动的增大而增大, 这说明当电价服从对数正态分布且有较大波动时大发电商需要购买更多的强势卖电期权来规避风险。

对不同单位发电成本的大发电商, 它们的期望收益和在时刻0没有购买强势卖方期权时的期望收益如表2及图2所示。

从表2及图2可以看出: 随着实时电价波动的增大, 他们的期望收益也增大, 这符合市场高风险高回报的原则; 对于不同发电成本的大发电商, 他们通过购买强势卖方期权所获得的期望收益比没有购买期权所获得的期望收益都要大, 所以说明通过签订强势卖方期权合同确实能提高大发电商的效益。

表2 不同单位成本的大发电商的期望收益

Tab.2 Expectation profit of large power plant with different unit

单位成本 $c /$ (元/MWh)	costs	
	期望收益 $E(\pi_s) /$ 元	
	$\sigma = 100$	$\sigma = 120$
400	107 450	109 040
410	97 454	99 044
420	87 454	89 044
430	77 454	79 044
440	67 453	69 044
450	57 453	59 044
460	47 453	49 044
470	37 453	39 043
480	27 453	29 043
490	17 453	19 043
500	7 453	9 043

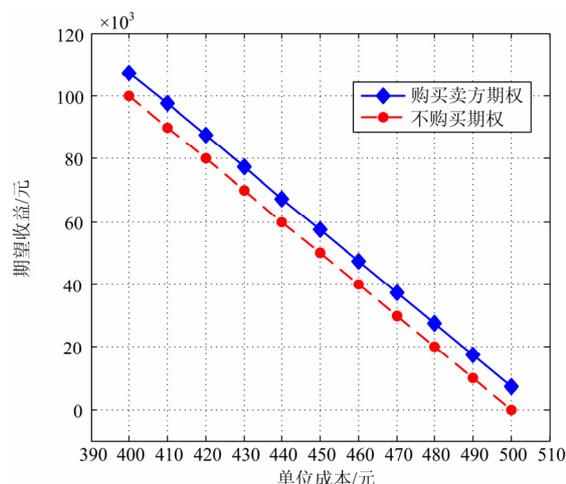


图 2 大发电商的决策与预期收益 ($\sigma = 100$ 元/MWh)

Fig.2 Strategy and expectation profit of large power plant ($\sigma = 100$ 元/MWh)

设现有一单位发电成本 $c = 450$ 元/MWh 的大发电商。当实时电价标准差 $\sigma = 100$ 元/MWh 时, 在时刻 0 与供电商签订强势期权合同, 向其购买 $Q = 843.25$ MWh 强势卖电期权。由式 (6) 可计算得到大发电商的期望收益 $E(\pi_s) = 5.75$ 万元; 若在时刻 0 大发电商不购买任何期权, 即 $Q = 0$, 则 $E(\pi_s) = 5$ 万元, 明显小于购买期权时的期望收益, 从而说明大发电商通过购买强势卖电期权合同, 不但能为其规避电价剧烈波动的风险, 而且还能提高其期望收益。

下面考虑上述大发电商在时刻 T 的决策:

(1) 若 T 时刻用户的电量需求 $D = 1200$ MWh, 实时电价 $p = 520$ 元/MWh, 由于 $p > f$, 所以大发电商不执行强势卖权, 按照合同规定的实时价格 520 元/MWh 成交电量 1200 MWh。

(2) 若 T 时刻用户的电量需求 $D = 1200$ MWh, 实时电价 $p = 460$ 元/MWh, 由于 $p < f$, 所以大发电商执行强势卖权, 执行期权数量 $q = \min(D, Q) = 843.25$ MWh, 从而在时刻 T 大发电商以价格 f 向供电商出售 843.25 MWh 电量, 将多余 356.75 MWh 电量在实时市场上以价格 p 出售, 此时大发电商的利润 $\pi_s = 2.33$ 万元; 如果该大发电商在时刻 0 不购买期权, 那么其利润 $\pi_s = 1.2$ 万元, 因此大发电商通过购买强势卖电期权可以多得利润 1.13 万元。

若时刻 T 电量需求 $D = 800$ MWh, 实时电价

$p = 460$ 元/MWh，大发电商仍执行强势卖权，执行期权数量 $q = \min(D, Q) = 800$ MWh，即在时刻 T 大发电商以价格 f 向供电商出售全部 800 MWh 电量，大发电商的利润 $\pi_s = 1.76$ 万元；如果该大发电商在时刻 0 不购买期权，那么其利润 $\pi_s = 0.8$ 万元，因此大发电商通过购买卖电期权可以多得利润 0.96 万元。所以通过上述分析可知，大发电商通过购买强势期权合同可以在一定程度上减少电力实时市场售电价格过低带来的损失风险，为其增加收益。

3 结语

电力市场的逐渐开放，必将使得发电商的风险暴露于市场中，因此其风险管理的作用日益明显。电力期权作为一种强大的风险控制工具起着越来越重要的作用。本文对具有较强市场势力的供电商进行风险管理，提出了一种强势卖电期权，分析了含有这种期权的合同比普通单边差价合同更具有实用性。通过算例说明这种强势卖电期权可为发电商锁定风险从而增大收益。

参考文献

[1] 王锡凡, 王秀丽, 等. 电力市场基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.
WANG Xi-fan, WANG Xiu-li, et al. Principle of power market[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003.

[2] 马歆, 蒋传文, 侯志俭. 电力市场中的市场势力[J]. 水电能源科学, 2002, 20 (3): 68-71.
MA Xin, JIANG Chuan-wen, HOU Zhi-jian. Market power in electric power market[J]. Water Resources and Power, 2002, 20 (3): 68-71.

[3] Outhred H. A review of electricity industry restructuring in australia[J]. Electric Power Systems Research, 1998, 44 (1): 15-25.

[4] Wolak F A. Market design and price behavior in restructured electricity markets: an international comparison[R]. Power Working Papers (pwp-051), Berkeley: University of California Energy Institute, 1997.

[5] Schuler R E. Analytic and experimentally derived estimates of market power in deregulated electricity systems: policy implications for the management and institutional evolution of the industry[J]. Decision Support Systems, 2001 (30): 341-355.

[6] Borenstein S. The trouble with electricity markets (and some solutions) [R]. Power Working Paper PWP-081. University of California Energy Institute, 2001.

[7] Michael Denton, Adrian Palmer, Ralph Masiello, et al. Managing market risk in energy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (2): 494-502.

[8] Oren S S. Integrating real and financial options in demand-side electricity contracts[J]. Decision Support Systems, 2001, 30 (3): 279-288.

[9] Jacob Lemming. Financial risks for green electricity investors and producers in a tradable green certificate market[J]. Energy Policy, 2003, 31 (1): 21-32.

[10] 王访, 邹锐标, 周晓阳. 基于强势买电期权的大供电商风险管理模型[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (3): 72-76.
WANG Fang, ZOU Rui-biao, ZHOU Xiao-yang. Large power supplier risk management model based on power call options[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (3): 72-76.

[11] 李明, 李艳芳. 基于期权的水电厂交易模型设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (24): 32-35.
LI Ming, LI Yan-fang. Research of option based bidding mode for hydroelectric plant[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (24): 32-35.

[12] 盛方正, 季建华. 基于断电期权的供电公司购电价格风险管理方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (18): 30-33.
SHENG Fang-zheng, JI Jian-hua. Method of managing power supplier's price risk of purchasing electricity based on interruptible options[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (18): 30-33.

[13] 谭忠富, 谢品杰, 侯建朝. 基于 β 系数的发电商投标组合决策模型[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (1): 14-18, 49.
TAN Zhong-fu, XIE Pin-jie, HOU Jian-chao. Combined bidding decision-making model for power suppliers based on β coefficient[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37 (1): 14-18, 49.

[14] 王访, 王壬, 周晓阳. 电力范围远期合同的定价分析及仿真研究[J]. 水电能源科学, 2006, 24 (5): 33-36.
WANG Fang, WANG Ren, ZHOU Xiao-yang. The pricing analysis and emulational research for electricity range forward contracts[J]. Water Resources and Power, 2006, 24 (5): 33-36.

[15] Gedra T W, Varaiya P P. Markets and pricing for interruptible electric power[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8 (1): 122-128.

[16] Gedra T W. Optional forward contracts for electric power markets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(4): 1766-1773.

[17] 肖涛, 张少华. 独立发电商与电力公司之间的激励性中断供电合同模型[J]. 电网技术, 2006, 30(4): 69-73.
XIAO Tao, ZHANG Shao-hua. A model incentive interruptible power supply contracts between independent power generation companies and utility[J]. Power System Technology, 2006, 30 (4): 69-73.

[18] 张少华, 李渝曾, 王长军, 等. 结合期权理论的双边可选择电力远期合同模型[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 28-32.

收稿日期: 2010-01-15

作者简介:

王 访 (1981-) 男, 博士, 讲师, 从事复杂系统建模、电力市场风险管理研究工作; E-mail: topwang619@163.com
邹锐标 (1965-) 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 从事复杂系统建模工作。