

基于市场风险和风险偏好的购电商最优决策研究

严磊¹, 罗晓伊², 佟如意², 魏阳¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 结合前景理论刻画了购电商风险规避度, 并在此基础上构建了考虑电力用户随机需求的购电商决策模型。通过求解和分析购电商的最优决策, 量化分析了决策者风险偏好、市场风险、零售价格、批发价格、购电商成本对最优决策的影响, 为风险规避型购电商在市场风险下的最优决策提供了新的指导和参考。

关键词: 电力供应链; 购电商; 市场风险; 风险偏好

中图分类号: F407.61 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)06-0047-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.06.011

Optimal Decision of Electricity Retailers Based on Market Risk and Risk Appetite

Yan Lei¹, Luo Xiaoyi², Tong Ruyi², Wei Yang¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The degree of risk aversion for electricity retailer is characterized with prospect theory under stochastic demand, and a decision model for optimal decisions is established for electricity retailer. Quantitative analysis is shown that the effect of decision-maker's risk appetite, market risk, retail price, wholesale price and the cost of electricity retailer on optimal decision. The conclusion provides a new way of optimal decision for the risk-averse electricity retailer in market risk.

Key words: electricity supply chain; electricity retailer; market risk; risk appetite

0 引言

电力行业是由众多相关企业组成的一个庞大网络系统,大致可以分为煤炭及电力设备生产、发电、输电、配电和电能销售等环节^[1-3]。随着电力行业中大客户直购电政策落地,购电商选择权放开,电力行业市场化竞争日益激烈。为了更好把握行业发展趋势,越来越多的学者开始用供应链思想来研究电力行业市场中的经营管理问题。从已有研究来看,现有研究主要基于供应链视角对不同市场结构下的电量分配组合策略与电价风险以及电力企业的最优决策展开。

在电量分配组合策略与电价风险方面,文献[4-5]用委托代理理论研究了具有激励相容特性的发电市场竞价机制设计。文献[6]应用竞价交易理

论探讨了发电企业、配电企业如何在输、配之间进行竞价,并基于上述行为关系设计了电力发电市场的激励性双边合同。文献[7]对电力供应链的收益风险进行了深入考察,揭示了供电商可以通过采用期权对购电商进行激励。鉴于激励行为对电力供应链收益管理的重要影响,一些学者开始对基于非对称信息下的电力供应链激励契约机制进行考察。针对信息不对称所导致的可中断负荷管理低效问题,文献[8]构建了考虑激励相容的可中断负荷管理机制模型,认为供电企业用科学的激励措施可以引导用户在电力交易过程中自愿披露信息,提高了电力市场运行效率。在后续研究中,文献[9]在原有模型基础上,把用户类型作为细分变量,考虑供电企业的可中断负荷管理机制,发现可进一步提高激励机制的适用性。文献[10]则结合云南电力市场实际

情况,构建了激励相容与深度博弈相结合的市场机制模型,从“点对点”、“背靠背”和“面对面”3个层面对云南电力交易市场的构建与运行提出了针对性的建议。

在电力企业的最优决策研究方面,文献[11]采用效用函数与 Value-at-Risk 相结合的方法对购电商的长期购电方案及对应风险进行了考察,给出了最优的购电组合策略。文献[12]采用期望-方差分析法,对电力需求不确定性条件下供电公司的收益与风险进行考察,为输配分离下供电公司基于自身风险偏好的最优购电量选择提供了建议。文献[13]在划分风险偏好类型的基础上,采用 Conditional-value-at-risk 法构建了不同风险偏好影响下的供电商最优购电策略模型,揭示了供电商风险偏好组合与其购电组合之间最优的内在匹配关系。相类似的,文献[14]设计了考虑风险的电力市场直购电量合同,给出了最优的直购电量策略。随着研究的深入,一些学者开始注意到行为者风险偏好并不是一成不变的,它往往跟行为者的心理预期(即心理前景)有着紧密的关系^[15-16]。基于这一发现,学者们开始基于前景理论,对电力供应链中上下游电力企业之间的购售电决策进行进一步的考察。如文献[17]基于前景理论,构建了考虑发电商心理前景的电力分配模型,揭示了发电商心理前景对其最优电量分配策略的影响。文献[18]以买卖双方整体前景值最大化为目标,构建了清洁能源发电与火力发电相混合的发电权交易模型,考察了买卖双方整体的心理前景值与最优混合发电权交易之间的内在匹配关系。这为风险偏好影响下的电力企业最优决策研究提供了新思路。

综合而言,上述研究成果为新一轮电力体制改革下的电力企业高效运营提供了有益的指导。但同时应看到,已有研究结果主要侧重于单独的考察市场风险或电力企业风险偏好对其行为决策的影响,并未将电力市场风险和电力企业的风险偏好纳入到统一的分析框架中。在电力企业的现实运营中,电力企业的任何决策不仅需要考虑到市场需求的不确定性,还要考虑决策者自身的风险偏好或心理前景对决策的影响。基于这一背景,拟将市场风险和决策者自身的风险规避程度同时纳入到电力企业的购电

决策中,力图更好地揭示市场风险和电力企业自身风险规避程度对其购电决策的影响。下面首先采用前景理论刻画购电商的风险规避度,构建考虑用电户随机需求的购电商决策模型;其次求解购电商最优策略,量化分析决策者风险偏好、市场风险、电价(零售价格、批发价格)、购电商成本对最优决策的影响。

1 模型假设

目前,发电企业、电网公司和用户是中国电力市场中三大市场主体。为便于分析,这里所指的电力行业的市场结构由发电企业(发电商)、电网公司(购电商)和用户组成,模型见图1。

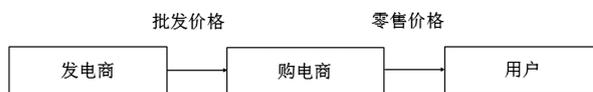


图1 电力行业市场结构

为更好地研究电力供应链中发电商与购电商之间的行为关系,作如下假设。

假设1:购电商的变动成本为 c' (为简化计算,不考虑购电商的固定成本。如果考虑购电商的固定成本,结合后面的前景理论,可以知道对购电商来说,固定成本只是导致购电商的最低收益目标 U_{\min}^r 增大一个固定值),以批发价格 w 从发电商购买电量 q ,以零售价格 p 卖给消费者。市场需求 x 是一个非负的、连续的随机变量,且 $y = x/D$,式中: D 为市场规模系数(反映市场规模大小); $y \in [1 - e, 1 + e]$, e 是市场需求风险(严格地说, y 的标准差为 $e/\sqrt{3}$,以下用市场风险代替), $1 \geq e > 0$,概率密度函数为 $f(y) = 1/2e$ 。用 Π 表示购电商利润, U 表示效用, π 表示期望利润;用上标 r 表示购电商, $*$ 表示购电商的最优策略。电量的销售价格、批发价格和购电商变动成本,有 $p > w > c' > 0$ 。

假设2:基于前景理论的核心思想,设置购电商的参照点处利润为0;人们对损失比对获得更敏感^[15]。当预计未来利润大于0时,购电商是风险规避的;而预计未来利润为0时,购电商是风险中性的;当预计未来利润小于0时,购电商则是风险追求的。图2为购电商的价值-利润的关系示意图。

由假设2得到购电商的价值函数为

$$U(\Pi) = \begin{cases} \Pi, & \Pi \geq 0 \\ \lambda \Pi, & \Pi < 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\lambda (\lambda \geq 1)$ 为购电商的风险规避程度。其中: $\lambda = 1$ 时表示风险中性购电商; $\lambda > 1$ 时表示损失规避型购电商 λ 越大表示购电商越害怕利润损失。

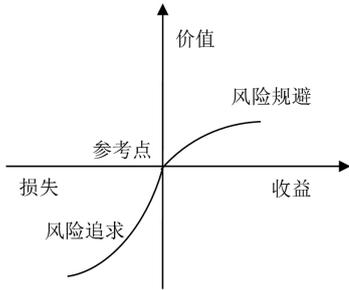


图2 购电商的价值-利润关系

对购电商来说,存在最低收益 U_{\min}^r 。如果履行合同,购电商从中获取的收益 $E(U^r)$ 至少不低于最低收益 U_{\min}^r 。为简化计算,假设 $U_{\min}^r = 0$ 。

2 模型构建

购电量为 q 时,购电商的利润为

$$\Pi^r(q) = \begin{cases} px - (w + c^r)q, & x \leq q \\ (p - w - c^r)q, & D(1 + e)x > q \end{cases} \quad (2)$$

购电商的盈亏均衡点对应的市场需求为 x^r 。令

$\Pi^r(q) = 0$, 得到 $x^r = \frac{w + c^r}{p}q$ 。令 $k = \frac{w + c^r}{p}$ 。当 $x \in$

$[0, kq]$ 时 $\Pi^r(q) < 0$; $x \in [kq, +\infty]$ 时 $\Pi^r(q) \geq 0$ 。

将 $y = \frac{x}{D}$ 和 $f(y) = \frac{1}{2e}$ 代入式(2),得到购电商期望效用为

$$\pi^r(q) = \int_0^q [px - (w + c^r)q]f(y)dx + \int_q^{D(1+e)q} (p - w - c^r)qf(y)dx \quad (3)$$

$$L^r(q) = (\lambda - 1) \int_0^{kq} [px - (w + c^r)q]f(y)dx \quad (4)$$

式中: $\pi^r(q)$ 为购电商在批发价格 w 下购电量为 q 时的期望利润; $L^r(q)$ 为购电商订货量为 q 时的期望效用损失。

购电量为 q 时,购电商的期望效用为

$$E\{U^r[\Pi^r(q)]\} = \pi^r(q) + L^r(q) \quad (5)$$

式(5)说明,损失规避性购电商的期望效用是(风险中性时的)期望利润和损失规避特性带来的期望效用损失的和。购电商的目标是给定批发价格

下,确定最优购电量使其期望效用最大。

式(5)中 $E\{U^r[\Pi^r(q)]\}$ 对 q 求一阶导数和二阶导数,简化得到

$$\frac{\partial E\{U^r[\Pi^r(q)]\}}{\partial q} = (p - w - c^r)\bar{F}\left(\frac{q}{D}\right) - (w + c^r) \cdot \left[F\left(\frac{q}{D}\right) + (\lambda - 1)F\left(\frac{kq}{D}\right) \right] \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 E\{U^r[\Pi^r(q)]\}}{\partial q^2} = -pf\left(\frac{q}{D}\right) - (\lambda - 1) \cdot (w + c^r)kf\left(\frac{kq}{D}\right) \quad (7)$$

由式(7)知道, $\frac{\partial^2 E\{U^r[\Pi^r(q)]\}}{\partial q^2} < 0$,

$E\{U^r[\Pi^r(q)]\}$ 是 q 的凹函数。式(6)中令 $\frac{\partial E\{U^r[\Pi^r(q)]\}}{\partial q} = 0$ 得到购电商最优购电量 q^* 满足

$$(p - w - c^r)\bar{F}\left(\frac{q^*}{D}\right) - (w + c^r) \cdot \left[F\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)F\left(\frac{kq^*}{D}\right) \right] = 0 \quad (8)$$

由前面市场需求定义和式(8)知道,市场风险 e 和购电商损失规避度 λ 直接影响最优购电量 q^* 。如果令 $\lambda = 1$,式(8)化为 $(p - w - c^r)\bar{F}\left(\frac{q^*}{D}\right) - (w + c^r)F\left(\frac{q^*}{D}\right) = 0$,这就是风险中性购电商的最优购电量。

3 模型分析

这里分析市场风险 e 、购电商风险规避度 λ 、批发价格 w 、零售价格 p 、购电商成本 c^r 对购电商最优购电量 q^* 的影响。

$$\text{令 } G = (p - w - c^r)\bar{F}\left(\frac{q^*}{D}\right) - (w + c^r) \cdot$$

$$\left[F\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)F\left(\frac{kq^*}{D}\right) \right] \text{ 得到}$$

$$G'_{q^*} = -D \left[\frac{p}{D}f\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)(w + c^r)\frac{k}{D}f\left(\frac{kq^*}{D}\right) \right] < 0$$

定理1: 购电商最优购电量随市场风险增大而增大。

$$\text{证明: 由于 } G'_e = \frac{p}{2e^2} \left(1 - \frac{q^*}{D} \right) + (\lambda - 1) \frac{w + c^r}{2e^2} \cdot$$

$$\left(1 - \frac{kq^*}{D} \right) > 0 \text{ 得到}$$

$$\frac{dq^*}{de} = -\frac{G'_e}{G'_{q^*}} = \frac{1}{e} \cdot \frac{p\left(1 - \frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)(w + c')\left(1 - \frac{kq^*}{D}\right)}{p + (\lambda - 1)(w + c')k} > 0$$

证毕。

市场环境中,如果价格要素不变(零售价格、批发价格、零售商变动成本),定理1中简化得到 $\frac{dq^*}{de} = \frac{Z}{e} > 0$,如图3所示。

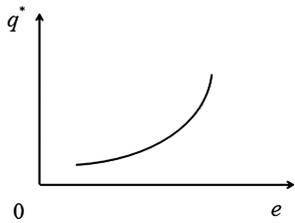


图3 价格要素不变时,购电商最优订货量与市场风险的关系

定理2:购电商最优购电量随购电商风险规避度增大而减少。

证明:由于 $G'_\lambda = -D(w + c')F\left(\frac{kq^*}{D}\right) < 0$,因此

$$\text{有} \frac{dq^*}{d\lambda} = -\frac{G'_\lambda}{G'_{q^*}} = -k \frac{kq^* - D(1 - e)}{1 + (\lambda - 1)k^2 D} < 0.$$

证毕。

当 $1 \geq e_1 > e_2 > 0$ 时,对任意的 λ_1 ,定理2结合定理1,有 $q^*(e_1, \lambda_1) > q^*(e_2, \lambda_1)$,如图4所示。

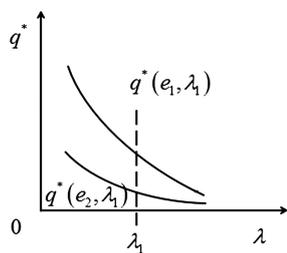


图4 价格要素不变时,购电商最优订货量与风险规避度的关系

定理3:购电商最优购电量随批发价格增大而减少。

证明:由 $G'_w = D\left[-1 - (\lambda - 1)F\left(\frac{kq^*}{D}\right) - (\lambda - 1) \cdot \frac{kq^*}{D} f\left(\frac{kq^*}{D}\right)\right]$ 得到

$$\frac{dq^*}{dw} = -\frac{G'_w}{G'_{q^*}}$$

$$= -\frac{1 + (\lambda - 1)F\left(\frac{kq^*}{D}\right) + (\lambda - 1)\frac{kq^*}{D} f\left(\frac{kq^*}{D}\right)}{\frac{p}{D} f\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)(w + c')\frac{k}{D} f\left(\frac{kq^*}{D}\right)} < 0$$

化简得到

$$\frac{dq^*}{dw} = -\frac{1}{p} \cdot \frac{2De + (\lambda - 1)(2kq^* - D + De)}{1 + (\lambda - 1)k^2} < 0$$

证毕。

当 $1 \geq e_1 > e_2 > 0$ 时,对任意的 w_1 ,定理3结合定理1,有 $q^*(e_1, w_1) > q^*(e_2, w_1)$,如图5所示。

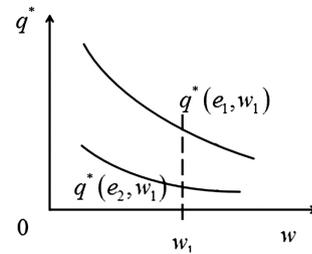


图5 购电商最优订货量与批发价格的关系

定理4:购电商最优购电量随零售价格增大而增大。

证明:由 $G'_p = D\left[\bar{F}\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)k^2 f\left(\frac{kq^*}{D}\right)\right]$,

得到

$$\frac{dq^*}{dp} = -\frac{G'_p}{G'_{q^*}} = \frac{\bar{F}\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)k^2 f\left(\frac{kq^*}{D}\right)}{\frac{p}{D} f\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)(w + c')\frac{k}{D} f\left(\frac{kq^*}{D}\right)} > 0$$

化简得到

$$\frac{dq^*}{dp} = \frac{1}{p} \frac{D(1 + e) - q^* + (\lambda - 1)kD^2}{1 + (\lambda - 1)k^2} > 0$$

证毕。

当 $1 \geq e_1 > e_2 > 0$ 时,对任意的 p_1 ,定理4结合定理1,有 $q^*(e_1, p_1) > q^*(e_2, p_1)$,如图6所示。

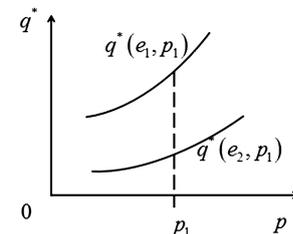


图6 购电商最优订货量与零售价格的关系

定理5:购电商最优购电量随购电商变动成本增大而减少。

证明:由于 $G'_c = -D\left[1 + (\lambda - 1)F\left(\frac{kq^*}{D}\right) + (\lambda - 1) \cdot \frac{kq^*}{D} f\left(\frac{kq^*}{D}\right)\right]$

$\frac{kq^*}{D} f\left(\frac{kq^*}{D}\right)$ 因此有

$$\frac{dq^*}{dc^r} = -\frac{G'_{c^r}}{G'_{q^*}}$$

$$= -\frac{1 + (\lambda - 1)F\left(\frac{kq^*}{D}\right) + (\lambda - 1)\frac{kq^*}{D}f\left(\frac{kq^*}{D}\right)}{\frac{p}{D}f\left(\frac{q^*}{D}\right) + (\lambda - 1)(w + c^r)\frac{k}{D}f\left(\frac{kq^*}{D}\right)} < 0$$

证毕。

当 $1 \geq e_1 > e_2 > 0$ 时,对任意的 c^r_1 ,定理5结合定理1,有 $q^*(e_1, c^r_1) > q^*(e_2, c^r_1)$,如图7所示。

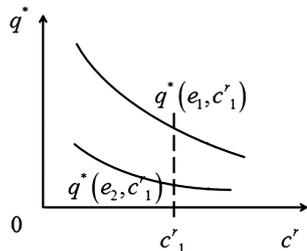


图7 购电商最优订货量与零售价格的关系

此外,由于 $\frac{dq^*}{dc^r} = \frac{dq^*}{dw}$,说明单位批发价格增加

导致的最优购电量减少量与购电商单位变动成本增加是一样的。

4 结 语

在电力行业的市场化运营中,市场需求的确定性和风险偏好直接影响到购电商的决策。研究基于用电户随机需求构建购电商决策模型,用前景理论刻画购电商的风险规避度,为购电商提供最优决策。结论表明购电商最优购电量随市场风险或零售价格的增大而增大;购电商最优购电量随购电商风险规避度、批发价格或销售变动成本增大而减少。以上结论为电力体制改制背景下的电力企业最优决策提供了理论参考。

参考文献

[1] 万英. 电力供应链管理研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2008, 8(2): 114-117.
[2] 叶春, 冯非. 电力供应链风险的识别与防范[J]. 中国电业, 2006, (11): 54-55.
[3] 龚迅, 李扬, 王蓓蓓, 等. 基于整体利润的电力供应链

激励机制[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 58-62.
[4] 张少华, 方勇, 李渝曾. 一种激励相容的发电市场竞争价机制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 27-31.
[5] 张少华, 方勇, 李渝曾. 电力市场中的激励性机制设计[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 52-56.
[6] 谢俊, 陈星莺. 激励相容的输配分开电力市场竞争价机制初探[J]. 电网技术, 2006, 30(8): 60-64.
[7] 龚迅, 李扬, 王蓓蓓, 等. 电力供应链的收益风险研究[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 11-15.
[8] 方勇, 张少华, 李渝曾. 一种激励相容的电力市场中断负荷管理合同模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 23-26.
[9] 方勇, 李渝曾. 电力市场中激励性可中断负荷合同的建模与实施研究[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 41-46.
[10] 杨强, 蔡华祥, 严明辉, 等. 基于激励相容与深度博弈的云南电力市场机制设计及应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(24): 27-34.
[11] 周明, 聂艳丽, 李庚银, 等. 电力市场下长期购电方案及风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(6): 118-124.
[12] 王绵斌, 谭忠富, 曹福成, 等. 输配分开环境下供电公司购电风险的优化控制模型[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 184-190.
[13] 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.
[14] 郭兴磊, 张宗益, 亢娅丽, 等. 基于 CVaR 模型的大用户直购电决策分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(18): 32-37.
[15] Kahneman D, Tversky A. Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk [J]. Econometrica, 1979, 47(2): 263-291.
[16] Wang C, Webster S. The Loss-averse Newsvendor Problem [J]. Omega, 2009, 37(1): 93-105.
[17] 潘俊涛, 彭建春, 孙芊, 等. 基于前景理论的发电商电量分配策略[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 170-175.
[18] 吴杨, 杨超, 赵志强. 基于前景理论的混合发电权交易匹配模型[J]. 系统工程, 2017(11): 58-67.

作者简介:

严 磊(1983), 工程硕士、工程师, 研究方向为科技情报咨询、科技管理、技术标准管理。

(收稿日期: 2018-11-01)