

# 激励性监管下的电力市场需求侧分时电价机制研究

李俊, 刘俊勇, 张力, 胥威汀

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 当前中国电力市场体制下, 供电公司需要制定需求侧分时电价以提高电网效率, 而政府对销售电价体系制定承担着监管责任。从 Ramsey-Boiteux 定价的基本思路出发, 将不同时间段的电力供给看作具有相互替代性的不同服务, 考虑电力负荷和分时电价的特殊性, 建立基于社会福利最大化的需求侧分时电价模型。模型将峰时段可能造成的阻塞成本上涨或新增电网投资作为外部性因素, 引入超弹性概念修正各时段负荷需求价格弹性, 并增加带权重的 Ramsey 指数保障社会福利分配的相对公平, 为政府确定分时电价水平以激励性监管供电公司的需求侧分时电价提供了理论参考。

**关键词:** 激励性监管; 分时电价; Ramsey-Boiteux 定价; 电力市场; 需求侧

**Abstract:** Under the current system of electricity market power company needs to formulate time-of-use (TOU) price to improve the efficiency of the grid but the government bears the responsibility for the regulation of the TOU pricing. Based on the basic idea of the Ramsey-Boiteux pricing mechanism and considered the characteristics of power load with TOU price regarding the power supply of different times as different service which can substitute each other the TOU pricing model is established based on the maximization of social welfare. The model takes the increased congestion costs of peak load and the additional network investments as external factors uses the concept of super-elastic price instead of price elasticity and increases the weight of the Ramsey index to protect the fair distribution of social welfare relatively which provides a reference for government to regulate the TOU price.

**Key words:** incentive regulation; time-of-use (TOU) price; Ramsey-Boiteux pricing; electricity market; demand side management (DSM)

**中图分类号:** TM715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0005-04

## 0 引言

供电公司制定合理的需求侧分时电价, 通过电价信号引导电力用户调整用电行为合理用电, 可促进资源的优化配置, 提高整个电力系统的效率。而电力作为一种关系国计民生的垄断性公用品, 对其销售价格的制定, 政府需监管价格水平 (最高限价), 防止供电公司利用分时电价过分剥夺消费者剩余。因此, 政府担负着分时电价的激励性监管职责, 政府如何确定分时电价最高限价或价格水平以激励性监管供电公司制定合理需求侧分时电价, 是亟需解决的问题。

国内外大量的电力工作者及学者在需求侧分时电价方面做了深入细致的研究。Kischen D. S 等着重研究了负荷需求弹性并在弹性角度建立了需求侧分时电价模型, 开辟了需求侧研究分时电价的先河<sup>[1]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金 (50977059)

汤玉东、吴军基等基于 DSM 的总目标建立了分时电价的数学模型, 并运用模糊半梯度隶属度函数方法, 从负荷曲线上各点分别处于峰时段和谷时段的可能性入手, 优化了峰谷时段的划分办法<sup>[2]</sup>。面对分时电价模型中遇到的多目标规划问题, 谭忠富等将目标函数中最大最小值问题转化为约束条件, 构造新多目标非线性优化模型, 然后采用模糊数学中的最满意方法求解多目标模型<sup>[3-4]</sup>。曾绍伦、任玉珑等将博弈论引入分时电价研究中, 在政府限价的前提下允许电力公司调整电价以实现电力负荷控制的目标, 利用博弈论制定了由政府确定电价水平、电力公司确定电价、电力用户确定用电量的分时电价模型<sup>[5]</sup>。从用户价格响应和满意度的角度, 丁伟、袁家海等<sup>[6]</sup>提出建立用户的电价响应矩阵以反映用户对峰谷分时电价的响应, 并综合考虑用户用电方式的满意度和电费支出的满意度, 给出了峰谷分时电价优化决策模型。文献<sup>[7]</sup>重点研究了用户反应机制, 通过多代理仿真研究

分时电价下的用户分时反应机制,讨论了供电公司对于分时电价政策的调整问题。由于实施需求侧分时电价后供电公司风险增大,文献 [8-11]从成本角度,考虑节能调度、价格联动等影响因素,对发电侧和需求侧联动分时电价进行了研究。以上研究都是站在供电公司角度,考虑实施怎样的需求侧分时电价对供电公司有利,而需求侧分时电价作为销售电价,政府具有监管的职能,为防止供电公司利用分时电价过分剥夺消费者剩余,这就需要对从政府的角度研究对需求侧分时电价的规制水平。

Ramsey 次优定价体系已被公认为针对垄断行业激励性监管的有效方法。但由于电力负荷及电力网络的特点,峰时段的大量负荷需求可能引起阻塞成本上涨或电网投资增加等外部性因素发生变化,同时不同时间段的电力需求并非相互独立而是根据价格信号彼此影响的,和拉姆齐定价的假设条件不符。再者电力服务还具备公用品的特点,其弹性相对较小的服务大部分是生活用电需求,这部分电价的调控和基本的拉姆齐定价结论矛盾<sup>[12]</sup>。在 Ramsey-Boiteux 定价思路的基础上,引入峰时段可能造成的阻塞成本上涨或电网投资增加等作为外部性变量,将不同时段的电量供给看作相互替代性的不同服务,利用超弹性概念打破基本 Ramsey-Boiteux 定价模型中服务相互独立的假设,同时利用附带权重的 Ramsey 指数完善对低弹性市场电价的约束,通过社会福利次优制定一套基于政府角度分时电价监管水平的方法,以实现政府对供电公司实施需求侧分时电价的激励性监管。

## 1 拉姆齐定价理论

Ramsey 定价是针对公共垄断行业不能实现边际成本定价情况下的次优定价理论。

假定一个公共事业部门提供  $n$  项服务,  $k=1, \dots, n$  其数量为  $q=(q_1, \dots, q_n)$ 。价格向量  $p=(p_1, \dots, p_n)$  的需求函数为  $q_k=D_k(p_1, \dots, p_n)$ 。符号  $\eta_k=-[\partial D_k / \partial p_k] / [D_k / p_k]$  表示服务  $k$  的需求弹性。在需求独立的情况下,  $q_k$  仅仅是  $p_k$  的函数,且

$$\eta_k = -[\partial D_k / \partial p_k] / [D_k / p_k]$$

公司收入为  $R(q) = \sum_{k=1}^n p_k q_k$ 。设  $C(q_1, \dots, q_n)$  表示成本函数。如果联合成本为  $k_0$ , 不变的边际成本为  $c_1, \dots, c_n$ , 则

$$C(q_1, \dots, q_n) = k_0 + \sum_{k=1}^n c_k q_k$$

Ramsey 定价的基本思想是在保证垄断企业收支平衡的前提下,实现消费者剩余最大化,即

$$\begin{aligned} \text{OF: } & \text{MAX} \{S(q) - C(q)\} \\ \text{ST: } & R(q) - C(q) \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

为计算上的便利,用其对偶规划模型代替模型 (1),即在提供满足 Ramsey-Boiteux 基准社会福利的基础上使公司利润达到最大。

$$\begin{aligned} \text{OF: } & \text{MAX} \{R(q) - C(q)\} \\ \text{ST: } & S(q) - C(q) \geq S(q^*) - C(q^*) \end{aligned} \quad (2)$$

对模型 (2), 设  $1/\lambda$  表示约束的影子价格, 当需求独立时, 对  $q_k$  一阶求导可得 Ramsey 定价公式为

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

式 (3) 中  $\lambda / (1 + \lambda)$  表示 Ramsey 指数, 用  $R$  表示。式 (3) 表明, 每类服务的价格在边际成本上的涨价幅度  $(p_k - c_k) / p_k$  与其需求价格弹性成反比, 这就是著名的反弹性规则 (inverse elasticity rule IER)。Ramsey 定价考虑服务的边际成本、用户需求价格弹性对服务价格的影响, 在边际成本一定的情况下, 对于需求价格弹性较大的服务, 如果提价过高, 就会引起需求量的明显减小, 致使消费者福利损失; 如果给需求价格弹性较小的服务提价, 引起的需求量变动相对较小, 对社会福利的影响也较小。

由于模型 (2) 中 Ramsey-Boiteux 基准社会福利没有严格的标准, 为增加激励性, Ramsey 定价模型的进一步演化成为最高限价模型, 在此不再详述。

## 2 基于社会福利最大化的需求侧分时电价模型

### 2.1 模型介绍

基于社会福利最大化的需求侧分时电价模型是在 Ramsey-Boiteux 定价思路结合电力市场的自身特点的改进和完善, 其改进和完善主要在以下方面。

1) 由于电网建设和运营的特殊性, 如果某时段的电量超过电网最大阈值负荷, 将会造成网络瘫痪。解决该问题必然导致阻塞成本增加或电网投资增加。将该问题造成的阻塞成本增加或电网投资增加看作外部性变量引入模型。

2) 当分时电价发生变化时, 不同时间段的负荷之间不是相互独立而是互相替代的关系, 在各时段需求弹性的基础上引入交叉弹性进行修正, 利用修正后的超弹性概念代替基本需求价格弹性, 这就打破了传统

Ramsey-Boiteux 定价的假设条件,且更符合电力供给的特点。

3)按照传统的 Ramsey-Boiteux 定价结论,提倡涨价的低弹性市场主要是生活用电,提倡降价的高弹性市场集中在大工业用电,传统的 Ramsey-Boiteux 定价为保证垄断环境中社会福利总体相对最大化,实质上是生活用电的部分消费者剩余转移到了大工业用电,在社会福利分配方面不尽如人意。文章对低弹性市场引入分段权重的 Ramsey 指数以解决社会福利的分配问题。

## 2.2 模型假设

1)假设共有峰、平、谷 3 个不同时段,用  $k=1, 2, 3$  分别表示,不同时间段的电力供给为相互不独立的服务,服务之间存在着替代关系。 $\eta_k$  表示各时段的需求价格弹性,  $\eta_k$  表示交叉价格弹性,超弹性  $\eta_k$  表示经过修正的考虑服务之间替代关系的需求弹性,平时段的交叉价格弹性忽略不计。

2)服务的外部性用  $B_k$  表示。为方便计算,假设其为与线性关系,即

$$B_k = \begin{cases} 0 & q_k < q_{max} \\ b_1 - b_2 q_k & q_k \geq q_{max} \end{cases}$$

当峰值负荷超过阈值负荷  $q_{max}$  时,外部性表现为负值(表示增加阻塞成本或新增电网投资),且随着负荷的增加而绝对值增大。如图 1 所示。

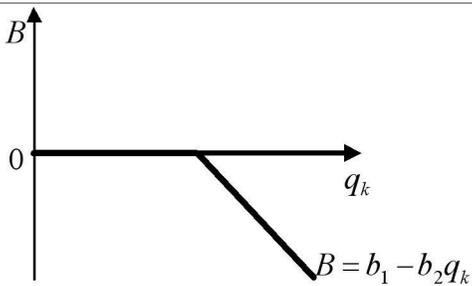


图 1 外部性示意图

3)为公平化社会福利的分配,对低弹性市场中的生活用电,利用 Ramsey 指数  $R$  设置权重进行分类。设定单个用户的基本用电量为  $\bar{q}$  实际用电量为  $q$  关系如下。

$$R = \begin{cases} 0 & q \leq \bar{q} \\ 0.5 & q > \bar{q} \end{cases}$$

即保障基本生活用电,超额的生活用电部分按照 Ramsey 定价,这也是阶梯电价的理论基础。

## 2.3 模型的建立和求解

按照 Ramsey-Boiteux 定价的基本思路,引入外

部性变量、超弹性变量和低弹性市场的 Ramsey 权重指数建立模型。

$$\begin{aligned} & \text{MAX} \{ R(q) + \sum_k B_k q_k - C(q) \} \\ & \text{ST} \begin{cases} S(q) - C(q) \geq S(q^*) - C(q^*) & (4) \\ B_k = \begin{cases} 0 & q_k < q_{max} \\ b_1 - b_2 q_k & q_k \geq q_{max} \end{cases} & (5) \\ R = \begin{cases} 0 & q \leq \bar{q} \\ 0.5 & q > \bar{q} \end{cases} & (6) \\ q_k = a_1 - a_2 p_k & (7) \\ C(q) = k_0 + \sum_{k=1}^n q_k p_k & (8) \end{cases} \end{aligned}$$

约束(4)为 Ramsey 定价的基本约束;约束(5)为外部性等式约束,结合负荷的实际情况可知,  $q_k \geq q_{max}$  仅可能出现在峰时段负荷当中;约束(6)为社会福利分配公平约束,即“生命线”电价约束,仅针对居民生活用电;约束(7)为需求约束;约束(8)为成本约束,其中,  $k_0$  表示沉没成本,即已经完成的电网投资。

经过简单的数学推导可得峰时段的电价关系为

$$\frac{(1 + \frac{2b_2 a_2}{\lambda + 1}) p - (a_1 - \frac{b_1 - 2a_1 b_2}{\lambda + 1})}{p} = R \cdot \frac{1}{\eta_1} \quad (9)$$

平时段的电价关系为

$$\frac{p - c}{p} = R \cdot \frac{1}{\eta_2} \quad (10)$$

谷时段的电价关系为

$$\frac{p - c}{p} = R \cdot \frac{1}{\eta_3} \quad (11)$$

其中,  $R$  为 Ramsey 指数;  $\eta_k$  表示各时段的需求超弹性,由交叉价格弹性和基本需求价格弹性组成<sup>[13]</sup>,其关系为

$$\begin{cases} \eta_1 = \eta_1 \cdot \frac{\eta_1 \eta_3 - \eta_{13} \eta_{31}}{\eta_1 \eta_3 + \eta_1 \eta_{13}} \\ \eta_2 = \eta_2 \\ \eta_3 = \eta_3 \cdot \frac{\eta_1 \eta_3 - \eta_{13} \eta_{31}}{\eta_1 \eta_3 + \eta_3 \eta_{31}} \end{cases} \quad (12)$$

## 2.4 模型讨论

通过对模型的分析 and 求解,可得以下结论。

1)模型的基本思想是在保证供电企业收支平衡的前提下,实现社会福利的最大化。模型以社会福利最大化为第一目标,这正是政府监管垄断公用产品销售价格最终目标。

2)由式(12)可知,用交叉价格弹性修正基本需求价格弹性后的超弹性小于其对应时段的基本需求

价格弹性, 实质上是增加了高弹性市场即峰负荷时段的价格上涨空间, 同时增加了低弹性市场即谷负荷时段的价格下降空间, 价格差的拉大更有利于利用价格信号对负荷进行削峰填谷。

3) 根据负荷的特点, 约束 (5) 只出现在峰时段 (按照常理, 其他时段负荷量超过电网最大阈值为小概率事件)。由式 (9) 可知, 外部性为负, 表示成本增加, 在其他条件不变的情况下, 外部性变量的引入将导致峰时段的电价提高。

4) 带权重的 Ramsey 指数只作用于低弹性市场的生活用电类别, 由式 (6) 可知, 在基本用电量  $q$  之下, Ramsey 指数  $R$  为 0, 将  $R=0$  带入式 (11), 可得在  $q \leq \bar{q}$  情况下  $p = c$ , 即对基本生活用电部分, 政府监管供电公司按照边际成本定价。而超过居民基本用电量的生活用电还是采取 Ramsey 定价, 保证了社会福利分配的相对公平。这也是梯级电价理论基础。

### 3 仿真分析

选取某市典型负荷曲线利用 Matlab 进行仿真, 原始负荷数据见表 1。

表 1 负荷原始数据

时段	负荷 /MW	时段	负荷 /MW	时段	负荷 /MW
0	732.51	8	825.45	16	1 218.46
1	654.23	9	1 108.66	17	1 295.94
2	555.42	10	1 209.14	18	1 370.56
3	488.09	11	1 313.74	19	1 303.14
4	454.54	12	1 384.66	20	1 371.61
5	436.77	13	1 278.44	21	1 315.80
6	537.55	14	1 206.94	22	1 128.38
7	683.56	15	1 088.26	23	904.57

按照文献 [4] 中峰谷时段的划分办法, 将以上日负荷曲线分为 3 个时段: 高峰时段 10:00—23:00, 平段时段 23:00—01:00, 08:00—10:00, 低谷时段 01:00—08:00。为简化问题, 实施分时电价前电力市场中使用单一电价 0.56 元 /kW · h, 取  $\lambda=1$ , 即 Ramsey 指数  $R=0.5$ 。仿真结果见表 2。

表 2 分时电价实施前后仿真结果比较

指 标	峰	平	谷
实施前电价 / (元 / kW · h)	0.56	0.56	0.56
实施后电价 / (元 / kW · h)	0.77	0.58	0.09
基本量以下居民生活电价 / (元 / kW · h)	0.29	0.29	0.29
实施前社会福利 / 万元	84.95		
实施后社会福利 / 万元	103.39		
实施前供电公司利润 / 万元	557.21		
实施后供电公司利润 / 万元	593.42		

由表 2 可以看出, 激励性监管下的峰谷分时电价制定前后, 峰时段电价上涨的幅度小于谷时段电价下降的幅度, 符合 Ramsey 定价思路, 即高弹性市场价格变化对社会福利的影响大于低弹性市场价格变化对社会福利的影响, 因此为保证社会福利最大化, 尽量减小高弹性市场的价格涨幅。分时电价实施前后, 社会福利增加 18.44 万元, 达到了垄断次优情况下的社会福利最大化。同时, 实施前后供电公司的利润略有上升。实施分时电价前后负荷变化情况如图 2 所示。

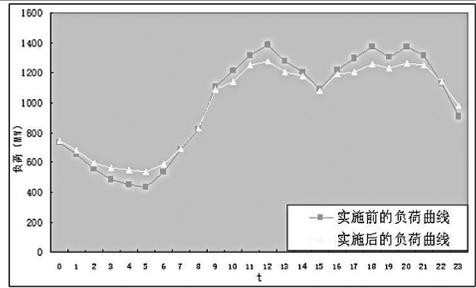


图 2 实施前后负荷仿真比较

从负荷曲线可以看出, 分时电价的实施, 有明显的削峰填谷作用。系统最大负荷从 1 384.66 MW 下降到 1 276.58 MW, 最小负荷从 436.77 MW 上升到 536.34 MW, 有效地降低了系统峰时段压力, 提高了电网运营效率。

### 4 结 论

从 Ramsey-Boiteux 定价的基本思路出发, 将不同时段的电力供给看作具有相互替代性的不同服务, 考虑电力负荷和分时电价的特殊性, 将峰时段可能造成的阻塞成本上涨或新增电网投资作为外部性因素, 引入超弹性概念修正各时段负荷需求价格弹性, 并增加带权重的 Ramsey 指数保障社会福利分配的相对公平, 为政府制定分时电价的监管水平提供了理论基础。政府可按该分时电价监管水平对供电公司制定的分时电价进行激励性监管。由仿真可知, 模型具有一定的现实操作性, 可推广至政府对网络垄断型企业激励性监管中的分时价格水平核定。

### 参考文献

[1] Kischen D S, Stbac G, Cum perayot P et al Factoring the Elasticity of Demand in Electricity Prices [J]. IEEE Transaction on Power Systems 2000, 15 (2): 612—617.

(下转第 13 页)

- [22] 皇甫成, 阮江军, 张宇, 等. 变压器直流偏磁的仿真研究及限制措施 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 117-120
- [23] 朱艺颖, 蒋卫平, 曾昭华, 等. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 1-7.
- [24] 赵杰, 曾嵘, 黎小林. HVDC 输电系统中直流对交流系统的影响及防范措施研究 [J]. 高压电器, 2005, 41(5): 324-329.
- [25] 尚春. HVDC 地中电流对交流变压器影响的抑制措施 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 52-54.
- [26] 王新丽. 系统中性点接地方式的选择 [J]. 电工技术. 2008(9): 70-71.
- [27] 朱天游. 500 kV 自耦变压器中性点经小电抗接地方式在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 1999, 23(4): 15-18
- [28] 陆国庆, 姜新宇, 江健武, 等. 110 kV 及 220 kV 系统变压器中性点经小电抗接地方式的研究及其应用 [J]. 电网技术, 2006, 30(1): 70-74.
- [29] 杜忠东, 董晓辉, 王建武, 等. 直流电位补偿法抑制变压器直流偏磁的研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(8): 69-72.
- [30] 赵杰, 黎小林, 吕金壮等. 抑制变压器直流偏磁的串接电阻措施 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 88-90.
- [31] 郑健超, 刘曲, 李立涅. 深层接地极对直流偏磁影响的研究 [J]. 陕西电力, 2007, 35(6): 1-6.
- [32] 陈凡, 曹林, 赵杰, 等. 云广与贵广 II 回直流输电系统共用接地极设计 [J]. 高电压技术, 2006, 32(16): 154-157.
- [33] 孙帮新, 陈辉祥. 高压直流输电共用接地极技术研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 150-153.
- [34] 朱成鼎. 三相五柱式铁心磁通的计算 [J]. 变压器, 1997, 34(1): 16-20.
- [35] O. Biro. On the Use of the Magnetic Vector Potential in Finite Element Analysis of 3D Eddy Currents [J]. IEEE Trans on Magnetics 1989, 25(4): 3145-3159.

作者简介:

蒋伟 (1979), 男, 博士, 主要从事高电压绝缘技术方面的研究。

吴广宁 (1969), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力设备在线监测及故障诊断、电力系统及自动化、高速机车牵引电机绝缘技术等方面的研究。

(收稿日期: 2011-03-14)

(上接第 8 页)

- [2] 吴军基, 丁宁, 邹云. 基于 DSM 的峰谷时段划分及分时电价研究 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 9-16.
- [3] 刘严, 谭忠富, 乞建勋. 峰谷分时电价设计的优化模型 [J]. 中国管理科学, 2005, 5(13): 87-92.
- [4] 谭忠富, 王绵斌, 等. 峰谷分时电价优化模型及其模糊求解方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2008, 9(9): 145-151.
- [5] 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, 8(35): 40-43.
- [6] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户价格响应和满意度的峰谷分时电价决策模型 [J]. 电力系统自动化, 2005, 20(29): 10-14.
- [7] Yuan Jia-hai. Customer Response Under Time-of-Use Electricity Pricing Policy Based on Multi-Agent System Simulation [C]. Power Systems Conference and Exposition. 2006, 814-818.
- [8] 胡福年, 汤玉东, 邹云. 考虑双边价格联动的峰谷分时电价机理研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 25(27): 61-66.
- [9] Emre Celebi and J. David Fuller. A Model for Efficient Consumer Pricing Schemes in Electricity Markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems 2007, 22(1): 60-67.
- [10] 谭忠富, 王绵斌, 等. 发电侧与供电侧峰谷分时电价联动的分级优化模型 [J]. 电力系统及自动化, 2007, 21(31): 26-34.
- [11] 谭忠富, 陈广娟, 等. 以节能调度为导向的发电侧与售电侧峰谷分时电价联合优化模型 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 1(29): 55-62.
- [12] 齐放, 张粒子, 等. 基于拉姆齐定价理论的销售电价研究 [J]. 电力需求侧管理, 2010, 2(12): 24-27.
- [13] Jean-Jacques Laffont, Jean Tirole. Competition In Telecommunication [M]. POSTS & TELECOM PRESS 2002.

作者简介:

李俊 (1981), 男, 博士研究生. 从事电力市场及电力系统稳定与控制研究。

刘俊勇 (1963), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力市场、智能电网、电力系统稳定与控制等方面的研究。

张力 (1982), 男, 博士研究生, 从事电力市场、电力系统稳定与控制研究。

(收稿日期: 2011-02-25)