

DOI: 10.7667/PSPC170311

基于用户满意度和 Ramsey 定价理论的峰谷分时 阶梯电价联合模型

薛云涛¹, 陈祎超², 李秀文³, 吴华钊³

(1. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510620; 2. 国网福建电力有限公司厦门供电公司, 福建 厦门 361001;
3. 哈尔滨工业大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055)

摘要: 电价的合理制定在资源配置、节能减排、企业发展和居民生活等方面具有重要意义。从电力的消费者和生产者两方面同时分析, 并考虑消费需求侧的异质性, 构建以用户满意度最大为目标的阶梯电量优化模型。同时, 基于 Ramsey 定价理论确定各阶梯电价, 并兼顾电力企业的盈亏平衡和各类用户的弹性需求变化, 提出峰谷分时阶梯电价联合模型。经实例表明, 该定价联合模型有利于引导用户合理用电和电网的峰谷平衡, 并体现了公平负担的原则。

关键词: 电价联合模型; 用户满意度; Ramsey 定价理论; 需求弹性矩阵

Federation model of TOU and ladder price based on customer satisfaction and Ramsey pricing

XUE Yuntao¹, CHEN Yichao², LI Xiuwen³, WU Huazhao³

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510620, China; 2. State Grid Xiamen Electric Power Supply Company, Xiamen 361001, China; 3. Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: The pricing of electricity is of great significance in resource configuration, energy-saving, emission reduction, enterprise development, and resident life, et al. The analysis is performed from both sides of electricity consumer and producer. Based on customers' individual requirements, the ladder power optimization model is established with maximum customer satisfaction. At the same time, based on the Ramsey pricing theory, the ladder price of electricity is made. And consideration is given to both power enterprise' breaking even and changing needs for all kinds of users, then the federation model of TOU and ladder price is proposed. The analysis of an example shows that the federation model is advantageous for rational power consumption, peak clipping and valley filling, and reflects the principle of fair sharing of the cost.

Key words: federation price model; customer satisfaction; Ramsey pricing theory; demand elasticity matrix

0 引言

在发电和售电市场引入竞争, 利用市场手段优化电力资源配置成为各国进行电力市场改革的途径^[1-3]。2015年3月, 中共中央国务院发布了《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》^[4], 清晰阐述了我国电力体制的现状亟需解决的问题, 并指出电力销售服务的核心要素是电价。电力市场环境需要对现有电价机制进行改革和创新, 自20世纪80年代末以来, 席卷全球的电力改革浪潮使得电力的定价策略发生了巨大的变化^[5-6]。目前, 我国的电力定价可分为发电企业定价和电网经营企业定价两

部分, 电网经营企业定价又可分为输配电服务定价和辅助服务定价等^[7-8]。

目前, 已有许多文献对电价实施方案的设计问题进行深入研究, 但研究问题的重点和运用的理论方法不一。文献[9]指出电价是电力销售服务的核心要素, 并提出了以菜单电价为核心理念的新型电价体系, 为适应电力市场环境下电力销售服务提供了重要参考。文献[10]针对含风电场的电力系统, 提出了两阶段负荷需求响应模型, 一定程度上降低用户侧的节点电价, 并起到了“削峰填谷”的作用。文献[11]基于电量电价弹性矩阵构建了居民分时阶梯电价水平的分层计算模型, 两层联合优化, 但未能充分考

考虑用户对分档电量划分的满意响应度。文献[12]综合考虑 DG 投资商、配电网公司及用户等相关主体的经济效益产生影响, 建立了多目标优化函数以确保 DG 投资商的投资利益和电网改善经济效益的最大化, 并利用评价协调函数^[13]间接地增加用户的经济效益。文献[14]基于心理学方法构建用户对售电公司及用电合同的选择行为模型, 以均一电价和保底封顶实时电价为主, 计及了可中断负荷影响。文献[15]在分时电价的基础上, 为目前新型节能城市的 V2G 系统建立了以充电成本和负荷方差最小化的多目标优化调度模型, 并据此给出了相关电价制定的建议。文献[16]提出基于全成本电价的电源、电网、负荷的互动模式与方法, 旨在最大程度地减少电价的交叉补贴。文献[17]将博弈理论引入输配电价的制定, 为协调农村用户电价政策的利益关系提出了新思路。综上所述, 本文针对电力企业售电定价问题, 从供应侧和需求侧双向分析, 提出如下分析。首先根据消费者需求的异质性, 结合电力企业的削峰填谷需要, 建立以用户满意度最大为目标的阶梯电量优化模型, 制定分时阶梯电价策略, 并将用户分为若干细分市场; 同时应用 Ramsey 定价原理确定各阶梯价格, 确保电力资源的最优化配置, 并减少电价的交叉补贴; 最后结合用户需求价格弹性矩阵, 以削峰填谷为目标建立分时阶梯电价优化模型。该模型综合权衡了供应侧和需求侧的利益和需求, 对电力市场的健康发展有一定的参考价值。

1 分时阶梯电价

阶梯电价是一种非线性递增式电价形式。如图 1 所示, 阶梯电价是指把用户用电量设置为若干个阶梯, 分阶梯次累计递增定价和结算电费的电价制度。相较统一电价, 阶梯电价可以发布价格信号和减小交叉补贴的影响, 从而起到一定的节能减排效果^[18]。但阶梯电价使电网调峰面临更大考验, 因此需要结合考虑分时电价的特点。

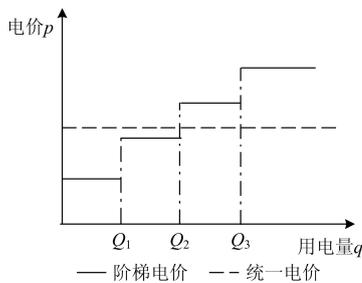


图 1 阶梯电价与统一电价

Fig. 1 Step tariff and uniform pricing

分时阶梯电价是一种在用电时间和消费增量维度上的二元非线性价格形式, 即在阶梯电价的基础上在各阶梯内再实行分时电价, 将分时电价策略及阶梯电价策略同时实施。本文只考虑高峰、低谷两段, 有时可考虑高峰、平段、低谷三段。四阶梯峰谷分时阶梯的售电形式如表 1 所示。

表 1 四阶梯峰谷分时阶梯电价

Table 1 Two time segment and four-step tariff

阶梯	用电量	峰时段/电价	谷时段/电价
第 1 阶梯	$q \leq Q_1$	$P_{1,p}$	$P_{1,o}$
第 2 阶梯	$Q_1 < q \leq Q_2$	$P_{2,p}$	$P_{2,o}$
第 3 阶梯	$Q_2 < q \leq Q_3$	$P_{3,p}$	$P_{3,o}$
第 4 阶梯	$Q_3 < q$	$P_{4,p}$	$P_{4,o}$

2 Ramsey 定价理论

电力市场的定价与补贴机制关系着国民经济的发展。由于巨额的固定成本, 导致其平均成本要比边际成本高很多, 如果采用边际成本定价法会导致电力企业的巨额亏损; 相反如果采用盈亏平衡定价则会导致社会福利的净损失。所以必须把需求侧和供应侧同等对待, 在电力市场折中选取合适的价格^[19]。而这个介于边际成本和盈亏平衡之间, 选取合适的价格水平正好可以应用 Ramsey 定价理论。Ramsey 定价的基本思想是在保证企业收支平衡的前提下, 实现社会总福利最大, 即消费者剩余与生产者剩余之和的最大化。假设电力企业为 n 类用户提供服务, 且各类用户的需求相互独立, 交叉需求价格弹性为零。消费者总剩余 CS 和生产者剩余 PS 分别为

$$\begin{cases} CS = \sum_{k=1}^n \int_0^{q_k} D_k^{-1}(q) dq - \sum_{k=1}^n p_k q_k \\ PS = \sum_{k=1}^n p_k q_k - C(q_1, \dots, q_n) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $D_k^{-1}(q)$ 为第 k 类用户的需求逆函数; p_k 是第 k 类用户电价; q_k 为第 k 类用户的电力消费量; $C(q_1, \dots, q_n)$ 表示供电成本。

上述问题可进一步整理为

$$\begin{cases} \text{Max}(CS + PS) \\ \text{s.t.} \sum_{k=1}^n p_k q_k \geq C(q_1, \dots, q_n) \end{cases} \quad (2)$$

引入拉格朗日乘子 λ , 再分别对 q_k 求一阶偏导, 可得 Ramsey 定价公式

$$\frac{p_k - MC_k}{p_k} = \frac{\lambda}{1 + \lambda} \frac{1}{|\eta_k|} \quad (3)$$

式中： MC_k 为第 k 类用户供电的边际成本； η_k 为第 k 类用户的需求价格弹性系数。另外，一般称 $R = \frac{\lambda}{1+\lambda}$ 为 Ramsey 指数。

该式表明，每类用户的价格在边际成本上的涨价幅度 $(p_k - MC_k)/p_k$ 与其需求价格弹性成反比，符合反弹性规则。Ramsey 定价考虑用户需求价格弹性对产品价格的影响，如果对需求价格弹性较大的用户过高提价，就会引起其需求量的明显减小，致使消费者福利损失^[20]。

3 基于分时阶梯电价的需求价格弹性

3.1 各阶梯的电价需求弹性

阶梯电价属于非线性定价，它对电力用户在不同电量消费段的消费单元收取不同的价格，造成了用户在不同电量消费段产生的需求价格弹性存在异质性^[21]。在用户分时阶梯电价的研究中，传统的居民用户用电需求价格弹性不能反映这种需求异质性，必须建立各电量消费分段的需求价格弹性模型。

将总的用户用电需求，按阶梯电价分档划分为不同的细分市场，相应地可以在用电量一元维度上建立各电量消费分段细分市场的电力需求价格弹性系数。

$$\eta_i = \frac{dq_i/q_i}{dp_i/p_i} \quad (4)$$

式中： i 表示第 i 阶梯的细分市场； p_i 和 q_i 分别表示第 i 阶梯电量消费分段细分市场的购电价格和需求函数。

高收入用户对电价变化的承受能力更强，因此其需求价格弹性一般小于低收入用户，即 $|\eta_i| > |\eta_{i+1}|$ 。另外，第 i 阶梯细分市场的需求函数 $D_i(p)$ ，可以表示为

$$\ln(q_i) = \eta_i \cdot \ln(p_i) + \ln(k_i) \quad (5)$$

式中， k_i 为常数。

3.2 基于峰谷分时的电价弹性矩阵

电力负荷曲线有着明显的高峰低谷现象，通过划分峰谷时段来确定分时电价，可引导用户合理改变用电策略，从而提高发电设备利用率。但峰谷时段的划分必将导致用户的消费行为发生改变，在峰谷分时阶梯电价模型中，某时段的用电需求不仅与该时段电价相关，还受到其他时段电价的影响。

为反映用电需求与峰谷价格间的这种关系，需根据自弹性系数和交叉弹性系数的概念^[21]，建立峰谷分时的电价弹性矩阵

$$E_i = \begin{bmatrix} e_{i,pp} & e_{i,po} \\ e_{i,op} & e_{i,oo} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $e_{i,pp}$ 和 $e_{i,oo}$ 分别为第 i 阶梯电量消费分段的峰时段和谷时段自弹性系数，其值为负值； $e_{i,po}$ 和 $e_{i,op}$ 为第 i 阶梯电量消费分段的峰时段和谷时段间的交叉弹性系数，其值为正值。

此时，各时段的需求函数不仅是该时段电价的函数，也是其他时间段电价的函数，因此，对于峰谷时段可得到式(7)。

$$\begin{bmatrix} \partial q_{i,p}/q_{i,p} \\ \partial q_{i,o}/q_{i,o} \end{bmatrix} = E_i \begin{bmatrix} \partial p_{i,p}/p_{i,p} \\ \partial p_{i,o}/p_{i,o} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中： $q_{i,p}$ 和 $q_{i,o}$ 分别为第 i 阶梯峰谷时段的电量需求； $p_{i,p}$ 和 $p_{i,o}$ 分别为第 i 阶梯峰谷时段的电价。

4 分时阶梯电价水平计算模型

4.1 阶梯电量优化模型

实行阶梯电价不仅是为了消除电价交叉补贴并引导用户节能减排，更是为了补贴低收入群体，将政府“暗补”转成“明补”^[22-23]。因此，在将用户需求用电量分为若干阶梯时，需对用户基本用电需求部分实行较低电价，而对于超过基本需求的电量实行较高电价。同时，也根据阶梯电价的电价分布特点，用户会对各阶梯电量的划分有如下期望。

如图 2，横轴为用户用电量 q ，纵轴为用户数 F ， Q_1 、 Q_2 、 Q_3 为各阶梯电量。对于用电量在 q_1 的用户，将希望阶梯电量 Q_1 接近自身的用电需求，即 $(Q_1 - q_1)$ 越小越好，因为该阶梯所分电量越少，其相应的电价越低；相反，对于用电量为 q_2 的用户，不会希望阶梯电量 Q_2 接近自身的用电需求，而希望阶梯电量 Q_1 能接近其用电需求，即 $(q_2 - Q_1)$ 最小；以此类推，对于用电量为 q_2 的用户，希望 $(q_3 - Q_2)$ 越小越好。

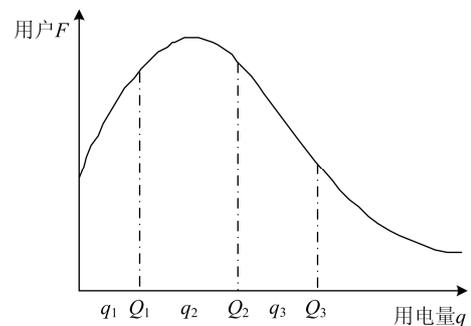


图 2 电力用户用电量分布

Fig. 2 Electricity distribution of electricity users

根据以上对用户消费期望分析, 为最大化用户对各阶梯电量划分的满意程度, 有如下阶梯电量的优化目标:

$$\begin{aligned} \min Z = & \int_0^{Q_1} F(q) \cdot (Q_1 - q)^\gamma dq + \\ & \sum_{i=1}^{n-2} \int_{Q_i}^{Q_{i+1}} F(q) \cdot (q - Q_i)^\gamma dq + \\ & \int_{Q_{n-1}}^{\infty} F(q) \cdot (q - Q_{n-1})^\gamma dq \quad (8) \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} Q_1 < Q_2 \\ Q_2 < Q_3 \\ \dots \end{cases} \end{aligned}$$

Z 为用户不满意度, γ 为膨胀系数函数, 表示随着用户用电量偏离阶梯分档电量值, 用户的不满程度的膨胀状况。当 $0 < \gamma < 1$ 时, 用户的不满程度会减速上升; 当 $\gamma > 1$ 时, 用户的不满程度会加速上升; 当 $\gamma = 1$ 时, 用户的不满程度会直线上升。

4.2 各阶梯平均电价水平计算模型

用户阶梯电价应以电能资源优化配置为目标, 并满足一定成本补偿约束, 同时各阶梯电价水平上涨幅度应满足一定约束要求。第一阶梯为基础用电量, 此阶梯内电量较少, 且电价一般也较低, 目的是要保证低收入居民能获得基本生活用电的需要; 第二阶梯电价比第一阶梯高, 但需在合理电价水平定价; 而第三阶梯以上除合理电价水平外, 还考虑外部成本内部比, 并反映资源稀缺程度定价; 更高阶梯可按绿色电力定价^[23]。

根据以上分析, 并以现行电价水平为基础, 本文第一阶梯电价保持与现行电价水平一致, 其他阶梯电价可以通过 Ramsey 定价原理确定^[19-20], 且应满足成本补偿约束:

$$\begin{cases} \frac{p_i p_j - MC_j}{p_j p_i - MC_i} = \frac{\eta_i}{\eta_j} \\ \text{s.t.} \sum_{i=1}^n (p_i \cdot q_i) = C(q_1, \dots, q_n) \end{cases} \quad (9)$$

可令各电量消费分段的需求价格响应度为常数^[24], 对式(9)整理求解, 获得第 i 阶梯平均电价水平的计算模型为

$$p_i = \frac{MC_i}{1 + \frac{R}{\eta_i}} \quad (10)$$

式中: $i = 2, \dots, n$, 其中 n 为阶梯电价总阶梯数目; 同时 R 满足式(11)。

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n (p_i - MC_i) \cdot q_i - F = \\ \sum_{i=1}^n \frac{R \cdot k_i}{-\eta_i} \cdot \left(\frac{MC_i \cdot \eta_i}{\eta_i + R} \right)^{1+\eta_i} - F = 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式中: F 为固定成本; k_i 为第 i 阶梯电量消费分段需求函数的指数。

4.3 用户承受能力和售电利润的约束

不同收入水平的用户对电价的承受能力不同, 因此各阶梯电价的分档电价应结合各用电档次用户的承受能力, 保证电价的调整对其正常生活不会构成太大的影响^[25]。同时为实现公平, 各档次用户的用电均价应满足约束式(12)。

$$\sum_{i=1}^n p_i \cdot \Delta q_i \leq G_i \cdot \beta_i \quad (12)$$

式中: $p_i = \frac{p_{i,p} \cdot q_{i,p} + p_{i,o} \cdot q_{i,o}}{q_{i,p} + q_{i,o}}$ 为处于第 i 阶梯的用户平均电价;

Δq_i 为该用户在第 i 阶梯使用的电量; G_i 为处于第 i 阶梯的用户平均收入; β_i 为处于第 i 阶梯的用户最高承受限度。

另外, 价格与用户需求变量间满足等式约束方程(13)。

$$\begin{bmatrix} q_{i,p} \\ q_{i,o} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_{i,p}}{p_{i,p}} \\ \frac{\partial p_{i,o}}{p_{i,o}} \end{bmatrix}^T \mathbf{E}_i^T \begin{bmatrix} q_{i,p}^0 & 0 \\ 0 & q_{i,o}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_{i,p}^0 \\ q_{i,o}^0 \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

式中: $q_{i,p}$ 为和 $q_{i,o}$ 为调整价格后第 i 阶梯峰时段和谷时段的用电量; $q_{i,p}^0$ 和 $q_{i,o}^0$ 为调整价格之前第 i 阶梯峰时段和谷时段的用电量; \mathbf{E}_i^T 为式(2)中第 i 阶梯基于峰谷电价的 2×2 阶电量电价弹性矩阵, 矩阵中的系数为常数, 可由电量电价历史数据统计获得。

对电力公司执行峰谷电价应当满足一定的成本补偿需求, 即不能以减少利润为代价实施削峰填谷策略, 所以有约束式(14)。

$$\sum_{i=1}^n (q_{i,p} \cdot p_{i,p} + q_{i,o} \cdot p_{i,o}) \geq \sum_{i=1}^n (q_{i,p}^0 \cdot p_i^0 + q_{i,o}^0 \cdot p_i^0) \quad (14)$$

然而, 虽然阶梯电价控制了总用电量, 促进了用户节约用电, 但并不利于削峰填谷, 尽管采用了峰谷电价策略, 其实现的效果程度并不一定完全符合电网公司的供电要求, 为时还需再次优化调整, 拉平日负荷曲线并最小化峰谷差。鉴于以上对多目

标优化协调不足的问题分析, 本文以最小化峰谷电量之差为目标函数, 建立分时阶梯电价优化模型:

$$\min L = \left(\sum_{i=1}^n q_{i,p} - \sum_{i=1}^n q_{i,o} \right) \quad (15)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{i=1}^n p_i \cdot \Delta q_i \leq G_i \cdot \beta_i \\ \sum_{i=1}^n (q_{i,p} \cdot p_{i,p} + q_{i,o} \cdot p_{i,o}) \geq \sum_{i=1}^n (q_{i,p}^0 \cdot p_i^0 + q_{i,o}^0 \cdot p_i^0) \\ \begin{bmatrix} q_{i,p} \\ q_{i,o} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_{i,p}}{\partial q_{i,p}} \\ p_{i,p} \\ \frac{\partial p_{i,o}}{\partial q_{i,o}} \\ p_{i,o} \end{bmatrix}^T \mathbf{E}_i^T \begin{bmatrix} q_{i,p}^0 & 0 \\ 0 & q_{i,o}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} q_{i,p}^0 \\ q_{i,o}^0 \end{bmatrix}^T \\ p_i = \frac{p_{i,p} \cdot q_{i,p} + p_{i,o} \cdot q_{i,o}}{q_{i,p} + q_{i,o}} \\ p_{i,p} < p_{i+1,p}, \quad p_{i,o} < p_{i+1,o}, \quad p_{i,o} < p_{i,p} \end{cases}$$

5 算例分析

5.1 阶梯电量优化

以某城市某一供电区域的居民生活用电为例, 本文设电价分为四个梯度。首先以用户满意度最大, 即不满意度 Z 最小为目标函数, 同时, 本文设膨胀系数 $\gamma = 1$, 即用户的不满意度随着用户希望的阶梯电量偏离值得增大而增大, 此时式(8)可进一步等效化简为

$$Z = \sum_{j=1}^{m_1} Q_1 - q_{1j} + \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{m_n} q_{ij} - Q_i \quad (16)$$

式中: n 表示阶梯总数; Q_i 为阶梯电量; q_{ij} 表示处于第 i 阶梯的第 j 个用户的用电量; m_i 表示为处于第 i 阶梯的居民用户总数。经 Matlab 优化计算后可得表 2。

表 2 阶梯电量优化结果

阶梯分类	1	2	3	4
阶梯电量/kWh	0~162	163~253	254~353	>353
峰谷比值/%	65, 35	72, 28	78, 22	76, 24
电量比重%	69.91	20.80	7.92	1.37
用户分布/%	33.94	36.48	22.95	6.63

5.2 Ramsey 电价

同时由原始数据, 根据式(4)和式(5), 拟合得到处于各阶梯用户的需求函数曲线 $D_i(p)$, 并得到弹性系数 η_i 和常数 k_i 。

考虑到电力企业供电边际成本具有不确定性, 这里假设供电企业为处于不同阶梯的用户供电的边际成本短期内不变, 即 MC 为定值, 约为 3.3250 元/kWh。根据式(11), 可得 Ramsey 指数 R 为 0.214 282, 并将所得结果代入式(10), 即可求得各阶梯的平均电价 p_i 。同时, 可得各阶梯用户的用电需求弹性矩阵系数及其他信息。将以上结果经整理, 可得表 3。

表 3 Ramsey 定价理论优化结果及用户信息

阶梯分类	1	2	3	4
弹性系数	-0.95	-0.73	-0.51	-0.33
Ramsey 电价/元	0.419 7	0.460 0	0.560 5	0.926 8
峰时电价/元	0.466 7	0.492 9	0.595 6	1.050 8
谷时电价/元	0.332 3	0.375 6	0.436 2	0.534 1
用户收入/元	5 700	16 000	25 000	35 000
承受能力/%	4.5	5.0	6.5	9.0

5.3 分时阶梯电价优化

考虑用户承受能力和供电公司售电利润的约束, 可得约束条件式(12)和式(14), 由于价格调整会使用户的消费需求发生相应改变, 其变化关系可由式(13)表示。同时, 为更好地实现削峰填谷, 以最小化峰谷差为目标函数, 也考虑到其他条件约束, 即可得到分时阶梯电价的优化模型, 如式(15)所示, 经优化求解后, 结果如表 4 所示。

表 4 分时阶梯电价优化结果

阶梯分类	1	2	3	4
平均电价/元	0.398 4	0.471 1	0.605 0	0.757 4
峰时电价/元	0.442 3	0.523 7	0.627 4	0.823 3
谷时电价/元	0.351 2	0.403 7	0.505 5	0.581 7
用户支出变化/%	-16.45	-14.26	17.43	13.42
峰谷比值/%	51.85	56.18	81.63	72.73
	48.15	43.82	18.37	27.27
电量比重/%	67.76	17.18	12.30	2.76

由表 4 可知, 以最小化峰谷差为目标的分时阶梯电价优化模型, 使得处于各阶梯的峰时段的电量比重明显减少, 谷时段的比重明显增加, 尤其是作为基础阶梯的第一和第二阶梯, 对于属于高消费阶梯的第三和第四阶梯, 效果不太明显。处于高消费阶梯的用户电费支出增加, 而处于基础阶梯的用户电费支出减少, 由此可知谷时段的电量下降主要来自于低收入用户。而且谷时段电量的增加, 也导致了第一阶梯平均电价下降, 因此也在某种程度上补贴了低收入用户。

从表 5 可知, 在以最小峰谷差的目标的优化模

型中, 制定新的峰谷分时阶梯电价并不意味着电力企业会价格调整会导致减少产量或者收入增加。相反, 在减小电量峰谷差时, 电力企业还需要维持电力供应水平, 且利润收入基本不变。另外, 结合表 4 可知电力企业在削峰填谷时, 主要是在向高收入用户征收更多的电费以补贴鼓励低收入用户改变用电习惯。

表 5 电力企业数据对比

Table 5 Power enterprise data contrasting

	收入/万元	生产电量/kW·h	峰谷差/kW·h
Ramsey 电价	17.781	39.853 万	14.057 万
优化电价	17.781	39.846 万	5.446 万

6 结论

本文针对电力企业售电定价问题, 提出了几点考虑, 即电价的制定不仅要消除电价交叉补贴, 体现公平负担的原则, 还要保证用户的用电需求和满意度, 并兼顾电力企业的盈亏平衡和削峰填谷。然后建立了阶梯电量优化模型以确保用户满意度, 基于 Ramsey 定价理论以最小化峰谷电量之差为目标, 建立分时阶梯电价优化模型。最后结合实例分析可得如下结论。

(1) 以峰谷时段和用电消费量为维度的分时阶梯售电策略, 有利于减少电价中严重的交叉补贴, 同时也可引导用户节能减排, 并优惠低收入群体。

(2) 基于 Ramsey 的定价理论在电力企业的应用, 不仅确保了居民用户的社会福利, 也保证了电力企业的盈亏平衡, 使得对电力资源配置的消极影响达到最小。

(3) 以最小化峰谷电量之差为目标的分时阶梯电价优化模型, 在不减少电力企业利润和不影响居民生活的情况下, 可以确保削峰填谷策略的实施。

参考文献

[1] 蔡德华, 陈柏熹, 程乐峰, 等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 51-56.
CAI Dehua, CHEN Baixi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 51-56.

[2] LI J H, FANG J K, WEN J Y, et al. The Optimal trade-off between regulation and wind curtailment in the economic dispatch problem[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4): 52-60.

[3] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenli, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 108-120. DOI 10.1186/s41601-016-0024-y.

[4] 中共中央、国务院关于进一步深化电力体制改革的若干意见(中发〔2015〕9号)[Z]. 2015.

[5] XING H, CHENG H, ZHANG L. Demand response-based and wind farm integrated economic dispatch[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, 1(4): 47-51.

[6] 杨晓东, 张有兵, 翁国庆. 基于虚拟电价的电动汽车充放电优化调度及其实现机制研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 52-62.
YANG Xiaodong, ZHANG Youbing, WENG Guoqing, et al. Virtual time-of-use tariffs-based optimal scheduling and implementation mechanism of electric vehicles charging and discharging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 52-62.

[7] 周逢权, 张萌, 甄立敬, 等. 基于价值最优的区域能源管控中心价值模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 29-34.
ZHOU Fengquan, ZHANG Meng, ZHEN Lijing, et al. Value model study of regional energy management and control center based on value optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 29-34.

[8] 沈小龙, 贾仁安. 转型期电力供应系统应用基本人树三步逐层建模法建模及其功能研究[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(10): 2555-2566.
SHEN Xiaolong, JIA Renan. Modeling and functional study of power supply system in the transferring period based on the three-step stepwise modeling method of rate fundamental in-tree[J]. System Engineering—Theory & Practice, 2013, 33(10): 2555-2566.

[9] 白杨, 李昂, 夏清, 等. 新形势下电力市场营销模式与新型电价体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 10-16.
BAI Yang, LI Ang, XIA Qing, et al. Electricity business marketing modes in the new environment and new electricity pricing systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 10-16.

[10] 曹佳, 马洪艳, 刘扬, 等. 基于节点电价的需求响应策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1536-1542.
CAO Jia, MA Hongyan, LIU Yang, et al. Research on demand response strategy based on nodal price[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1536-1542.

[11] 黄海涛. 居民分时阶梯电价联合优化模型研究[J]. 电

- 网技术, 2012, 36(10): 253-258.
- HUANG Haitao. A joint optimization model of residential time-of-use block electricity rate[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 253-258.
- [12] 施泉生, 郭良合, 张孝君, 等. 综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 85-91.
- SHI Quansheng, GUO Lianghe, ZHANG Xiaojun, et al. Research on optimal configuration of distributed generation considering economic benefits of the multi-agent[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 85-91.
- [13] 张节潭, 程浩忠, 姚良忠, 等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(16): 1-7.
- ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, YAO Liangzhong, et al. Study on siting and sizing of distributed wind generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(16): 1-7.
- [14] 罗琴, 宋依群. 售电市场环境下的可中断负荷的营销策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 134-139.
- LUO Qin, SONG Yiqun. Marketing strategy in competitive retail market considering interruptible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 134-139.
- [15] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23.
- TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.
- [16] 陈典, 钟海旺, 夏清. 基于全成本电价的安全约束经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(5): 1190-1199.
- CHEN Dian, ZHONG Haiwang, XIA Qing. Security constrained economic dispatch based on total cost price[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(5): 1190-1199.
- [17] 罗斌, 李慧. 中国农村居民电价政策的博弈模型和利益协调因素分析[J]. 管理世界, 2015(3): 170-171.
- LUO Bin, LI Hui. Chinese rural residents electricity price policy based on game model and analysis of interest coordination[J]. Management World, 2015(3): 170-171.
- [18] HATAMI A, SEIFI H, SHEIKH-EL-ESLAMI M K. A stochastic-based decision-making framework for an electricity retailer: time-of-use pricing and electricity portfolio optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26 (4): 1808-1816.
- [19] CHARWAND M, AHMADI A, HEIDARI A R, et al. Benders decomposition and normal boundary intersection method for multi-objective decision making framework for an electricity retailer in energy markets[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 9(4): 1475-1484.
- [20] GHAYENI M, GHAZI R. Transmission network cost allocation with nodal pricing approach based on Ramsey pricing concept[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(3): 384-392.
- [21] YANG Wenxian, YU Rongshan, NAMBIAR M. Quantifying the benefits to consumers for demand response with a statistical elasticity model[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2014, 8(3): 503-515.
- [22] 崔强, 王秀丽, 王维洲. 考虑风电消纳能力的高载能用户错峰峰谷电价研究[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 946-952.
- CUI Qiang, WANG Xiuli, WANG Weizhou. Stagger peak electricity price for heavy energy-consuming enterprises considering improvement of wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 946-952.
- [23] 朱成章. 我国阶梯电价的路径选择[J]. 中国电力企业管理, 2010(1): 36-39.
- ZHU Chengzhang. The choice of chinese multistep electricity price[J]. China Power Enterprise Management, 2010(1): 36-39.
- [24] JIA Liyan, TONG Lang. Dynamic pricing and distributed energy management for demand response[J]. IEEE Transactions on Smart Grid. 2016, 7(2): 1128-1136.
- [25] NOJAVAN S, MOHAMMADI-IVATLOO B, ZARE K. Optimal bidding strategy of electricity retailers using robust optimization approach considering time-of-use rate demand response programs under market price uncertainties[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(4): 328-338.

收稿日期: 2017-03-06; 修回日期: 2017-06-28

作者简介:

薛云涛(1991—), 男, 硕士, 研究方向为电力市场、电力调度等; E-mail: yuntaoxue@163.com

陈祎超(1993—), 男, 硕士, 研究方向为电力经济、电力市场等; E-mail: 472138692@qq.com

李秀文(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为并联机器人控制系统研究、运动控制研究等。E-mail: simpafacgoole@gmail.com

(编辑 张爱琴)