

一种激励相容的用户需求订购模型

沙泉^{1,2}, 张少华¹

(1. 上海大学自动化系, 上海 200072; 2. 上海应用技术学院轨道交通学院, 上海 201418)

摘要: 用户基准负荷(CBL)是实施激励性补偿驱动的需求响应(DR)项目的关键因素之一. 由于信息不对称, 传统的基于历史数据的用户基准负荷估计会导致操纵问题, 从而影响需求响应项目的经济效率. 基于机制设计理论, 引入类型参数来描述用户的用电需求意愿; 提出了信息不对称环境下, 供电公司考虑用户参与约束和激励相容约束的需求订购模型及其求解方法, 该模型能激励用户披露真实的基准负荷信息. 最后通过算例仿真验证了所提出模型的有效性和合理性.

关键词: 需求响应; 用户基准负荷; 需求订购; 激励相容; 机制设计

中图分类号: TP734

文献标志码: A

Incentive compatible model for customer demand subscription

SHA Quan^{1,2}, ZHANG Shao-hua¹

(1. Department of Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China; 2. School of Railway Transportation, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China. Correspondent: ZHANG Shao-hua, E-mail: eeshzhang@staff.shu.edu.cn)

Abstract: A critical element for the incentive-based demand response(DR) programs is the determination of customer baseline load(CBL). Due to the informational asymmetry, traditional CBL estimation methods based on historical data may cause manipulation problems, which have negative impacts on the efficiency of DR programs. Therefore, a demand subscription model with informational asymmetry is presented based on the mechanism design theory. In this model, customers' type parameters are introduced to describe their different willingness to increase load demand, and the individual rationality and incentive compatibility constraints are also taken into account. In addition, the solution method for the model is developed. The proposed model can lead customers to voluntarily reveal their true CBL information. A numerical example is presented to verify the effectiveness and reasonableness of the proposed model.

Key words: demand response; customer baseline load; demand subscription; incentive compatibility; mechanism design

0 引言

为了改进电力市场的经济效率和运行可靠性, 全世界推行了各种形式的需求响应(DR)措施. DR是指电力用户针对市场价格信号或者激励机制做出响应, 并改变其正常电力消费模式的行为^[1-2]. 欧美等国家的实践表明^[3-4]: DR对于改善电力市场的经济效率和运行可靠性具有重要的作用和潜力. 并且, 随着风力发电等间歇性新能源的快速发展, 以及对电力系统灵活性和互动性要求的提高, DR已成为当今智能电网建设的重要组成部分^[5].

文献[1-2]从DR的主要驱动方式出发, 把DR分为由市场价格驱动的DR和由激励性补偿驱动的DR:

为了缓解高峰负荷时的供电紧张状况, 前者主要通过提高电价来减少用电; 后者主要通过经济补偿政策, 激励用户削减其正常用电负荷(或称用户基准负荷, CBL). 实施激励性补偿驱动的DR需要确定CBL和补偿价格. 用户基准负荷属于用户的私人信息, 供电公司(DR实施方)一般无法准确获知, 目前实践中通常采用历史数据统计方法^[6], 如历史匹配日小时平均负荷法和统计回归法^[7], 这可能带来逆向选择和道德风险问题^[8-10], 从而影响DR项目的经济效率. 针对以上问题, 文献[8-10]提出了用户需求订购的思想, 即用户与供电公司以双边合同形式, 事先确定CBL和相应的支付. 然而, 需求订购合同中如何激励

收稿日期: 2012-12-31; 修回日期: 2013-03-07.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70871074); 上海大学“十一五”211建设项目.

作者简介: 沙泉(1974—), 女, 博士生, 从事电力系统需求响应理论的研究; 张少华(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统可靠性、需求侧管理与电力市场等研究.

用户披露真实用电需求信息以保证 DR 项目的经济效率是一个值得研究的重要问题。

机制设计理论能解决在信息不对称环境下代理人的真实信息披露问题,因此,该理论在电力市场竞争策略、事后定价机制、可中断负荷电价设计和水电站参与市场竞争等领域得到较多的应用^[11-16]。本文基于机制设计理论,提出了一个能激励用户披露真实用电需求信息的激励相容的需求订购模型,并通过算例分析验证了该模型的有效性。

1 激励相容的用电需求订购模型

考虑在未来某一时段 t (1h) 内某一实际用户参与供电公司的需求订购合同。在信息不对称情况下,该合同机制不仅需要用户愿意参与需求订购,并且用户在披露真实用电需求意愿时能够获得最大利润,即具有激励相容特性。

1.1 模型假设

电力用户的用电特性在一定程度上可通过用电效用函数来描述^[12]。通常情况下,用电效用不仅与用电量有关,同时也与用户的用电效率等因素有关。为了统一描述不同类型用户的不同用电特性,设在某一时段用户的效用函数为 $U(\theta, q)$ 。其中: q 为用户在该时段的用电量; θ 为用户类型参数,用于区分不同类型用户的不同用电效率,并且 θ 越大,用户的用电效率越高。

合理的用户效用函数 $U(\theta, q)$ 应满足如下特性:

性质 1 效用函数为用电量 q 的非减函数,其边际效用函数非负,即

$$\partial U(\theta, q) / \partial q \geq 0. \quad (1)$$

性质 2 边际效用函数非增,即

$$\partial^2 U(\theta, q) / \partial q^2 \leq 0. \quad (2)$$

性质 3 对于给定用电量 q , 具有较大类型参数的用户其效用也较大,即

$$\partial U(\theta, q) / \partial \theta > 0. \quad (3)$$

性质 4 用电量为 0 时效用为 0, 即

$$U(\theta, 0) = 0. \quad (4)$$

根据以上性质,本文假设在时段 t , 各类用户的效用函数描述为

$$U(\theta, q) = \theta(k_1 q - 0.5k_2 q^2). \quad (5)$$

其中: k_1, k_2 为大于 0 的常数,用户类型 $\theta \in (0, 1)$ 。由式 (5) 可以得到用户的用电边际效用函数

$$p(\theta, q) = \theta(k_1 - k_2 q). \quad (6)$$

在用户理性的用电量范围内,有 $p(\theta, q) > 0$, 即 $q < k_1/k_2$ 。

类型参数为用户私人信息,供电公司一般无法准确获知。假设供电公司估计的用户类型参数服从 $[\underline{\theta}, \bar{\theta}]$

上的已知概率分布,其概率密度函数为 $f(\theta)$, 分布函数为 $F(\theta)$ 。

假设在时间段 t , 供电公司为用户设计的用电订购量为 $q(\theta)$, 需要支付给供电公司的购电费用为 $R(\theta)$, 则当用户选择属于自己真实的用户类订购合同(即披露真实类型参数或用电需求意愿)时,用户的收益为

$$\pi(\theta, q(\theta), R(\theta)) = U(\theta, q(\theta)) - R(\theta). \quad (7)$$

如果真实类型参数为 θ 的用户选择了供电公司为用户设计的订购合同 $(q(\xi), R(\xi))$, 即用户没有披露自己的真实用电需求信息,则此时用户的收益为

$$\pi(\theta, q(\xi), R(\xi)) = U(\theta, q(\xi)) - R(\xi). \quad (8)$$

假设供电公司在时间段 t 从批发市场购电的价格为 λ , 通过与用户签订需求订购合同, 供电公司的期望利润为

$$\pi_0 = \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} (R(\theta) - \lambda q(\theta)) f(\theta) d\theta. \quad (9)$$

1.2 供电公司的优化模型

供电公司制定需求订购合同时的决策变量为用户的订购电量 $q(\theta)$ 和支付费用 $R(\theta)$, 目标为使其获得的期望利润最大, 即

$$\max_{q(\theta), R(\theta)} \pi_0 = \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} (R(\theta) - \lambda q(\theta)) f(\theta) d\theta. \quad (10)$$

为鼓励用户参与需求订购, 供电公司为用户提供的订购合同 $(q(\theta), R(\theta))$ 必须满足如下个人理性条件(或称用户参与约束):

$$\pi(\theta, q(\theta), R(\theta)) \geq 0. \quad (11)$$

为鼓励用户披露真实信息, 供电公司提供的订购合同必须满足如下激励相容条件:

$$\pi(\theta, q(\theta), R(\theta)) \geq \pi(\theta, q(\xi), R(\xi)), \quad \xi \in [\underline{\theta}, \bar{\theta}], \quad \xi \neq \theta. \quad (12)$$

1.3 模型求解

对于用户参与约束 (11) 中用电意愿最小的用户(用户类型参数为 $\underline{\theta}$), 可令其具有保留效用 U_0 (对于理性的供电公司, 应使用户具有一定的保留效用, 以吸引其参与需求订购), 即

$$\pi(\underline{\theta}, q(\underline{\theta}), R(\underline{\theta})) = U(\underline{\theta}, q(\underline{\theta})) - R(\underline{\theta}) = U_0, \quad (13)$$

可得

$$R(\underline{\theta}) = \int_0^{q(\underline{\theta})} p(\underline{\theta}, x) dx - U_0. \quad (14)$$

激励相容约束 (12) 等价于在 $q(\xi) = q(\theta)$, $R(\xi) = R(\theta)$ 时, 收益函数 $\pi(\theta, q(\xi), R(\xi))$ 取得最大值, 即

$$\pi(\theta, q(\theta), R(\theta)) = \max_{q, R} \pi(\theta, q(\xi), R(\xi)). \quad (15)$$

由包络定理^[17], 对于含变量的函数最大化问题, 函数在最优解处对变量的导数等于函数对变量的偏导数。因此, 可以得到

$$d\pi(\theta, q(\theta), R(\theta))/d\theta = \partial\pi(\theta, q(\theta), R(\theta))/\partial\theta. \quad (16)$$

由式(7), 式(16)可化为

$$d\pi(\theta, q(\theta), R(\theta))/d\theta = k_1q(\theta) - 0.5k_2q^2(\theta). \quad (17)$$

设 $V(\theta) = k_1q(\theta) - 0.5k_2q^2(\theta)$, 由于

$$V(\theta) = \frac{1}{\theta} \int_0^{q(\theta)} p(\theta, x)dx \geq 0, \quad (18)$$

函数 $\pi(\theta, q(\theta), R(\theta))$ 是关于类型参数 θ 递增的. 因此, 当具有最低类型参数 $\underline{\theta}$ 的用户收益满足非负时, 其他类型用户也将具有非负的收益, 即其他类型用户也满足参与约束(11).

对式(17)两边进行积分, 可得

$$\pi(\theta, q(\theta), R(\theta)) - \pi(\underline{\theta}, q(\underline{\theta}), R(\underline{\theta})) = \int_{\underline{\theta}}^{\theta} V(\theta)d\theta. \quad (19)$$

由式(13), 式(19)可化为

$$\pi(\theta, q(\theta), R(\theta)) = \int_{\underline{\theta}}^{\theta} V(\theta)d\theta + U_0. \quad (20)$$

将式(20)代入(7), 可得

$$R(\theta) = \theta V(\theta) - \int_{\underline{\theta}}^{\theta} V(\theta)d\theta - U_0. \quad (21)$$

将式(21)代入(9), 供电公司期望利润为

$$\pi_0 = \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} [\theta V(\theta) - U_0 - \lambda q(\theta)]f(\theta)d\theta - \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} f(\theta) \int_{\underline{\theta}}^{\theta} V(u)du d\theta. \quad (22)$$

对式(22)右边第2项交换积分次序, 得

$$\begin{aligned} \pi_0 &= \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} [\theta V(\theta) - U_0 - \lambda q(\theta)]f(\theta)d\theta - \\ &\int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} V(\theta) \int_{\theta}^{\bar{\theta}} f(u)du d\theta = \\ &\int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} [\theta V(\theta) - U_0 - \lambda q(\theta)]f(\theta)d\theta - \\ &\int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} V(\theta)[1 - F(\theta)]d\theta, \end{aligned} \quad (23)$$

即, 供电公司期望利润为

$$\pi_0 = \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} \{[\theta V(\theta) - U_0 - \lambda q(\theta)]f(\theta) - V(\theta)[1 - F(\theta)]\}d\theta. \quad (24)$$

供电公司的期望利润最大化问题等价于式(24)中被积分项的最大化问题, 即

$$\begin{aligned} \max_{q(\theta)} H &= \\ &[\theta V(\theta) - U_0 - \lambda q(\theta)]f(\theta) - V(\theta)[1 - F(\theta)]. \end{aligned} \quad (25)$$

H 对 $q(\theta)$ 的一阶导数为

$$\begin{aligned} dH/dq &= \\ &[\theta f(\theta) - 1 + F(\theta)] \times [k_1 - k_2q(\theta)] - \lambda f(\theta). \end{aligned} \quad (26)$$

取 H 对 $q(\theta)$ 的一阶导数为0, 可得

$$q(\theta) = k_1/k_2 - \lambda f(\theta)/(k_2[\theta f(\theta) - 1 + F(\theta)]). \quad (27)$$

由假设条件可知, 在用户理性的用电量范围内, $q < k_1/k_2$, 因此由式(27)可得

$$k_2[\theta f(\theta) - 1 + F(\theta)] > 0. \quad (28)$$

H 对 $q(\theta)$ 的二阶导数为

$$d^2H/dq^2 = -k_2[\theta f(\theta) - 1 + F(\theta)]. \quad (29)$$

由式(28)可知, H 对 $q(\theta)$ 的二阶导数小于0. 因此, 式(27)给出了供电公司获得最大期望利润时的用户需求订购量, 再由式(21)可得相应的用户支付.

2 算例仿真

2.1 激励相容特性的验证

考虑某个用户参与未来某一时间段(1h)的用电需求订购, 用户的真实类型参数为0.5, 供电公司估计的用户类型参数服从[0.4, 0.65]的均匀分布. 假定在该时段, 用户边际效用函数中的系数 $k_1 = 10$ \$/kWh, $k_2 = 0.02$ \$/(kWh)², 供电公司从批发市场购电的价格为0.5 \$/kWh.

图1为用户根据供电公司设计的需求订购合同上报不同类型时的收益曲线. 从图1中可以看出, 用户只有在上报真实类型0.5时, 才能获得最大收益, 因此该订购合同具有激励相容特性, 能鼓励用户披露真实的用电需求信息.

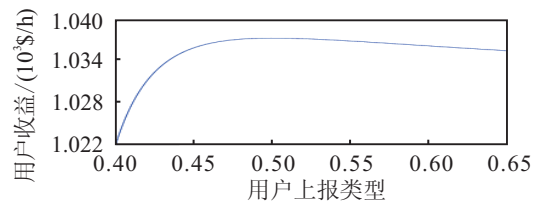


图1 用户收益随其披露的类型参数变化曲线

2.2 用户类型参数的影响

为了研究用户参数类型对需求订购合同的影响, 考察某个具有真实类型 θ 的用户. 供电公司估计该用户的类型参数服从区间 $[\theta - 0.05, \theta + 0.05]$ 上的均匀分布. 假定在该时段, 用户边际效用函数中的系数为 $k_1 = 10$ \$/kWh, $k_2 = 0.02$ \$/(kWh)², 供电公司从批发市场购电的价格为0.5 \$/kWh.

图2给出了该用户的订购量和平均订购价(用户订购合同支付与订购量的比值)随其真实类型参数 θ 变化的结果. 由图2可知, 随着用户类型参数的增加, 用户的订购量和平均订购价也会随之增加, 即对于较高用电效率的用户, 供电公司会提供较高的订购量, 同时也会收取较高的平均订购价格.

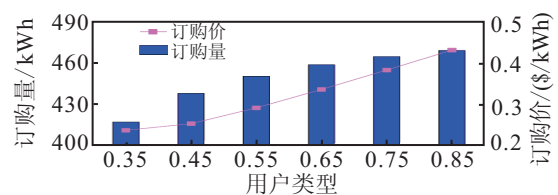


图2 用户类型参数对需求订购合同的影响

2.3 用户类型参数概率分布的影响

为了研究供电公司估计的用户类型参数概率分布对结果的影响, 考察具有相同真实类型参数(0.7)的用户1和用户2. 供电公司估计用户1的类型参数服从区间[0.6, 0.8]上的均匀分布, 用户2的类型参数服

从相同区间上的正态分布,其中均值 $\mu = 0.7$,方差 $\delta^2 = 0.07^2$.假设在该时段,用户边际效用函数中的系数为 $k_1 = 3.5 \text{ \$/kWh}$, $k_2 = 0.02 \text{ \$/kWh}$,供电公司从批发市场购电的价格为 $0.5 \text{ \$/kWh}$.

表1给出了供电公司为用户设计的订购合同.从表1中可以看出:对于信息相对清晰的用户2,供电公司设计的订购量和订购价都相对较大;对于信息相对模糊的用户1,供电公司会减少用户的订购量,同时为了激励用户披露真实信息,供电公司需要提供相对较多的激励费用,导致用户1的收益高于用户2.

表1 类型概率分布对需求订购合同的影响

用户	订购量/kWh	订购价/(\\$/kWh)	收益/(\\$/h)
1	133.33	0.406	148.02
2	135.04	0.418	146.79

3 结 论

本文研究了供电公司设计需求订购合同时激励用户自愿披露真实用电需求(基准负荷)的问题.采用机制设计理论,引入用户类型参数来描述用户的用电需求意愿,在信息不对称条件下,给出了供电公司考虑用户参与约束和激励相容约束的需求订购优化模型,并提出了该模型的求解方法.算例仿真表明,该需求订购模型具有激励用户自愿披露真实用电需求信息的激励相容特性,即用户选择属于自己真实类型的订购合同时,能够获得最大利润.另外,供电公司对用户类型信息的认知程度直接影响订购合同.该模型有助于改善智能电网环境下需求响应项目的经济效率.

参考文献(References)

[1] Albadi M H, El-Saadany E F. A summary of demand response in electricity markets[J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(11): 1989-1996.

[2] 张钦,王锡凡,王建学,等.电力市场下需求响应研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(3): 97-106.
(Zhang Q, Wang X F, Wang J X, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(3): 97-106.)

[3] Cappers P, Goldman C, Kathan D. Demand response in U.S. Electricity markets: empirical evidence[J]. *Energy*, 2010, 35(4): 1526-1535.

[4] Torriti J, Hassan M, Leach M. Demand response experience in Europe: Policies, programmes and implementation[J]. *Energy*, 2010, 35(4): 1575-1583.

[5] 张钦,王锡凡,付敏,等.需求响应视角下的智能电网[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(17): 49-55.
(Zhang Q, Wang X F, Fu M, et al. Smart grid from the perspective of demand response[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(17): 49-55.)

[6] Coughlin K, Piette M, Goldman C, et al. Statistical analysis of baseline load models for non-residential buildings[J]. *Energy & Buildings*, 2009, 41(4): 374-381.

[7] Goldberg M. Measure twice, cut once[J]. *IEEE Power & Energy Magazine*, 2010, 8(3): 46-54.

[8] Bushnell J, Hobbs B, Wolak F. When it comes to demand response, is FERC its own worst enemy?[J]. *The Electricity J*, 2009, 22(8): 9-18.

[9] Chao H. Price-responsive demand management for a smart grid world[J]. *The Electricity J*, 2010, 23(1): 1-14.

[10] Chao H. Demand response in wholesale electricity markets: The choice of customer baseline[J]. *J of Regulatory Economics*, 2011, 39(1): 68-88.

[11] Silva C, Wollenberg B F, Zheng C Z. Application of mechanism design to electric power markets[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2001, 16(4): 862-869.

[12] Fahrioglu M, Alvarado F L. Designing incentive compatible contracts for effective demand management[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2000, 15(4): 1255-1260.

[13] 许蔚.考虑可中断负荷的备用辅助服务交易与定价问题研究[D].北京:北京交通大学电气工程学院,2010: 86-88.
(Xu W. The study of reserve ancillary service trading and pricing considering interruptible load[D]. Beijing: School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, 2010: 86-88.)

[14] 林华.实时电力市场事后定价机制研究[D].上海:上海交通大学电子信息与电气工程学院,2010: 22-32.
(Lin H. Study on ex-post pricing mechanism of real time power market[D]. Shanghai: School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, 2010: 22-32.)

[15] 谢俊.输配分开电力市场环境下供电公司竞价策略的研究[D].南京:河海大学电气工程学院,2007: 52-63.
(Xie J. Research on bidding strategies of distribution companies in transmission and distribution separated electricity markets[D]. Nanjing: School of Electrical Engineering, Hehai University, 2007: 52-63.)

[16] 韩冰.水电站参与市场竞争的代理机制设计[D].北京:华北电力大学,2008: 37-50.
(Han B. The agency mechanism design of hydropower stations in electricity market[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2008: 37-50.)

[17] 张军.高级微观经济学[M].北京:清华大学出版社,2005: 30-32.
(Zhang J. *Advanced Microeconomics*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005: 30-32.)