

自动需求响应背景下考虑用户满意度的 分时电价最优制定策略

董 军, 张晓虎, 李春雪, 顾文琦, 曾 鸣

(华北电力大学 能源与电力经济研究咨询中心, 北京 102206)

摘要: 基于博弈论研究分时电价最优制定策略。首先, 综合考虑电力需求波动的成本、用户对电价变动的负荷响应及用户满意度等因素, 建立电网公司与单用户博弈的分时电价定价模型; 其次, 分析不同用户的用电特性, 将所建模型扩展为多类型用户情形; 最后, 结合实际算例, 运用逆向归纳法获取博弈模型的纳什均衡解, 并对比分析不同电价策略下的最优电价与最优用电量。算例结果表明, 应用所建模型得到的分时电价最优定价策略, 能够有效减小峰谷差, 降低各类电力用户的平均电价, 从而保证电网公司与用户利益; 其中不同类型用户获益效果受其对电价响应能力的影响而有所差异。

关键词: 博弈论; 分时电价; 电力需求波动; 用户满意度; 纳什均衡

中图分类号: TM 73; F 407

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.07.011

0 引言

需求响应作为需求侧管理的重要措施, 在实现供需动态优化平衡、提升电力资源优化配置水平等方面具有重要作用^[1-2]。传统的人工需求响应从需求响应信号的传输到对用电设备的控制都完全依赖于人工操作, 存在响应速度慢、可靠性低等问题, 降低了需求响应资源的灵活性和利用效率^[3-4]。近年来, 智能电网技术的快速发展为需求响应实现自动化提供了强有力的技术支持手段^[5-7]。作为智能电网框架下的重要互动资源, 自动需求响应 Auto-DR (Automated Demand Response) 不依赖于任何人工操作, 通过接收外部信号触发用户侧需求响应程序, 大幅提高了需求响应的可靠性、再现性、鲁棒性和成本效益^[8-9], 能够有效实现削峰填谷、移峰平谷, 降低电力投资和用户电费, 从而提高能源利用效率和用户参与主动性, 优化电力系统运行与管理。目前, 我国在 Auto-DR 技术方面处于刚起步阶段, 可参与 Auto-DR 的响应措施种类较少, 仅包括分时电价和可中断负荷 2 种措施。

近年来, 分时电价措施在世界各国电力工业中发挥着越来越重要的作用, 也引起了学术领域的广泛关注^[10]。文献^[11-12]认为用户的响应行为体现在分时段地改变用电方式上, 因此在调查用户反应曲线的基础上, 建立了需求侧分时电价的数学模型; 文献^[13]引入电价弹性矩阵表示用户的价格需求弹

性, 进而量化用户对峰谷分时电价的响应度; 文献^[14]对平时段电价进行探索性研究, 提出以市场清除价 MCP (Market Clearing Price) 计算得到平均购电电价从而确定平时段电价的方法, 但是由于 MCP 对平时段电价的限制, 所确定的分时电价并不能得到使削峰填谷效果最优的平时段电价; 文献^[15-16]基于统计学原理拟合了全社会对电价的综合反应曲线, 并建立相应的分时电价模型, 得到较好的负荷调整效果; 文献^[17]将购电商与发电商看作两人静态博弈模型, 根据双方叫价拍卖模型计算贝叶斯均衡点, 从而确定购电电价, 但该模型建立在竞价交易基础上, 未考虑电网公司利益及用户响应对负荷的影响; 文献^[18]基于博弈理论制定了由政府确定电价水平、电力公司确定电价、用户确定用电量的分时电价模型, 但模型未考虑电力需求波动的成本及用户满意度等因素, 也没有根据用户用电特性对用户进行分类。综上所述, 当前国内外关于分时电价的研究主要集中在通过简单的发电侧与需求侧联动以及调查用户对电价的反应来建立分时电价模型, 对模型的优化侧重于合理规划峰谷时段和确定电价方面, 较少考虑用户与电网公司的博弈关系以及分时电价制定对社会福利的影响; 而已有的分时电价博弈模型研究尚不深入, 未能考虑多种分时电价制定策略及具有不同用电特性的用户类型。

为了推动 Auto-DR 在我国的开展, 提高用户参与主动性, 本文从分时电价的深化研究入手, 基于电网公司与用户的博弈关系, 研究分时电价最优制定策略, 为 Auto-DR 提供基础理论支撑。首先, 建立电网公司与单用户博弈的分时电价定价模型, 并给出纳什均衡状态的求解思路, 模型考虑了电力需求波动给电网公司带来的成本、用户对价格变动的响应及用

收稿日期: 2015-06-29; 修回日期: 2016-05-31

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (71271082); 国家软科学研究计划 (2012GXS4B064)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (71271082) and the National Soft Science Research Plan of China (2012GXS4B064)

户用电满意度等因素;其次,基于用户不同的用电特性,将用户划分为居民、商业与工业用户 3 种类型,将单用户博弈模型拓展到多类型用户的情形;最后,考虑小时电价与区段电价 2 种分时电价制定策略,应用 MATLAB 优化工具箱求解博弈模型,分别得到固定电价与分时电价策略下的最优用电量与最优电价,并对结果进行对比分析。

1 单用户博弈模型

构建电网公司与单类型用户的博弈模型,确定电力供应过程中电网公司与电力用户的效用函数。将 1 d 分为 N 个时段,本文中 $N=24$ 。

(1) 电网公司利润与用户成本。

电网公司通过为用户提供电能获取销售利润,其利润可由式(1)表示;用户的成本函数 C 包括购买电力所支付的费用与用户对电力服务的满意度,由式(2)表示。

$$R_c = \sum_{k=1}^N p_k q_k - \sum_{k=1}^N c_k g_k - h(g) \quad (1)$$

$$C = \sum_{k=1}^N p_k q_k + \sum_{k=1}^N z_k(q_k, d_k) \quad (2)$$

其中, $k=1, 2, \dots, N$, 表示不同的时段; R_c 为电网公司的销售利润; p_k 为 k 时段内的销售电价; q_k 为 k 时段内用户对电价做出响应后的实际用电量; c_k 为 k 时段内的边际发电成本; g_k 为 k 时段的实际发电量; g 为发电量变量; $h(g)$ 为一天内电网公司因用户用电需求波动而承担的成本,本文以发电量与其均值偏差的平方和乘以系数 λ 来表示该成本, $h(g) = \lambda \sum_{k=1}^N (g_k - \bar{g})^2$, λ 为需求波动成本系数, $\bar{g}$ 为一天内发电量的均值; $z_k(q_k, d_k)$ 为用户的满意度函数, d_k 为用户的名义用电需求。

(2) 用户满意度。

以用户名义用电需求与实际用电量间的偏差函数来量化用户的满意度。实际上,如果实际用电量低于需求值,则 z_k 为正,表示用户对供电服务不满意,这将导致用户满意度降低,且其下降速度快于用电量的降低速度;如果实际电量高于需求值,则 z_k 为负,表示用户是满意的,此时,用户满意度将升高,但是其上升速度将随着用电量的增加而减慢;如果实际电量与需求相等,则 z_k 为 0。

基于以上 3 种情况,建立用户对供电服务的满意度函数 $z_k(q_k, d_k)$ 及其约束条件,如式(3)所示,其中, a_k 和 b_k 为用户满意度函数的相关参数,其值与用户类型相关, $a_k < 1$ 且 $a_k b_k < 0$ 。通过调整参数 a_k 和 b_k ,可以模拟不同类型用户的用电满意度情况,如图 1 所示。

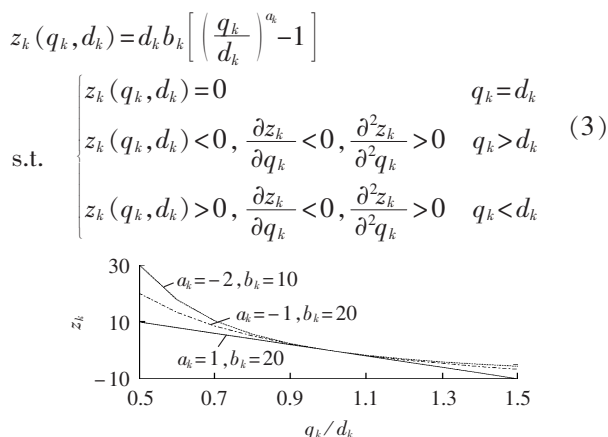


图 1 不同参数值下的用户满意度函数

Fig.1 User satisfaction function for different values of a_k and b_k

(3) 效用函数及最优问题。

电网公司希望在服务公众和满足用户用电需求的基础上实现利润的最大化,因此其效用函数为销售利润减去用户的满意度成本,用 u_1 表示。用户期望用电成本最小,其效用函数为成本函数的负值,用 u_2 表示。本文的目标是在特定约束条件下实现效用函数 u_1 和 u_2 的最大化,因此最优优化问题可定义为:

$$\begin{aligned} \max_{p, g} u_1 &= \sum_{k=1}^N (p_k q_k - c_k g_k - z_k) - h(g) \\ \max_q u_2 &= -C = -\sum_{k=1}^N (p_k q_k + z_k) \\ \text{s.t.} \quad & q_{k, \min} \leq q_k \leq g_k \leq \min\{d_{k, \max}, g_{k, \max}\} \\ & c_k \leq p_k \quad k=1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (4)$$

其中, p 为销售电价变量; q 为用户用电量变量; g 为发电量变量; u_1 为电网公司的效用函数; u_2 为用户的效用函数; $q_{k, \min}$ 为 k 时段内用户最小用电需求对应的电量; $d_{k, \max}$ 为 k 时段内用户通过调整用电行为所能实现的最大用电需求; $g_{k, \max}$ 为 k 时段内发电机组的最大发电量。

式(4)中,第 1 个约束条件用来限制电网公司和用户的行为。首先,电网公司要保证用户需求的最低用电量 $q_{k, \min}$,因此不能设定过高的用电价格;其次,实际用电量不能超过 $\{d_{k, \max}, g_{k, \max}\}$ 的最小值,这意味着即使用户想在价格较低的特定时段内增加用电量,但其用电量也是有上限的。第 2 个约束条件保证了销售电价总是大于或者等于边际发电成本。

在实际电力系统运行过程中,发电量与用电量总是相匹配的,故可通过设定 $q_k = g_k$ 来简化式(4),得到:

$$\begin{aligned} \max_p u_1 &= \sum_{k=1}^N (p_k q_k - c_k g_k - z_k) - h(q) \\ \max_q u_2 &= -\sum_{k=1}^N (p_k q_k + z_k) \\ \text{s.t.} \quad & q_{k, \min} \leq q_k \leq q_{k, \max} = \min\{d_{k, \max}, g_{k, \max}\} \\ & c_k \leq p_k \quad k=1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $h(q)$ 为电网公司因用户需求变动承担的成本; $q_{k,\max}$ 为用户在 k 时段内的最大用电量。

在电网公司与用户的博弈过程中, 电网公司设定分时电价 p , 用户根据电价决定实际消费电量 q 。由于用户实际用电量取决于电价, 因此定义 q 为 p 的函数。当式(6)的条件满足时, 将实现电网公司与用户博弈的纳什均衡状态, 本文目标即寻求最优电价 p^* 和最优用电量 q^* , 以实现用户和电网公司之间的纳什均衡。

$$\begin{aligned} \forall p \in P, p \neq p^*: u_1(p^*, q^*) &\geq u_1(p, q^*) \\ \forall q \in Q, q \neq q^*: u_2(p^*, q^*) &\geq u_2(p^*, q) \\ P = \{p \mid p \in \mathbf{R}^N, q_{\min} \leq q(p) \leq q_{\max}, p \geq c\} \\ Q = \{q \mid q \in \mathbf{R}^N, q_{\min} \leq q \leq q_{\max}\} \end{aligned} \quad (6)$$

其中, P 为电网公司分时电价策略的集合; Q 为用户实际用电量策略的集合; $\mathbf{R}^N$ 为 N 维实数矩阵集合; $q_{\min}$ 、 $q_{\max}$ 分别为用户的最小、最大用电量。

2 效用函数的优化求解

采用逆向归纳法求解多阶段博弈模型^[19]。电网公司首先设定电价, 随后用户调整用电量, 因此, 基于逆向推导原理, 首先优化用户的效用函数 u_2 , 然后将最优的用电量值 $q^*(p)$ 代入 u_1 中, 求解电网公司效用函数的优化问题。

2.1 基于需求响应的最优用电量

为了求解用户基于分时电价需求响应后的最优用电量, 假设不同时段内的电价 p_k 已知, 令 u_2 关于 q_k 的一阶导数值为零, 可以得到 q_k^* , 将其简化可得:

$$q_k^* = d_k \left(-\frac{p_k}{a_k b_k} \right)^{\frac{1}{a_k-1}} = d_k \left(\frac{p_k}{\theta_k} \right)^{\omega_k} \quad k=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

其中, $\omega_k = \frac{1}{a_k-1} < 0$; $\theta_k = -a_k b_k > 0$ 。

u_2 的二阶导数为:

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial q_k \partial q_i} = \begin{cases} -a_k b_k (a_k - 1) \frac{q_k^{a_k-2}}{q_i^{a_k-1}} & k=i \\ \frac{\partial^2 u_2}{\partial q_k \partial q_i} = 0 & k \neq i \end{cases} \quad (8)$$

由于 $a_k < 1$, $a_k b_k < 0$, 且 Hessian 矩阵的对角线元素均为负值, 非对角元素均为零, 因此 q_k^* 为基于价格 p_k 的最优用电量。

2.2 最优分时电价

通过寻求基于用户需求响应的最优电价策略来优化电网公司的效用函数。将最优用电量 q_k^* 代入 u_1 , 得到以 p 为自变量的效用函数 $u_1(p)$:

$$u_1(p) = \sum_{k=1}^N (p_k q_k^*(p_k) - c_k q_k^*(p_k) - z_k(q_k^*(p_k), d_k)) - h(q^*(p)) \quad (9)$$

由式(7)可得:

$$p_k = \left(-\frac{q_k}{d_k} \right)^{\frac{1}{\omega_k}} \theta_k \quad (10)$$

由式(10)可知, p_k 为 q_k 的递减函数, 因此, 式(5)中的约束条件可以改写为:

$$\begin{aligned} p_{k,\min} &\leq p_k \leq p_{k,\max} \\ p_{k,\min} &= \max \left\{ c_k, \left(\frac{q_{k,\max}}{d_k} \right)^{1/\omega_k} \theta_k \right\} \\ p_{k,\max} &= \left(\frac{q_{k,\max}}{d_k} \right)^{1/\omega_k} \theta_k \end{aligned} \quad (11)$$

由于在区段电价策略中, 1 d 被分为“高峰时段”、“平时段”和“低谷时段”3 个区段, 每个区段内的价格是恒定的(如表 1 所示)。因此, 添加约束条件 $p_i = p_j$, 以保证区段内价格的连续性, i 和 j 为同一区段内的各个时间段。

表 1 区段电价策略

Table 1 Peak, normal and valley period of time

阶段	划分时间
高峰时段	13:00—19:00
平时段	06:00—13:00, 19:00—24:00
低谷时段	00:00—06:00

为了方便计算, 将最优问题以矩阵形式表示:

$$\begin{aligned} \max_p \quad & u_1(p) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} p_{\min} \leq p \leq p_{\max} \\ A_{n \times n} \cdot p = O, A \cdot I = O \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

其中, $p_{\min}$ 、 $p_{\max}$ 分别为电价的最小、最大值; $A_{n \times n}$ 中的元素 $a_{ij} \in \{-1, 0, 1\}$; I 与 O 分别表示 $n \times 1$ 维的全 1 与全 0 向量。

式(12)中约束条件是线性的, u_1 的 Hessian 矩阵负定, 因此所得解为最优解。综上, 所得最优电量与最优分时电价能够保证效用的最大化, 即满足式(6), 从而能够实现用户与电网公司间的纳什均衡。

3 多用户博弈模型

由于并非所有用户对价格变化的响应程度都一样, 且不同类型用户的电力需求也明显不同, 因此将单用户博弈模型拓展到多用户的情形。考虑 3 种不同类型的用户: 居民用户(J)、商业用户(S)和工业用户(G)。

(1) 居民用户。

住宅区的用户通常对电价比较敏感, 将根据变动的电价来调整用电量。但是居民用户减少或增加总用电量的能力有限, 其调整用电量的灵活性较低。

(2) 商业用户。

办公时间内, 商业区的用电需求很高。由于可能影响到办公, 商业用户并不愿意减少用电量。然而如果电价过高, 可以采用储能设备来减少用电; 或者将一些非紧急性的工作调整到其他时段内进行

(办公时间结束后,商业区的电力需求将明显降低,可以将高能耗的工作安排到此段时间内),因此商业用户在调整用电量方面具有较大的灵活性。

(3) 工业用户。

工业用户,特别是采用高耗能设备的用户用电量很大,因此对电价更敏感。通常,工业用户将通过调整生产时间来减少用电成本,例如将高耗能的生产工序转移到低电价的时段。由此可见,工业用户在调整和规划用电量方面具有相对较高的灵活性。

考虑到不同类型用户对电价的反应不同,因此针对各类型用户制定不同的分时电价策略,以保证所有用户的总负荷是均匀分布的。式(13)分别给出反映电网公司和不同类型用户利润或成本的效用函数:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= u_j + u_s + u_G - \sum_{k=1}^N c_k q_k - h(q) \\
 \begin{cases} u_j = -\sum_{k=1}^N p_{jk} q_{jk} - \sum_{k=1}^N z_{jk} \\ u_s = -\sum_{k=1}^N p_{sk} q_{sk} - \sum_{k=1}^N z_{sk} \\ u_G = -\sum_{k=1}^N p_{gk} q_{gk} - \sum_{k=1}^N z_{gk} \\ q_k = q_{jk} + q_{sk} + q_{gk} \quad k=1, 2, \dots, N \end{cases}
 \end{aligned} \quad (13)$$

其中, u_j 、 u_s 和 u_G 分别为居民、商业和工业用户的效用函数; $\{p_{jk}, p_{sk}, p_{gk}\}$ 、 $\{q_{jk}, q_{sk}, q_{gk}\}$ 与 $\{z_{jk}, z_{sk}, z_{gk}\}$ 分别对应居民、商业和工业用户的电价、用电量与用电满意度函数。

类似于式(12),可以得到电网公司效用的最优问题及不同类型用户的最优电价,如式(14)所示。

$$\begin{aligned}
 \max_{p_j, p_s, p_g} \quad & u_1(p_j, p_s, p_g) \\
 \text{s.t.} \quad & \begin{cases} p_{j,\min} \leq p_j \leq p_{j,\max} \\ p_{s,\min} \leq p_s \leq p_{s,\max} \\ p_{g,\min} \leq p_g \leq p_{g,\max} \\ A \cdot p = O, A \cdot I = O \end{cases}
 \end{aligned} \quad (14)$$

其中, p_j 、 p_s 、 p_g 分别为居民、商业、工业用户的销售电价变量; $\{p_{j,\min}, p_{j,\max}\}$ 、 $\{p_{s,\min}, p_{s,\max}\}$ 、 $\{p_{g,\min}, p_{g,\max}\}$ 分别为居民、商业、工业用户电价的最小和最大值。

4 算例分析

4.1 单用户情形

在算例中,分别考虑 2 种分时电价策略:一种是小时电价,即将 1 d 分成 24 个时段,每小时为一个时段,各时段内的电价是恒定的;另一种是如表 1 所示的区段电价。应用博弈模型分别研究 2 种电价策略下的最优用电量与最优电价,并对结果进行比较分析。

图 2 和图 3 分别给出了用户名义用电需求 d_k 与边际发电成本 c_k 的相关数据,用户的总名义需求电量取 1710.1 GW·h;由式(7)可以发现,参数 ω_k 具有与电价弹性类似的特性,而 θ_k 可看作是对应于名义需求 d_k 的名义电价,基于此,可以获取用户的 ω_k 值,如图 4 所示,同时取 $\theta_k = 0.618, \lambda = 1$ 。应用 MATLAB 求解最优化问题,即式(12),得到如下结果。

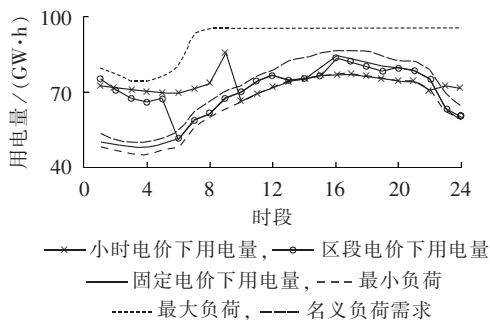


图 2 单用户情形下固定电价和分时电价策略下的用电量

Fig.2 Electricity consumption of single user type for different pricing strategies

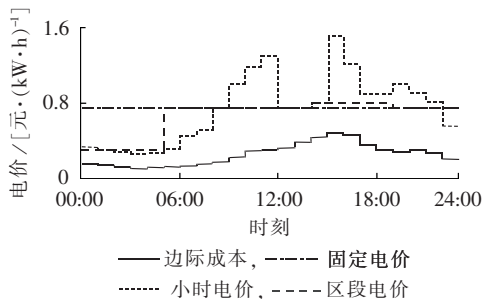


图 3 单用户情形下固定电价和分时电价策略下的电价

Fig.3 Electricity price of single user type for different pricing strategies

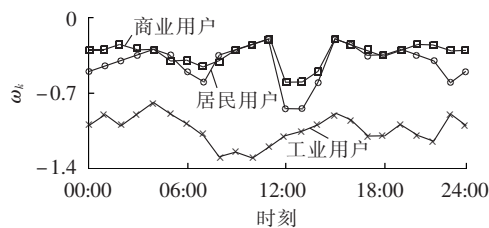


图 4 不同类型用户的 ω_k 值

Fig.4 Value of ω_k for different user types

图 2 与图 3 分别为实施固定电价与分时电价策略下的最优用电量与电价的对比结果。由图 2 可以发现,实施分时电价策略下的用电量曲线较固定电价的电量曲线更平稳。这是因为实施分时电价策略后,高峰时段电价较高,低谷时段电价较低。因此,在高峰时段,用户将减少用电量以降低成本,用电量的减少可以通过调整用电计划,或者通过降低设备的耗电量,例如调整空调参数来实现;在低谷时段,

用户将完成高峰时段转移过来的用电计划,或者由于价格较低,用户可能应用电力设备替代消耗其他能源的设备,从而增加用电量。此外,从图 2 中还可以发现,小时电价策略下的用电需求的变动幅度较区段电价策略下的变动幅度更大。

表 2 为固定电价和分时电价下利润与效益的对比结果。首先由表 2 可以看出,实施分时电价后,电网公司的利润较固定电价时有所增加,平均电价有所降低,用户的效益有所增加。其次,将区段电价与小时电价策略下的结果进行对比,区段电价策略下,用户能够获取更大的效益。这是因为区段电价策略下,各区段内的电价是固定的,电网公司有义务保证用户的最低用电量,因此不能设置过高的价格,导致其利润降低。此外,通过将公司利润与用户效益求和可以得到社会总福利 SW(Social Welfare),此处社会福利取负值。根据计算结果,3 种策略中,小时电价策略下能够实现最高的社会福利,其次为区段电价策略,而固定电价策略的社会福利最低。

表 2 单用户情形下 3 种价格策略下的利润与效益结果

Table 2 Profit and benefit of single user type for three pricing strategies

价格策略	总电量 / (GW·h)	平均电价 / [元·(kW·h) ⁻¹]	利润 / 亿元	u_2 / 亿元	SW / 亿元
固定电价	1620.13	71.33	4.57	-12.16	-7.49
小时电价	1736.95	66.18	6.91	-11.69	-4.78
区段电价	1713.72	64.30	5.52	-11.21	-5.68

4.2 多用户情形

考虑多类型用户的情形:居民用户、商业用户和工业用户,调研某地区各类用户价格弹性的实际数据,取平均值作为 3 种类型用户的 ω_k 值,如图 4 所示。表 3 为每种类型用户的最小与最大用电量占名义需求值的百分比,本算例中,假定各类型用户的总名义需求值相同,均为 1710.1 GW·h, θ_k 与 λ 取值不变。

表 3 3 种类型用户的最小、最大用电量

Table 3 Maximum and minimum electricity consumptions of three user types

用户类型	最小用电量/%	最大用电量/%
居民用户	90	125
商业用户	95	120
工业用户	70	150

图 5 和图 6 分别为分时电价和固定电价下 3 种类型用户的电价与用电量结果。为了减少电费,居民用户将更多地使用低谷时段电力,从而减少高峰时段的用电;商业用户在工作时间内较少调整用电量,因为其电力需求为相对刚性的需求;工业用户在调整电量方面最具灵活性,其在低谷时段大量用电,而在高峰时段明显减少电力的使用,通过这种方式,可以

大幅降低平均电价。总体而言,采用分时电价策略后,3 种类型用户的电量消费更平稳,总用电量曲线如图 7 所示,可计算出总高峰用电量减少了约 10.21%。

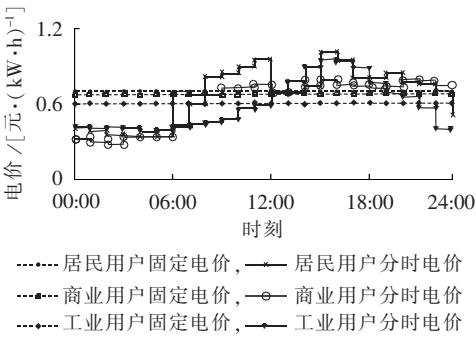


图 5 3 种类型用户固定电价和分时电价策略下的电价
Fig.5 Electricity price of three user types for different pricing strategies

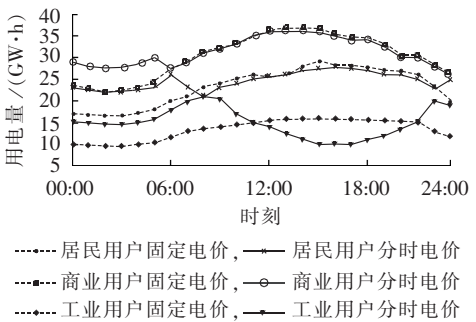


图 6 3 种类型用户固定电价和分时电价策略下的用电量(固定电价与分时电价)
Fig.6 Electricity consumption of three user types for different pricing strategies

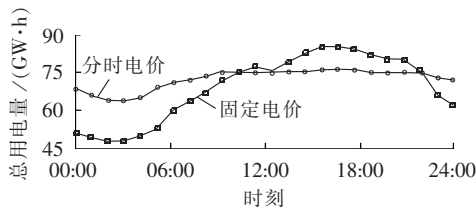


图 7 固定电价与分时电价策略下的总用电量
Fig.7 Total electricity consumption for different pricing strategies

表 4 为电网公司利润与 3 种类型用户效益水平的对比结果,当实施分时电价时,电网公司的利润明显上升,尽管用户效益增长并不明显,但是用户仍能从分时电价策略中受益;其中,商业用户的效益增长幅度最大,而工业用户效益增长幅度相对较低。表 5 为不同定价策略下 3 种类型用户的用电量与平均电价对比结果,可以看出,分时电价下,各类用户用电量均有较大幅度提高,平均电价有所降低;其中,工业用户用电量增加与电价降低的幅度明显高于另外 2 类用户,这与工业用户用电量基数较大有关,但同时也体现出工业用户对电价具有较强的响应能力。

表 4 3 种类型用户的利润和效益水平

Table 4 Profits and benefits of three user types

价格策略	电网利润 / 亿元	居民用户 u_j / 亿元	商业用户 u_s / 亿元	工业用户 u_c / 亿元
固定电价	4.17	-4.12	-5.16	-2.18
分时电价	6.59	-4.05	-5.07	-2.17

表 5 3 种类型用户的用电总量与平均电价

Table 5 Total electricity consumptions and average prices of three user types

用户类型	总电量 / (GW·h)		平均电价 / [元·(kW·h) ⁻¹]	
	固定电价	分时电价	固定电价	分时电价
居民用户	569.32	592.48	0.71	0.70
商业用户	751.18	768.07	0.68	0.66
工业用户	346.10	384.56	0.62	0.57
总体	1 667.31	1 744.73	0.68	0.65

5 结语

a. 基于电网公司与用户的博弈关系,建立分时电价定价模型。模型考虑用电需求波动对电网公司的影响、用户对电价变动的响应程度及用户满意度等因素,建立电网公司与用户的效用函数,并通过求解纳什均衡得到最优电价与用电量。结果表明,应用模型得到的最优分时电价定价策略,能够有效减小峰谷差,使电力负荷均匀分布,提高电网公司利润,同时能够降低电力用户的平均电价,保证用户利益,实现社会福利的提升以及电力系统的安全、稳定运行。

b. 考虑小时电价与区段电价 2 种分时电价定价策略,并将分时电价与固定电价进行对比,获取不同电价策略下的最优电价与最优用电量。对比结果表明,3 种策略中,小时电价策略能够实现最高的社会福利,其次为区段电价策略,而固定电价策略的社会福利最低。

c. 考虑到不同类型用户对电价变化的响应程度不同,将所建立的单用户博弈模型扩展为包含居民用户、商业用户与工业用户的多类型用户情形。算例结果表明,分时电价下,各类用户用电效益均有所增长,平均电价得到降低;其中,工业用户在调整电量方面最具灵活性,其用电量增加与电价降低的幅度明显高于另外 2 类用户;商业用户由于电力需求具有相对刚性,其在工作时间内较少调整用电量;而居民用户对电价较为敏感,为了减少电费将更多地使用低谷电力,但是居民调整电量的能力有限,其平均电价降低程度在 3 类用户中最低。

d. 本文的研究为 Auto-DR 在中国的推广提供了有效的理论支撑,在强有力的自动化技术支持下,更能提高能源利用效率和用户参与主动性,优化电力系统运行与管理,但目前本文仅针对分时电价进行了研究,未来将开展其他需求响应措施在 Auto-DR 背景下的创新研究。

参考文献:

[1] 高赐威,梁甜甜,李扬. 自动需求响应的理论与实践综述[J]. 电网技术,2014,38(2):352-359.
GAO Ciwei,LIANG Tiantian,LI Yang. A survey on theory and practice of automated demand response[J]. Power System Technology,2014,38(2):352-359.

[2] 曾鸣,杨雍琦,向红伟,等. 兼容需求侧资源的“源-网-荷-储”协调优化调度模型[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):102-111.
ZENG Ming,YANG Yongqi,XIANG Hongwei,et al. Optimal dispatch model based on coordination between “generation-grid-load-energy storage” and demand-side resource[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(2):102-111.

[3] 孙盛鹏,刘凤良,薛松. 需求侧资源促进可再生能源消纳贡献度综合评价体系[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):77-83.
SUN Shengpeng,LIU Fengliang,XUE Song. Comprehensive evaluation system for contribution degree of demand-side resources to renewable energy source integration[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):77-83.

[4] 王蓓蓓,李义荣,李扬,等. 考虑响应不确定性的可中断负荷参与系统备用配置的协调优化[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):82-89.
WANG Beibei,LI Yirong,LI Yang,et al. Optimal coordination between system reserve and interruptible loads with response uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(11):82-89.

[5] LAMPROPOULOS I,PAUL P J,KLING W L. A predictive control scheme for automated demand response mechanisms[C]//2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe). Berlin,Germany:IEEE,2012:1-8.

[6] 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 Qin,WANG Xifan,FU Min,et al. Smart grid from the perspective of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(17):49-55.

[7] 石坤,杨硕,史梦洁,等. 自动需求响应在中国参与主体的职责与运作模式研究[J]. 供用电,2014,3(3):24-27.
SHI Kun,YANG Shuo,SHI Mengjie,et al. Research on responsibility of participants and operation mode of automated demand response in China[J]. Distribution & Utilization,2014,3(3):24-27.

[8] 刘东旗,王连成,庞金海,等. 智能电网自动需求响应技术系统的研究[J]. 自动化仪表,2013,34(11):76-79.
LIU Dongqi,WANG Liancheng,PANG Jinhai,et al. Study on the automated demand response technology system for smart grid[J]. Process Automation Instrumentation,2013,34(11):76-79.

[9] 刘晓,艾欣,彭谦. 计及需求响应的含风电场电力系统发电与碳排放权联合优化调度[J]. 电网技术,2012,36(1):213-218.
LIU Xiao,AI Xin,PENG Qian. Optimal dispatch coordinating power generation with carbon emission permit for wind farms integrated power grid considering demand response[J]. Power System Technology,2012,36(1):213-218.

[10] CELEBI E,FULLER J D. A model for efficient consumer pricing schemes in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(1):60-67.

[11] DAVID A K,LI Y Z. Consumer rationality assumptions in the

- real-time pricing of electricity[J]. IEE Proceedings C-Generation, Transmission and Distribution,1992,139(4):315-322.
- [12] RASANEN M,RUUSUMEN J,HANALANEN R P. Identification of consumers price responses in the dynamic pricing of electricity[C]//IEEE International Conference on Systems,Man and Cybernetics,1995. British Columbia,Canada:IEEE,1995:1182-1187.
- [13] SHEEN J N,CHEN C S,WANG T Y. Response of large industrial customers to electricity pricing by voluntary time-of-use in Taiwan[J]. IEEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,1995,142(2):157-166.
- [14] 吴秋伟,汪蕾,邹云. 基于 DSM 和 MCP 的分时电价的确定与分析[J]. 电力需求侧管理,2003,5(1):24-29.
WU Qiuwei,WANG Lei,ZOU Yun. Determination and analysis of TOU power price based on DSM and MCP [J]. Power Demand Side Management,2003,5(1):24-29.
- [15] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京:中国电力出版社,2004:201-232.
- [16] 刘观起,张建,刘瀚. 基于用户对电价反应曲线的分时电价的研究[J]. 华北电力大学学报,2005,32(3):23-27.
LIU Guanqi,ZHANG Jian,LIU Han. Research on TOU Pricing based on consumer response curve[J]. Journal of North China Electric Power University,2005,32(3):23-27.
- [17] 孙琳,刘俊勇. 基于博弈均衡购电电价的分时电价[J]. 四川电力技术,2009,32(4):52-56.
SUN Lin,LIU Junyong. TOU based on game equilibrium electricity price[J]. Sichuan Electric Power Technology,2009,32(4):52-56.
- [18] 曾绍伦,任玉珑,李俊. 基于博弈论的分时电价模型及其仿真[J]. 华东电力,2007,35(8):40-44.
ZENG Shaolun,REN Yulong,LI Jun. Game based time of use electricity price models and relevant simulations[J]. East China Electric Power,2007,35(8):40-44.
- [19] HUISMAN K J M. Technology investment:a game theoretic real options approach[M]. Boston,USA:Kluwer Academic Pub,2001:37-45.

作者简介:



董 军

董 军(1964—),女,陕西西安人,教授,博士研究生导师,主要从事电力技术经济方面的研究;

张晓虎(1974—),男,内蒙古呼和浩特人,博士研究生,主要从事电力技术经济方面的研究;

李春雪(1991—),女,河北沧州人,硕士研究生,主要从事电力技术经济方面的研究

(E-mail: xinzhaobuxuanderen@126.com);

顾文琦(1993—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,主要从事电力技术经济方面的研究;

曾 鸣(1957—),男,山西太原人,教授,博士研究生导师,主要从事电力市场与技术经济方面的研究。

Optimal TOU pricing strategy considering user satisfaction in automated demand response background

DONG Jun,ZHANG Xiaohu,LI Chunxue,GU Wenqi,ZENG Ming

(Research Advisory Center of Energy and Electricity Economics,
North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: The optimal strategy of TOU(Time-Of-Use) electricity pricing is studied based on the game theory. A TOU pricing model between a grid company and single user type is established,which considers the cost of power demand fluctuation,the user's load response to varying price and the user satisfaction. The features of different user types are analyzed,based on which,the pricing model is extended to multiple user types. With a practical example,the backward induction is applied to obtain the Nash equilibrium of game model,and the optimal electricity price and the optimal electricity consumption are compared among different pricing strategies. Results show that,the optimal TOU electricity pricing strategy obtained by the proposed model can decrease the peak-valley difference and reduce the average price to ensure the benefits of both company and user;the benefits of different user types depend on their ability of response to electricity price.

Key words: game theory; time-of-use electricity price; power demand fluctuation; user satisfaction; Nash equilibrium