

存在无智能电表用户的实时定价研究

金子琪, 高岩

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 研究了智能电网普及应用过程中同时存在有智能电表用户和无智能电表用户的实时定价问题。首先考虑供电商在保证电网稳定运行及自身的经济效益的同时要兼顾两类用户效用。然后建立无智能电表用户的用电规划函数和无智能电表用户群体的福利函数, 并提出一主多从的斯塔克尔伯格博弈模型。最后将该模型运用在供电商原有的两种定价机制上, 通过数值模拟得出均衡解并通过模型对比验证模型的合理性。结果表明, 该博弈模型可有效地对无智能电表用户群体进行需求侧管理, 既满足了削峰填谷的目的, 又最大化地实现社会福利, 同时可以更好地处理突增用电需求的情况, 稳定电网的同时提高用户效用, 以更符合我国国情。

关键词: 智能电网; 实时定价; 分类用户; 斯塔克尔伯格博弈

中图分类号: F 426 **文献标志码:** A

Real-time pricing of customers without smart meters

JIN Ziqi, GAO Yan

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Optimal dynamic pricing for mixed customers with and without smart meters was studied under the background of the smart grid popularization and application. First, the power supplier took into account the utility of two types of users while ensuring the stable operation of the power grid and their own economic benefits. Then, a power consumption planning function and welfare function of users without smart meters were established, and a Stackelberg game model with one master and multiple slaves was proposed. Finally, the model was applied to the original two pricing mechanisms of power suppliers, and the equilibrium solution was obtained by numerical simulation, and the rationality of the model was verified by comparative experiments. It is verified that the game model can effectively carry out demand side management for users without smart meters, which can not only cut peak and fill valley, but also maximize social welfare. At the same time, it can better deal with sudden increase of power demand than previous relevant research, stabilize the power grid and improve the user utility, which is more in line with China's national conditions.

Keywords: smart grid; real-time pricing; classified users; Stackelberg game

收稿日期: 2020-07-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72071130)

第一作者: 金子琪(1993-), 女, 硕士研究生。研究方向: 智能电网的实时定价。E-mail: jinziqi007@163.com

通信作者: 高岩(1962-), 男, 教授。研究方向: 系统工程、非光滑优化等。E-mail: gaoyan@usst.edu.cn

目前电力需求的快速增长和新型能源对天气的依赖致使现代社会电力系统的供应与需求不平衡, 严重影响了电力系统的安全、高效运行。传统的电力系统主要从供给侧角度解决不平衡问题, 然而这种方式无法从根本上实现电力系统的稳定。智能电网作为一种高度信息化的电网系统, 推动了需求侧管理(demand side management, DSM)的发展。需求侧管理即供给侧与需求侧共同协作管理电力系统, 以提高供电的稳定性、灵活性和安全性^[1-3]。需求响应(demand response, DR)作为需求侧管理的有效方法, 是指需求方接收到供给方发出的诱导性信号, 从而改变其固有的用电模式以响应电力供应, 保障电网稳定的短期行为, 也是智能电网的重要组成部分^[4-6]。在需求响应机制中, 价格响应的应用最为广泛, 其特征是以随时间变化的电价作为响应信号, 促使用户改变其用电量^[7]。需求响应不仅可以降低发电成本, 同时还可以减少用户的电费, 让用户更合理地分配用电时间, 既满足了削峰填谷的目的, 也为电网的实时运行增添了可靠性和稳定性^[8]。

电力市场定价机制主要包括固定电价、分时电价、关键峰荷电价和实时电价^[9-10]。实时电价是指电能产生的瞬时电价, 因其具有实时性而被广泛认为是最为合理的定价机制^[11-12]。目前关于需求响应下实时电价的研究方法主要可以分为两类: 基于博弈分析理论和基于优化分析理论^[13-14]。基于博弈分析理论通常是供电商与用户之间基于电价的相互博弈, 最终达到稳定平衡的一种理论方法^[15]; 基于优化分析理论则通常是以社会福利最大化为模型, 通过优化算法求得影子价格, 并以此作为社会最优配置的实时价格^[16]。

有关智能电网普及应用的研究已有相当多的成果, 然而, 对智能电网普及过程中存在的智能电表未全面安装时的实时定价问题的研究文献却较少。目前文献[17]提出安装智能电表与未安装智能电表用户同时存在时的实时定价问题, 文献[17]中供电商通过对以往信息的归纳, 估算出无智能电表用户整体的以价格为变量的用电量函数, 同时通过智能电表获得有智能电表用户关于价格的参数, 从而获得两类用户以价格为变量的用电量函数, 并提前1天计算和公布以供电商利润最大化为目标得出的各时段的最优电价, 以保证两类用户均能响应需求侧管理, 同时又能使供

电商自身利益最大化。由于是提前1天进行次日的全天规划, 并不能准确满足第2天的实时用电需求, 对于整个电网系统来说容错率太低, 面对一些突增需求或是特殊需求, 就会导致电网的不稳定, 有悖于稳定电网的目标, 同时以供电商利益最大化为目标, 降低了用户的一部分利益。

本文基于文献[17]考虑同时存在有智能电表和无智能电表两类用户, 以供电商为领导者、有智能电表用户为跟随者, 建立斯塔克尔伯格博弈模型。领导者(供电商)通过智能电表获知有智能电表用户的反应函数, 再以社会福利最大化为目标, 得到一个更符合国内实情且较为稳定的实时电价。

1 效用模型

假设在智能电网系统中仅有一个电能供应商和两类不同的用户(有智能电表用户和无智能电表用户)。对于有智能电表用户, 其配备的智能电表具有收集和控制用户用电信息的功能, 同时可与供电商和其他用户进行实时信息交流, 所以, 有智能电表用户可通过智能电表根据实时情况制定用电量^[18]。而无智能电表用户无法实时获得信息, 但会预先了解供电商公布的分时价格, 假设无智能电表用户为有限理性人, 他们会根据供电商预先公布的各时段电价制定下一日的最优基础用电量^[19], 之后再视自身情况决定是否改变其用电量。

将一天的用电时间分为 k_1 个时间段, 记 K 为所有时段的集合 $K = \{1, 2, \dots, k_1\}$ 。将该系统中的两类用户分别用 $D = \{1, 2, \dots, n_1\}$ 表示有智能电表用户的集合, $S = \{1, 2, \dots, n_2\}$ 表示无智能电表用户的集合。用 $x_{i,k}, y_{j,k}(i \in D, j \in S, k \in K)$ 分别表示第 i 个有智能电表的用户和第 j 个无智能电表的用户在第 k 个时段的实际用电量。

1.1 有智能电表用户的福利模型

在社会福利模型中, 通常采用效用函数来描述居民对用电的满意度。效用函数应具有随着用电量增加效用逐步增多、边际效用递减的特点。有智能电表用户的效用^[19-20]

$$U(x, \omega) = \begin{cases} \omega x - \frac{\alpha}{2} x^2, & 0 \leq x \leq \frac{\omega}{\alpha} \\ \frac{\omega^2}{2\alpha}, & x > \frac{\omega}{\alpha} \end{cases} \quad (1)$$

式中: α, ω 为预设参数; x 为用户的用电量;

$U(x, \omega)$ 满足 $\frac{\partial U(x, \omega)}{\partial \omega} > 0$, $U(0, \omega) = 0, \forall \omega > 0, \alpha > 0$ 。

除上述用电本身带来的效用外, 用电产生的费用也会使居民的效用改变, 在该用电效用函数的基础上应同时考虑电费产生的负效用^[7]。假设每个用户的行为是独立的, 他们对电费的敏感度也不同, 通过参数 β_i 描述用户 i 对电费的敏感度, 则第 i 个有智能电表用户在第 k 个时段由于电费产生的负效用

$$B(x_{i,k}, \beta_i) = -\beta_i p_k x_{i,k} \quad (2)$$

式中, p_k 为供电商在 k 时段发布的实时电价。

则有智能电表用户的福利效用

$$W_1(x, \omega, \beta) = \omega x - \frac{\alpha}{2} x^2 - \beta p x, \quad 0 \leq x \leq \frac{\omega}{\alpha} \quad (3)$$

将第 i 个有智能电表用户在第 k 个时段的福利效用记为 $W_1(x_i, \omega_i, \beta_i)$ 。

1.2 无智能电表用户的福利模型

由于供电商与无智能电表用户不能实时地进行信息交换, 从而使供电商难以获得各个无智能电表用户的具体参数, 但供电商可通过历史信息模拟出无智能电表用户群体的整体数据参数, 并设计预估模型。

无智能电表用户因无法实时接收各个用户的用电信息和供电商发布的实时电价, 从而无法根据实时情况智能地控制用电量。然而, 无智能电表用户并非完全不了解供电商的实时定价机制, 无智能电表用户可以根据供电商预先公布的各时段价格设定下一日的基础用电量, 并根据下一日的实时电价人为地改变自身用电量。所以, 假设无智能电表用户群体中会有一部分用户倾向于根据供电商公布的实时价格人为变更用电量, 而这一部分用户的比例随用电峰谷而变化。

假设无智能电表用户根据供电商预先公布的各时段电价通过式(4)制定下一日的各时段用电量^[17]:

$$\bar{y}_k = \gamma_k + \theta_{k,1} \bar{p}_1 + \cdots + \theta_{k,k-1} \bar{p}_{k-1} \quad (4)$$

式中: γ , θ 均为可根据历史信息得出的预设参数; $\bar{p}_k$ 为供电商预先公布的 k 时段的电价, $k \in K$; $\theta_{k,k} < 0$, $\theta_{k,c} > 0$ ($c \neq k, c \in K$) 且满足 $\theta_{k,k} + \sum_{c=1, c \neq k} \theta_{k,c} < 0$ ^[17]。

因式(4)中各个参数均为预先给定, 所以, 无智能电表用户 j 在各时段均有一个固定的原定用电量 $\bar{y}_{j,k}$, 同时会有一个固定的既有用电效用 $\bar{w}_{j,k}$, 将无智能电表用户群体在 k 时段的原定用电量和记为 $\bar{Y}_k$, 在 k 时段既有效用和记为 $\bar{W}_k$ 。

然而, 在实时定价机制中, 预先设定的用电量并不是基于实际价格的最优用电量, 当 k 时段的电价变动, 且在其他时段电价不变的条件下, 有意愿且能人为地改变用电量的无智能电表用户在 k 时段的用电变化量

$$\hat{y}_k = \theta_{k,k}(p_k - \bar{p}_k) \quad (5)$$

$\hat{y}_{j,k}$ 表示无智能电表用户 j 在 k 时段的最优用电量与原定用电量的差值。

在上述假设中, 无智能电表用户并不是全体均有意愿并有能力时刻人为地变更用电量, 而在这一部分不愿意或无能力变更的用户中, 实际用电量即为原定用电量, 当最优用电量与实际用电量有偏差时, 会产生用电量的偏差效用

$$M(\theta_{k,k}, \rho) = -\rho(y_k - \bar{y}_k)^2 = -\rho[\theta_{k,k}(p_k - \bar{p}_k)]^2 \quad (6)$$

式中: y_k 为无智能电表用户的实际用电量; ρ 表示无智能电表用户对用电偏差的厌恶度; $M(\theta_{j,k,k}, \rho_j)$ 表示第 j 个无智能电表用户的偏差效用。有意愿并有能力改变用电量的无智能电表用户的偏差效用则为 0。

与此同时, 无智能电表用户第 k 个时段电费产生的负效用

$$B(y_{j,k}, \beta, p_k) = -\beta p_k y_{j,k} \quad (7)$$

$B(y_{j,k}, \beta_j, p_{j,k})$ 表示第 j 个无智能电表用户在第 k 个时段的电费负效用。

无智能电表用户的福利效用

$$W_2(\theta, \rho, p, \beta, y) = \bar{w} + M(\theta, \rho, y) + B(p, \beta, y) \quad (8)$$

$W_2(\theta_{j,k,k}, \rho_j, p_k, \beta_j, y_{j,k})$ 表示第 j 个无智能电表用户在第 k 个时段的福利效用。

对于无智能电表用户来说, 无智能电表用户既不能实时、智能地获得供电商公布的电价并变更用电量, 供电商也无法实时获得每户无智能电表用户的用电偏好, 但供电商可以通过历史信息估算出无智能电表用户整体对电价的敏感程度和对电价变动的厌恶度等, 进而得出无智能电表用户群体的福利效用

$$\begin{aligned} \hat{W}_2(\delta, p_k) &= \bar{W}_k - \bar{\rho} \left[\frac{(1-\delta)\bar{\theta}_{k,k}(p_k - \bar{p}_k)}{(1-\delta)n_2} \right]^2 (1-\delta)n_2 - \\ &\quad \bar{\beta} p_k [\bar{Y}_k + \delta \bar{\theta}_{k,k}(p_k - \bar{p}_k)] = \bar{W}_k - \\ &\quad \bar{\rho} \frac{(1-\delta)[\bar{\theta}_{k,k}(p_k - \bar{p}_k)]^2}{n_2} - \\ &\quad \bar{\beta} p_k [\bar{Y}_k + \delta \bar{\theta}_{k,k}(p_k - \bar{p}_k)] \approx \sum_{j \in S} W_2 \quad (9) \end{aligned}$$

式中: δ 为无智能电表用户中有意愿并有能力改变

用电量的用户占比; $\bar{\rho}, \bar{\theta}_{k,k}, \bar{\beta}$ 为预设参数; n_2 为无智能电表用户总数。

1.3 供电商利润

在现有研究中, 常以严格凸的二次函数作为供电商的成本函数^[9, 21], 供电商在 k 时段的成本

$$C(L_k) = aL_k^2 + bL_k + c \quad (10)$$

式中: a, b, c 为预设参数且 $a > 0, b \geq 0, c \geq 0$; L_k 为供电商 k 时段的供电量。

供电商利润

$$R(p_k, L_k) = p_k L_k - C(L_k) \quad (11)$$

其中,

$$L_k = \bar{Y}_k + \delta \bar{\theta}_{k,k} (p_k - \bar{p}_k) + \sum_{i \in D} x_{i,k}$$

2 斯塔克尔伯格模型

斯塔克尔伯格博弈又称主从博弈, 是一种符合我国电力市场的博弈模型。领导者实现利益最大化的过程取决于跟随者对领导者决策所作出的反应, 领导者预期跟随者在领导者既定决策下也实现利益最大化, 所以, 领导者为了作出合理决策就必须考虑跟随者利益最大化的问题^[22]。在博弈过程中, 领导者要知道跟随者的反应函数, 以确保最终达到一种双赢的均衡解。

供电商作为领导者会发布用电的实时价格, 跟随者(有智能电表用户)会根据发布的实时价格, 以满足自身效用最大化决定自己的用电需求。因为, 有智能电表用户的用电决策基于供电商的决策, 如果存在 $(\{x_{i,k}^*\}, \{p_k^*\})$ 使式(12)成立^[23-25], 则称 $(\{x_{i,k}^*\}, \{p_k^*\})$ 为博弈均衡解。

$$\begin{aligned} \forall x_{i,k} \in \{x_{i,k}\}, x_{i,k} \neq \{x_{i,k}^*\}: W_1(x_{i,k}^*, p_k^*) > W_1(x_{i,k}, p_k^*) \\ \forall p_k \in \{p_k\}, p_k \neq \{p_k^*\}: W_{\text{grid}}(x_{i,k}^*, p_k^*) > W_{\text{grid}}(x_{i,k}^*, p_k) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\{x_{i,k}^*\}$ 为各个有智能电表用户最优决策的集合; $\{p_k^*\}$ 为供电商的最优决策集合; W_1 为跟随者的目标函数; W_{grid} 为供电商的目标函数。

2.1 跟随者的反应函数

根据理性人的假设, 有智能电表用户会在已有条件下令自己的用电效用最大化。有智能电表用户 i 在 k 时段的最优用电量

$$x_{i,k}^* = \arg \max_{i \in D, k \in K} \{W_1(x_{i,k}, \omega_{i,k}, \beta_i) | x_{i,k} \geq 0\} \quad (13)$$

在效用最大化时应满足边际效用为0。

$$\frac{\partial W_1(x_{i,k}, \omega_{i,k}, \beta_i)}{\partial x_{i,k}} = 0, \quad \forall i \in D, k \in K \quad (14)$$

即有智能电表用户的反应函数

$$x_{i,k}^* = \frac{1}{\alpha} (\omega_{i,k} - \beta_i p_k), \quad \forall i \in D, k \in K \quad (15)$$

又因为

$$\frac{\partial^2 W_1(x_{i,k})}{\partial x_{i,k} \partial x_{i,r}} = \begin{cases} -\alpha, & i = r \\ 0, & i \neq r \end{cases} \quad (16)$$

即二阶 Hessian 矩阵对角线元素均为负数, 非对角线元素为0, 说明用户侧纳什均衡解存在且唯一, 同时也满足了电网系统中分布式需求响应的目的。

2.2 供电商的目标函数

在其他博弈研究中, 供电商常仅以利润最大化为目标, 而在本文中, 供电商在保障经济效益的条件下, 实现社会福利最大化, 并以此为目标制定电价, 这种定价决策更符合仅有一个供电商的电力市场, 可以最大程度地保障用户侧的福利。假设供电商对利益的追求和提高用户效用的追求的权重比为1:1, 社会福利模型则为两类用户的总效用与供电商利润之和, 供电商目标函数

$$W_{\text{grid}}(p_k) = \sum_{i \in D} W_1 + \sum_{j \in S} W_2 + R \quad (17)$$

将有智能电表用户的反应函数和 $\hat{W}_2$ 代入供电商的目标函数中, 并假设供电商供电量即为用户总用电量。

$$W_{\text{grid}}(p_k) = \sum_{i \in D} W_1^*(p_k) + \hat{W}_2(p_k) + R(p_k) \quad (18)$$

供电商作为市场领导者还须确保有智能电表用户的最佳用电量和福利效用不小于0, 则供电商的最优电价

$$p_k^* = \arg \max_{i \in D, k \in K} \{W_{\text{grid}}(p_k) | x_{i,k} \geq 0\} \quad (19)$$

其中, 对 $\forall i \in D$, 均有 $x_{i,k} \geq 0$, 即

$$\frac{1}{\alpha} (\omega_{i,k} - \beta_i p_k) \geq 0, \quad \forall i \in D, k \in K \quad (20)$$

与此同时, 供电商的发电量要在最大发电量限度内, 且供电商的利润不为负, 即边际成本小于等于实时价格。

$$L_{\min} \leq L_k \leq L_{\max}, \quad \forall k \in K \quad (21)$$

$$p_k \geq \frac{\partial C(L_k)}{\partial L_k}, \quad \forall k \in K \quad (22)$$

式中: $L_{\min}$ 为供电商发电量最低限值; $L_{\max}$ 为供电商发电量最高限值。

所以, 对 $\forall k \in K$, 供电商会最大化自己的目标

函数。

$$\begin{cases} \max W_{\text{grid}}(p_k)=\sum_{i\in D}\frac{(\omega_{i,k}-\beta_i p_k)^2}{2\alpha}+\hat{W}_2(p_k)+R(p_k) \\ \text{s.t. } p_k\geq a\left[\bar{Y}_k+\delta\bar{\theta}_{k,k}(p_k-\bar{p}_k)+\sum_{i\in D}\frac{\omega_{i,k}-\beta_i p_k}{\alpha}\right] \\ L_{\min}\leq \bar{Y}_k+\delta\bar{\theta}_{k,k}(p_k-\bar{p}_k)+\sum_{i\in D}\frac{\omega_{i,k}-\beta_i p_k}{\alpha}\leq L_{\max} \\ p_k\leq \min_{i\in D}\left(\frac{\omega_{i,k}}{\beta_i}\right) \end{cases} \quad (23)$$

式(22)是一个关于 p_k 的凹函数，且定义域为非空凸集合，则供电商存在最优解，又因为跟随者存在唯一纳什均衡解，所以，本文的斯塔克尔伯格博弈存在均衡解。

3 仿真模拟

3.1 模型参数设定

假设有智能电表用户数量 $n_1=50$ ，无智能电表用户数量 $n_2=30$ ，将一天分为24个时间段，即 $k_1=24$ ，并设定 $[6, 7, 8, 9, 16, 17, 18, 19, 20, 21]$ 为峰值时刻，其余时刻为谷值时刻。除此之外，在博弈过程中，有关用户效用和供电商的目标函数中存在一些需要提前设定的参数，经多次模拟，假定合理的参数如表1所示。

表 1 数值模拟参数值

Tab.1 Numerical values of the mathematical simulation

参数	谷时参数值	峰时参数值	参数	谷时参数值	峰时参数值
α	1/4	1/4	$\bar{\rho}$	0.5	0.5
ω	[1, 2]	[2, 3]	δ	0.1	0.5
β	[0.5, 1.5]	[0.5, 1.5]	$\bar{\beta}$	1	1
a	0.002	0.002	b, c	0	0
$\bar{\theta}_{k,k}$	-200	-100	$L_{\max}$	600	600
$L_{\min}$	0	0	$\bar{Y}_k(\text{分时})$	160	90
$\bar{Y}_k(\text{固定})$	40	200	$\bar{p}_k(\text{分时})$	0.5	1.7
$\bar{p}_k(\text{固定})$	1.1	1.1			

对 $\forall k\in K$,

$$\bar{Y}_{t+1}=\bar{Y}_t+\bar{\theta}_t(p_t-\bar{p}_t) \quad (24)$$

式中， t 为天数。

3.2 厌恶度 $\bar{\rho}$ 对实验结果的影响

从图1可以看出，无智能电表用户对价格偏

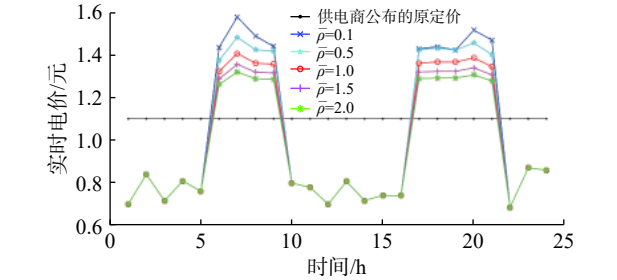


图 1 厌恶度 $\bar{\rho}$ 对实验结果的影响

Fig. 1 Effect of aversion on experimental results

差的厌恶度越高，对峰时电价的影响越大，而对谷时电价的影响较小。

3.3 模拟结果分析

将模型分别运用在供电商常用的两种定价机制上，即分别将固定电价和分时电价作为原定价，对模型进行数值模拟，选取第1天和稳定后连续2天的结果，如图2~7所示。

图2是各时段的实时电价。图2(a)以固定电价作为原定价，通过供电商与用户的信息交互，各时段价格从一个固定值不断地变化，最终稳定在一个最优值。图2(b)以分时电价作为原定价，各时段价格从过高或过低的电价经信息交互最终稳定在相对缓和的最优值。可以看出，两种定价机制模拟下的第1天价格已较为接近，在模拟的后续天数中，电价均是在前1天的基础上有轻微幅度的变化，直到价格稳定在系统最优值，从而实现实时变价以满足社会福利最大化。与此同时，两种情况下的电价稳定趋势是相同的，当价格已经稳定后两种情况下的价格浮动区间亦是相同的，说明该模型稳定后的最优电价与供电商原定价机制无关。

图3是两类用户的总用电量。图3(a)是原定价系统为固定价格的供电量，图3(b)是原定价系统为分时价格的供电量。图4为图3中的无智能电表用户的用电量。从图3(a)和图4(a)可以看出，在原定价机制为固定价格的情况下，两类用户在第1天的总用电量会有明显的削峰填谷现象，其中，以无智能电表用户更为明显。而从图3(b)和图4(b)可以看出，在原定价机制为分时电价情况下，两类用户第1天的总用电量也有削峰填谷的现象，但在第9天、第10天却形成新的用电峰谷，这是由于原过高或过低的价格迫使用户进行过多的用电转移，严重影响了用户福利。新用电峰谷的形成反而提高了用户福利，使得用户的各

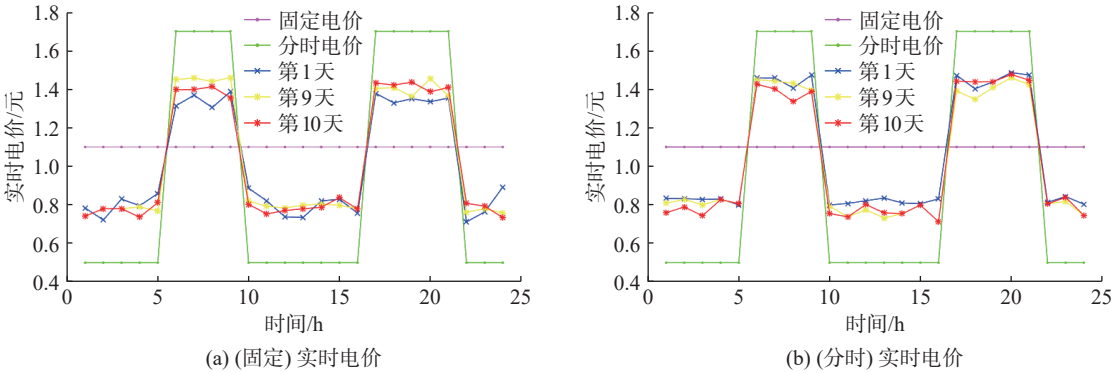


图 2 各时段的实时电价
Fig.2 Real-time electricity prices at various times

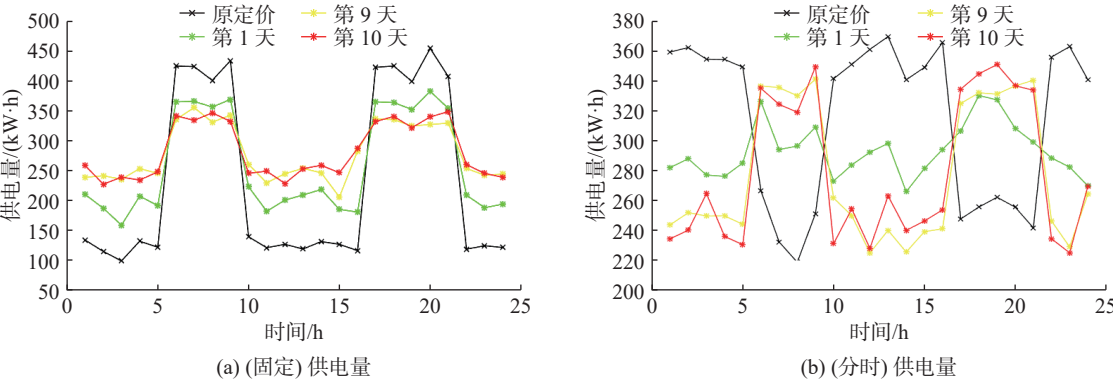


图 3 各时段供电量
Fig.3 Power supply at various times

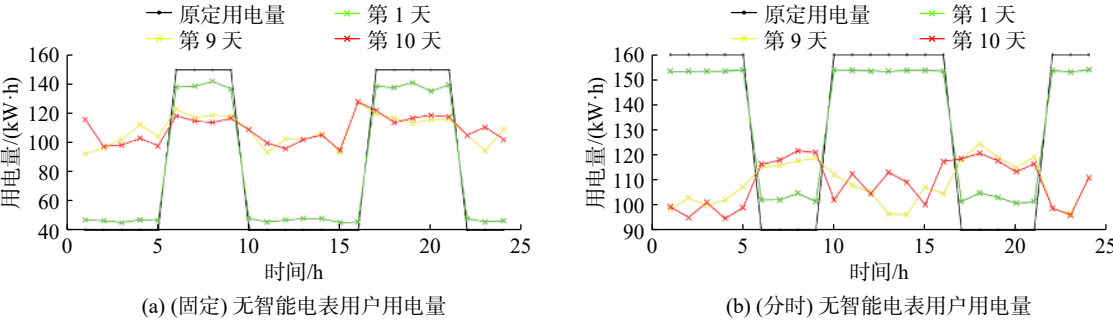


图 4 各时段无智能电表用户的用电量
Fig.4 Electricity consumption of users without smart meters at various times

时段用电行为恢复正常。两种情况下的两类用户在电价稳定后用电量均仅随价格轻微浮动, 实现了稳定电网的目的, 虽然无智能电表用户因其客观条件存在一定的时滞, 但两类用户在一定时间内均实现了需求侧管理。

图 5 是各时段社会福利效用, 图 5(a)是原定价机制为固定价格的社会福利效用, 图 5(b)是原定价机制为分时价格的社会福利效用。从图 5 可以看出, 社会福利效用均有明显的提升。

图 6 为无智能电表用户的用电偏差效用。从

图 6 可以看出, 无智能电表用户因无法实现实时信息交互, 难以实时智能地调整最优用电量, 且因为第 1 天价格变化程度最大, 致使第 1 天的效用损失最多, 后续天数中随着价格趋于稳定, 效用损失趋近于 0。

图 7 为供电商利润, 图 7(a)是原定价机制为固定价格的供电商利润, 图 7(b)是原定价机制为分时价格的供电商利润。从图 7 中可以看出, 在两种以往常用的定价机制中, 供电商为刺激用户改变用电行为从而进行用电峰谷调节或平衡用户

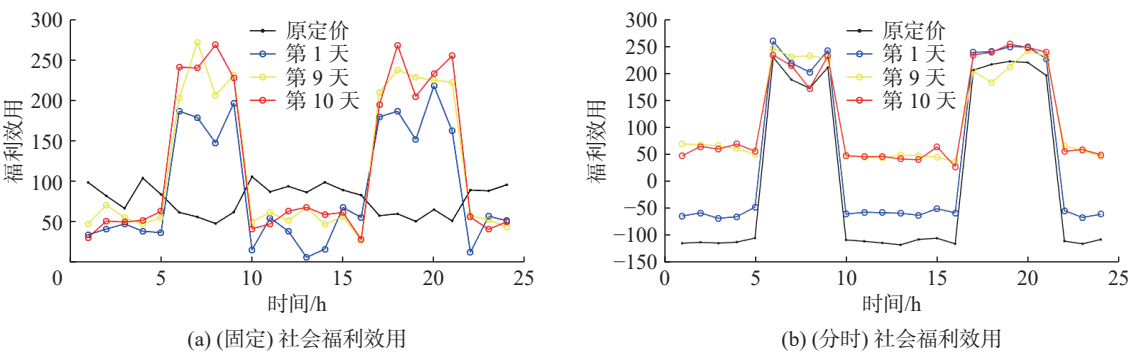


图 5 各时段社会福利效用 (不包含无智能电表用户既有效用)

Fig.5 Social welfare utility at various times (excluding the original utility of users without smart meters)

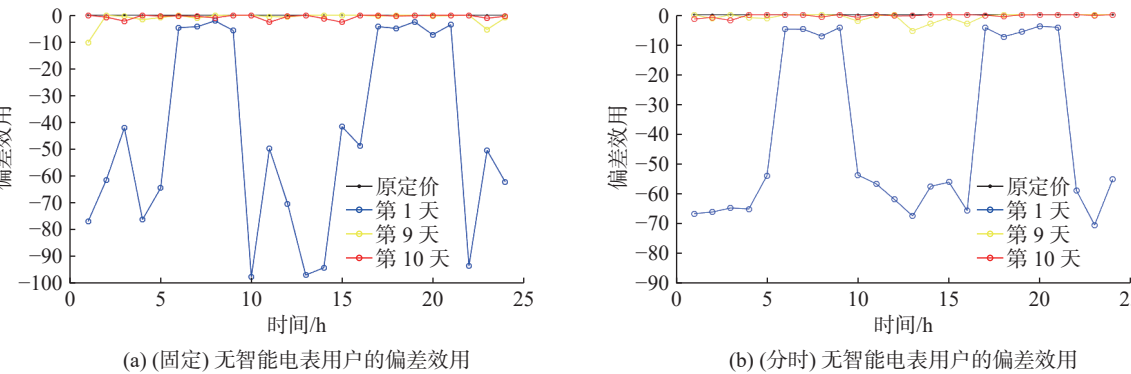


图 6 各时段无智能电表用户的偏差效用

Fig.6 Deviant utility loss for users without smart meters at various times

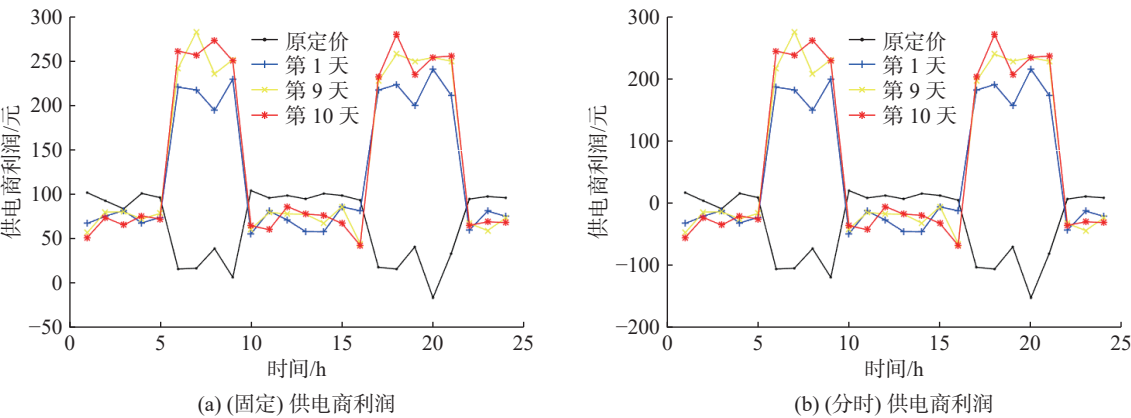


图 7 各时段的供电商利润

Fig.7 Profits of power suppliers at various times

福利所制定的价格，总会使供电商在某些时段的利润为负。而在两种原定价机制通过模型博弈后，供电商利润均有提高，且利润最终值均在相同的区间里浮动。

综合图 2~7 可知，博弈模型平衡稳定后的最优价格仅与当日的用户用电偏好有关，与原始电价无关，本文的博弈模型实现了社会福利最优情况下的价格制定和用户用电规划的目的，既稳定

了电网，又提高了社会福利效用。

4 模型对比

对比模型的供电商目标函数仅包含供电商利润和有智能电表用户的福利效用，去掉了供电商目标函数中的无智能电表用户的福利效用，其他假设(如无智能电表用户群体中仅有一部分用户有意愿并有能力变更用电行为)不变，则此时有智能

电表用户 i 的反应函数同式 (13), 对 $\forall k \in K$, 供电商目标函数为

$$\left\{ \begin{array}{l} \max W_{\text{grid}}(p_k) = \sum_{i \in D} \frac{(\omega_{i,k} - \beta_i p_k)^2}{2\alpha} + R(p_k) \\ \text{s.t. } p_k \geq a \left[\bar{Y}_k + \delta \bar{\theta}_{k,k}(p_k - \bar{p}_k) + \right. \\ \quad \left. \sum_{i \in D} \frac{\omega_{i,k} - \beta_i p_k}{\alpha} \right] p_k \leq \min_{i \in D} \left(\frac{\omega_{i,k}}{\beta_i} \right) \\ L_{\min} \leq \bar{Y}_k + \delta \bar{\theta}_{k,k}(p_k - \bar{p}_k) + \\ \quad \sum_{i \in D} \frac{\omega_{i,k} - \beta_i p_k}{\alpha} \leq L_{\max} \end{array} \right. \quad (25)$$

此时, 即便供电商的目标函数中不考虑无智能电表用户的福利效用, 但部分无智能电表用户依然会基于当前时段的电价作最优用电决策, 改变用电量, 供电商的利润也会因此改变。与此同时, 社会福利的基本设定不会改变, 依然包括无智能电表用户的福利效用。

对比试验是在电网系统的价格和用电量已经稳定的状态下进行的, 假设有智能电网用户在峰时的用电量突增, 设 ω 范围在峰时由 [2, 3] 变为

[3, 4], 结果如图 8~9 所示。

图 8(a)为实时电价的对比试验, 图 8(b)为供电量的对比试验。突发性的电力需求上升, 意味着对于当时的需求增量是必要且不可转移的, 从图 8 可以看出, 本文博弈模型在面对突增的电力需求时可以满足更多的有智能电表用户的暂时性的突发需求, 平缓上升的电价又不会过多地降低无智能电表用户的福利效用。

图 9(a)为社会福利效用的对比试验, 图 9(b)为供电商利润的对比试验。从图 9 中可以看出, 该博弈模型在面对突增的电力需求时, 供电商会以自身部分利润替换为用户福利效用, 但总社会福利效用是提高了, 这种结果更符合我国对需求侧管理的目标。

5 结束语

本文对智能电网系统中同时存在有智能电表用户和无智能电表用户的情况下的实时定价机制进行研究, 提出以供电商为领导者、有智能电表

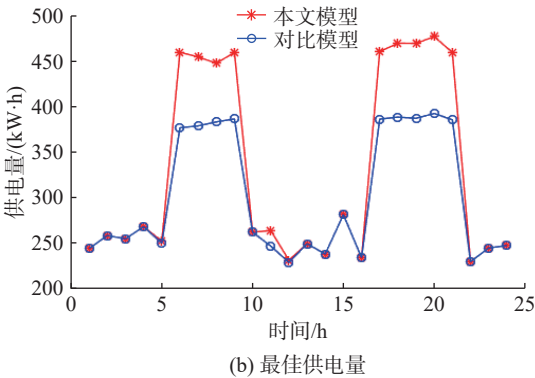
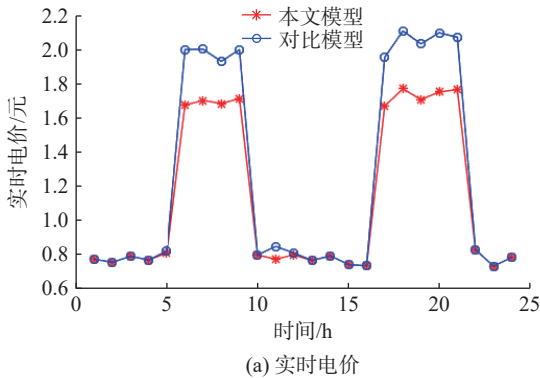


图 8 对比试验的电价和供电量

Fig.8 Electricity price and power supply of the comparison test

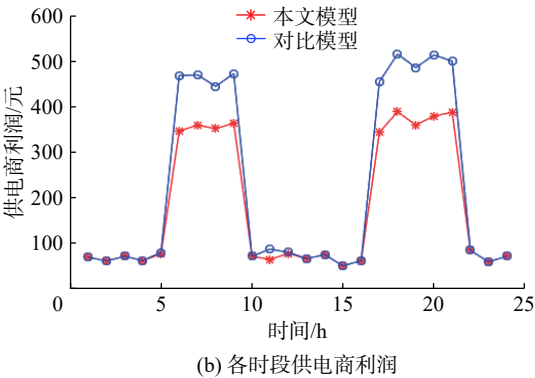
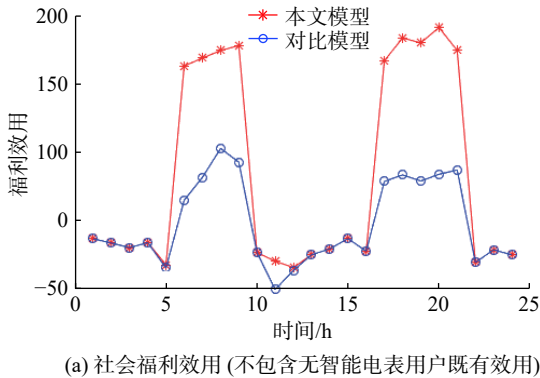


图 9 对比试验的社会福利效用和供电商利润

Fig.9 Social welfare utility and profit of the comparison test

用户为跟随者的斯塔克尔伯格博弈模型,领导者通过智能电表获得跟随者的反应函数,再以社会福利最大化为目标制定最优的电价。本文证明了斯塔克尔伯格的均衡解,并分别在固定价格和分时价格这两种原定价机制的基础上进行数值模拟。模拟结果显示,博弈模型可以纠正不良的用电峰谷和倾向,既满足了削峰填谷的目的,又实现了社会福利最大化,能更有效地对无智能电表用户群体进行需求侧管理,使价格走向也在两种原定价机制之间实时变动,更好地平衡供电商与两类用户的利益。相较于文献[17]提出的仅以供电商利益最大化为目标和提前一天定价的模型,以及不考虑无智能电表用户的模型,本文的博弈模型在面对突增用电需求时,不仅实现了电网的稳定,而且提高了社会福利效用,更符合我国国情。随着智能电网的不断普及,模型的参数会逐步精准,模型的准确性也会大幅提高。

参考文献:

- [1] HU M, XIAO J W, CUI S C, et al. Distributed real-time demand response for energy management scheduling in smart grid[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 99: 233–245.
- [2] WANG S W, TANG R. Supply-based feedback control strategy of air-conditioning systems for direct load control of buildings responding to urgent requests of smart grids[J]. *Applied Energy*, 2017, 201: 419–432.
- [3] 张莉, 高岩, 朱红波, 等. 考虑用电量不确定性的智能电网实时定价策略[J]. *电网技术*, 2019, 43(10): 3622–3631.
- [4] 潘婷婷, 李军祥, 黄芳旧. 基于需求响应的含光伏电力系统优化及其算法改进[J]. *上海理工大学学报*, 2019, 41(5): 448–454.
- [5] 陶莉, 高岩, 朱红波, 等. 有可再生能源和电力存储设施并网的智能电网优化用电策略[J]. *中国管理科学*, 2019, 27(2): 150–157.
- [6] ZHOU K L, YANG S L. Demand side management in China: the context of China's power industry reform[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 47: 954–965.
- [7] 高岩. 智能电网实时电价社会福利最大化模型的研究[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(10): 201–209.
- [8] TANG R, WANG S W, LI H X. Game theory based interactive demand side management responding to dynamic pricing in price-based demand response of smart grids[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 118–130.
- [9] ZHANG W, LI J Y, CHEN G, et al. A comprehensive model with fast solver for optimal energy scheduling in RTP environment[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, 8(5): 2314–2323.
- [10] DAI Y M, ZHAO P. A hybrid load forecasting model based on support vector machine with intelligent methods for feature selection and parameter optimization[J]. *Applied Energy*, 2020, 279: 115332.
- [11] HU M, XIAO J W, CUI S C, et al. Distributed real-time demand response for energy management scheduling in smart grid[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 99: 233–245.
- [12] 王宏杰, 高岩. 基于非光滑方程组的智能电网实时定价[J]. *系统工程学报*, 2018, 33(3): 320–327.
- [13] 陈政, 肖江, 荆朝霞, 等. 一种适用于我国电力市场的分区输电定价方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(7): 2124–2130.
- [14] VARDAKAS J S, ZORBA N, VERIKOUKIS C V. A survey on demand response programs in smart grids: pricing methods and optimization algorithms[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(1): 152–178.
- [15] MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W S, JATSKEVICH J, et al. Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, 1(3): 320–331.
- [16] QIAN L P, ZHANG Y J A, HUANG J W, et al. Demand response management via real-time electricity price control in smart grids[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2013, 31(7): 1268–1280.
- [17] MA Q, MENG F L, ZENG X J. Optimal dynamic pricing for smart grid having mixed customers with and without smart meters[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2018, 6(6): 1244–1254.
- [18] 刘博, 李军祥, 高岩. 智能电网分类用户实时电价算法研究[J]. *计算机应用研究*, 2017, 34(9): 2605–2609.
- [19] DENG R L, YANG Z Y, CHOW M Y, et al. A survey on demand response in smart grid: mathematical models and approaches[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2015, 11(3): 570–582.
- [20] SAMADI P, MOHSENIAN-RAD A H, SCHÖBER R, et al. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid[C]//2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg, MD, USA: IEEE, 2010: 415–420.
- [21] TANG Q, YANG K, ZHOU D D, et al. A real-time dynamic pricing algorithm for smart grid with unstable energy providers and malicious users[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2016, 3(4): 554–562.
- [22] 哈尔·R·范里安. 微观经济学: 现代观点[M]. 9版. 费方

域, 朱保华, 译. 上海: 格致出版社, 2014.

- [23] 代业明, 高红伟, 王宝慧, 等. 基于系统工程方法论的分布式发电系统动态定价决策 [J]. 管理评论, 2020, 32(7): 205–216.
- [24] DAI Y M, GAO Y, GAO H W, et al. A real-time pricing scheme considering load uncertainty and price competition in smart grid market[J]. *Journal of Industrial and*

Management Optimization, 2020, 16(2): 777–793.

- [25] DAI Y M, LI L, ZHAO P, et al. Real-time pricing in smart community with constraint from the perspective of advertising game[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2019, 29(9): e12043.

(编辑:石 瑛)

[上接第 259 页]

- [12] DENG H G, HE G Z, DENG H G, et al. An improved channel estimation scheme based on compressed sensing for an orthogonal frequency division multiplexing visible light communication system[C]//Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Computer and Communication Engineering Technology. Beijing: IEEE, 2018: 1–4.
- [13] 贺磊, 张建隆, 杨振. 6.5 倍微小型可见光变焦光学系统设计[J]. 光学仪器, 2019(2): 46–52.
- [14] ZENG L B, O'BRIEN D C, LE MINH H, et al. High data rate multiple input multiple output (MIMO) optical wireless communications using white LED lighting[J]. [IEEE Journal on Selected Areas in Communications](#), 2009,

27(9): 1654–1662.

- [15] DENG L J, FAN Y Y, ZHAO Q. A novel PAPR reduction scheme for VLC DCO-OFDM systems[J]. [Optics Communications](#), 2018, 426: 164–169.
- [16] 李翔宇. 可见光通信中非线性失真抑制关键技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018.
- [17] FATH T, HAAS H. Performance comparison of MIMO techniques for optical wireless communications in indoor environments[J]. [IEEE Transactions on Communications](#), 2013, 61(2): 733–742.
- [18] 魏承功. 基于白光 LED 的室内可见光通信系统研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2008.

(编辑:董伟)