

基于 Stackelberg 博弈的售电侧放开环境下 电能质量定价方法

董立志¹, 刘皓明¹, 周 辉², 殷文倩³, 侯云鹤³

(1. 河海大学 能源与电气学院, 南京 210098; 2. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007;
3. 香港大学 电气与电子工程系, 香港)

A power quality pricing method based on Stackelberg game in deregulated electricity retail market

DONG Lizhi¹, LIU Haoming¹, ZHOU Hui², YIN Wenqian³, HOU Yunhe³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China; 3. Department of Electrical and Electronic Engineering, the University of Hongkong, Hongkong, China)

摘要:售电侧放开后,用户拥有自主选择权,电能的商品属性凸显,电能质量决定电价,因此对于售电公司而言,如何根据电能质量合理确定销售电价,是亟待解决的问题。提出一种基于 Stackelberg 博弈的电能质量定价方法,考虑多个售电公司与多个用户进行博弈,引入消费者参考价格和“自我选择约束”概念建立用户选择模型,在此基础上分别建立用户收益和售电公司收益优化模型,通过 Stackelberg 博弈求解模型寻找最优电价。算例分析表明基于 Stackelberg 博弈的电能定价方法能够合理确定销售电价,满足用户电能质量和收益要求的同时保证了售电公司的盈利水平。

关键词:定价方法;电能质量;Stackelberg 博弈;售电侧放开;售电公司

Abstract: After the deregulating of the power retail market, the commodity attribute of electric energy is prominent. The price of electric energy is determined by the quality of electric energy, and the user has the right of free option. For power sale companies, how to reasonably determine the sale price according to the power quality becomes a burning question. A power quality pricing method based on Stackelberg game is proposed, which contains multi-sellers and multi-users. The concepts of internal reference price of consumers and “self-selection constraints” are introduced, and the selection model of users is established. On this basis, the user revenue optimal models and power sale company revenue optimal model are established. Stackelberg game is used to find the optimal price and solve the power quality pricing problem. The case study shows that the proposed power pricing method based on Stackelberg game can reasonably determine power sale price, satisfy the demand of power quality and revenue of users, and ensure the profit level of power suppliers.

Key words: pricing method; power quality; Stackelberg game; deregulated electricity retail market; electricity sale company

0 引言

在我国新一轮电力改革的背景下,售电侧的放开导致电能的商品属性凸显,电价作为电力市场的信号,成为电力改革的核心和关键点。售电侧放开后,同一供电区域内往往存在多个售电公司,销售电价与电能质量将是售电公司展开竞争的关键因素^[1]。因此,如何合理制定销售电价是售电侧放开后亟待解决的问题。

现有的销售电价的定价机制主要分为管制定价和市场定价2类。在我国管制电价中,销售电价的计价方式主要分为单一电价、两部制电价以及分时电价等^[2],例如,文献[3]考虑电力需求波动的成本、用户对电价的响应及用户满意度等因素,建立电网公司与用户博弈的分时电价模型,得到最优分时电价和最优用电量;文献[4]建立以峰谷电价比和拉开比作为决策变量的峰谷分时电价优化模型,最终得到峰谷分时电价策略。

售电侧放开后,电价管制的局面将被打破,用户对电能质量提出了差异化要求,电能质量和售电服务成为售电定价的重要因素。文献[5]评估了居民和工业用户的短期电力需求价格弹性,基于拉姆齐定价理论测算出不同用户的次优平均销售电价;

收稿日期:2019-11-13;修回日期:2020-01-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907050)

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.51907050)

文献[6]建立了关于零售商与电力用户、零售商与能源批发市场的两阶段双层博弈模型,提出了一种销售电价博弈定价方法;文献[7—8]将保险机制引入到电能定价研究中,设定最高不合格率和违约次数作为保费厘定依据,提出了一种电能质量保险费的电能定价方法;文献[9]在分析消费者行为的基础上,引入用户群决策矩阵和同化系数概念,提出了一种售电套餐的价格优化方法。

以上研究存在如下问题:① 计算得到的拉姆齐次优销售电价与我国现行销售电价相差甚远;② 分时电价的级差较小,普通电力用户对分时电价的敏感度较低;③ 由于风险的不确定性,很难确定投保等级;④ 消费者的购电行为受地区经济发展水平的影响较大,所提出的售电套餐价格优化方法的普适性有待验证。

为了在市场环境下合理确定销售电价,满足用户对电能质量的不同需求,基于Stackelberg博弈提出一种售电侧放开环境下的电能质量定价方法。首先,引入消费者参考价格概念,建立了用户对售电公司的选择模型,并以此为约束条件建立了售电公司收益优化模型;其次,假设高质量电能能够为用户带来高的用电效用^[9],并依据用户“自我选择约束”建立了用户收益优化模型;然后,通过Stackelberg博弈对售电公司和用户的收益优化模型求解,找到纳什均衡即最优电价;最终,通过算例分析验证所提方法对于提高用户用电效益、增加售电公司售电收益的效果。

1 售电公司与用户的收益模型

1.1 售电公司收益模型

售电公司的销售电价由2部分构成,即基本电价和优质电力服务价格。此电价结构较为常见,且能够较好地反映优质电力的服务性质^[10]。基本电价是提供基本电能质量等级的电能价格,优质电力服务价格是提供高质量电能的附加费用。假设某地区电力用户共有 I 个,售电公司共有 J 个,则售电公司 j 销售给用户 i 的销售电价为

$$p_{ij}(r) = p_j(r) + p_0 \quad (1)$$

式中: r 为用户选择的电能质量等级对应的指标值,可以是归一化后的一种或几种电能质量指标的综合值,如谐波含量、电压暂降频率等,数值越大表示电能质量越好; p_0 为基本电价,即电能质量国家标准体系中对电能质量指标的相关限值; $p_j(r)$ 为优质电力服务价格, $i = 1, 2, \dots, I$, $j = 1, 2, \dots, J$ 。

售电公司提供高质量等级的电能,需要一定的

设备投入,为防止设备投入后起作用的年限大于用户签订合同年限,以及防止用户的投机行为,供电合同的签订年限须设定足够长。售电公司 j 供电的单位成本与电能质量指标值的关系^[9]表示为

$$c_j(r) = \alpha_{ij} r^2 + \beta_{ij} r \quad (2)$$

式中: α_{ij} 和 β_{ij} 为售电公司 j 的电能质量供电成本系数; $c_j(r)$ 为售电公司 j 为用户提供优质电能的单位成本。

假设用户 i 每次只能选择一家售电公司 j 购电,则若要计算售电公司 j 的收益,需要确定用户选择售电公司的情况。用户 i 选择售电公司 j 的可能性 g_{ji} 由消费者内在参考价格(internal reference price, IRP)^[11]决策模型表示,IRP是衡量产品购买价格的标准,这里可用平均价格做模型简化^[9]。

将电能质量指标 r 平均分为 N 个区间,取电能质量等级区间的下限值作为本区间的指标值,由低到高分别是 $r_1, r_2, \dots, r_N$ 。这些等级的指标值均高于基本电能质量等级 r_0 。区间长度 d 和第 n 等级的下限值分别为

$$d = \frac{1 - r_0}{N} \quad (3)$$

$$r_n = r_0 + nd \quad (4)$$

用户对售电公司的选择很大程度上决定了售电公司的收益,而用户对售电公司的选择受经济因素和心理因素影响,假设用户对售电公司的选择是理性的,那么其对售电公司的选择 g_{ji} 可表示为

$$g_{ji} = \begin{cases} 1, & p_{avj} \leq (1 + \delta_i) p_{ri}, \alpha_{ji} = 0 \\ 0, & p_{avj} > (1 + \delta_i) p_{ri}, \alpha_{ji} = 0 \text{ 或 } 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$p_{avj} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N p_{ij}(r_n) \quad (6)$$

式中: g_{ji} 为0-1变量; α_{ji} 为用户 i 对售电公司 j 的偏好系数,反映用户根据售电公司的服务水平、品牌效应等因素形成的一种心理期望, $\alpha_{ji} = 1$ 表示有偏好, $\alpha_{ji} = 0$ 表示没有偏好; p_{ri} 表示用户 i 的IRP; p_{avj} 表示售电公司 j 的所有电能质量等级的平均价格; δ_i 表示用户 i 的消费者参考价格系数,可以采用文献[9]中提到的电力商品的同化系数表示,该同化系数反映用户可以接受的IRP最大偏移量,与经济发展水平有关。

实际上,满足式(5)的售电公司可能并不唯一,可能会出现同一用户可以同时选择多个售电公司的情况,对系数 g_{ji} 按照选择平均价格最低售电公司的原则做出修正,修正后的用户选择售电公司情况用 g'_{ji} 表示,满足

$$\sum_{j=1}^J g'_{ji} = 1 \quad (7)$$

则售电公司 j 的成本收益模型为

$$\max G_{cj} = \sum_{i=1}^I g'_{ji} [p_{sj}(r_n) - c_j(r_n)] Q_i \quad (8)$$

式中: G_{cj} 为售电公司 j 的收益; Q_i 为用户 i 的购电量。

1.2 用户收益模型

(1) 用户用电边际效用模型

优质电力对电力用户生产运行带来诸多益处。例如可以有效减少生产次品率以提高用户收益,可以减少设备故障频率以降低设备维护费用支出^[7]。用户用电边际效用 $U_i(r_n)$ 可用具有线性递减边际效用的二次函数^[12]表示

$$U_i(r_n) = -\alpha_{ui} r_n^2 + \beta_{ui} r_n, \quad r_0 \leq r_n \leq r_{\max} \leq \frac{\beta_{ui}}{2\alpha_{ui}} \quad (9)$$

式中: α_{ui} 、 β_{ui} 为用户用电效用系数,均为正数; $r_{\max}$ 为电能质量指标最大值。

(2) 用户选择电能质量等级约束

用户以期望收益最大化为目标来选择电能质量等级和相应售电公司。采用“自我选择约束”作为用户选择电能质量等级和售电公司的约束条件,包括“个人理性约束”和“激励相容约束”^[9]。个人理性约束为

$$U_i(r_n) - p_{sj}(r_n) \geq U_0 - p_0, \quad r_n \in \{r_1, r_2, \dots, r_N\} \quad (10)$$

式中: U_0 为用户保留效用,即基本电能质量对应的效用; p_0 为对应电价; r_0 为对应电能质量指标值。该约束表示购买高质量的电能能够增加用户收益。

激励相容约束为

$$U_i(r_x) - p_{sj}(r_x) \geq U_i(r_n) - p_{sj}(r_n), \quad r_n \in \{r_1, r_2, \dots, r_N\} \quad (11)$$

式中: r_x 为在 N 个电能质量等级中用户 i 的最优电能质量等级,用户在该等级下获得收益最大。

个人理性约束和激励相容约束可以转化为

$$\begin{cases} (-\alpha_{ui} r_n^2 + \beta_{ui} r_n) - p_{sj}(r_n) \geq (-\alpha_{ui} r_0^2 + \beta_{ui} r_0) - p_0 \\ (-\alpha_{ui} r_x^2 + \beta_{ui} r_x) - p_{sj}(r_x) \geq (-\alpha_{ui} r_n^2 + \beta_{ui} r_n) - p_{sj}(r_n) \\ r_n \in \{r_1, r_2, \dots, r_N\} \end{cases} \quad (12)$$

以总生产收益最大化为目标,用户 i 的收益优化模型可以表示为

$$\max G_{ui} = \sum_{j=1}^J g'_{ji} [U_i(r_n) - p_{sj}(r_n)] Q_i \quad (13)$$

式中: G_{ui} 为用户 i 的收益。

1.3 模型分析

由1.1节可知,优化售电公司目标函数,会对用户的收益造成影响。由1.2节可知,提高用户的收益,同样会影响到售电公司收益。因此,这是一个用户用电收益与售电公司售电收益之间的博弈问题。

在该博弈过程中,售电公司决定不同电能质量电价,是主导者,用户根据售电公司所定电价进行选择,是跟随者,二者之间的关于电价的博弈问题

可以采用Stackelberg博弈模型解决。

该博弈中有 J 个售电公司和 I 个用户同时参与,其过程可简略为:售电公司 j 给出多个电能质量等级供用户选择,不同质量等级电能具有不同的价格,因此售电公司 j 的策略为价格 $p_{sj}(r_n)$,策略集为 $\{p_{sj}(r_1), p_{sj}(r_2), \dots, p_{sj}(r_n)\}$,收益为 $[G_{c1}, G_{c2}, \dots, G_{cj}]$ 。电价越高售电公司获利越多,但选择该公司的用户越少。用户 i 首先根据对售电公司的偏好和IRP,选择某一个售电公司 j ,再考虑收益最大化选择电能质量等级。因此,用户的策略为对售电公司和电能质量等级的选择 $\{g'_{ji}, r_n\}$,用户收益为 $[G_{u1}, G_{u2}, \dots, G_{ui}]$ 。然后各个售电公司根据用户选择情况和自身收益情况调整电价,以求增加收益,直到达到博弈均衡。

1.4 均衡解的存在性分析

常用的证明纳什均衡解存在的一个充分条件是证明博弈参与者的利润函数在其策略空间内存在拟凹性^[13]。

售电公司的收益函数 G_{cj} 中, g'_{ji} 是0~1变量, Q_i 是给定常数,用户购电成本 $-c(r)$ 是严格的一元二次函数,开口向下,决策变量 $p_{sj}(r)$ 与电能质量水平 r 成正相关,故根据文献[14]在定义域 $D: r_0 \leq r_i \leq r_{\max}$ 上,函数 $-c(r)$ 是递减的,且是凸函数,对 $\forall r_1, r_2 \in D$ 、 $\forall a \in (0, 1)$,有

$$G_{cj}[ar_1 + (1-a)r_2] \geq \min\{G_{cj}(r_1), G_{cj}(r_2)\} \quad (14)$$

所以,根据函数拟凹性的定义^[15]推得售电公司的收益函数 G_{cj} 是关于 r 的拟凹函数,由于电价策略 $p_{sj}(r)$ 与 r 正相关,所以 G_{cj} 是关于 $p_{sj}(r)$ 的拟凹函数。观察用户收益函数 G_{ui} ,其效用函数 $U_i(r)$ 在定义域 D 上是凸的增函数,同理可证,用户收益函数 G_{ui} 是关于电价策略 $p_{sj}(r)$ 的拟凹函数。

由于上述主从参与者的目标函数均为拟凹函数,根据文献[16]知,对于售电公司的最优售电价格策略,用户具有最优的购电策略。因此,该博弈问题存在纳什均衡解。

2 模型求解

建立的Stackelberg模型可以表示成双层规划问题^[14]。对于任一售电公司的博弈,等价于求解下列非线性规划问题

$$\begin{cases} \max G_{cj} \\ s.t. (3) \cdots (7) \end{cases} \quad (15)$$

式中:优化决策变量为售电公司销售电价 $p_{sj}(r)$ 。

对于任一用户的博弈,等价于求解下列非线性规划问题

$$\begin{cases} \max G_{ui} \\ s.t. (7), (10), (11) \end{cases} \quad (16)$$

式中:优化决策变量为用户选择的电能质量等级 r_n 。

该模型采用分布优化算法求解,保证博弈参与者独立决策。模型求解步骤如图1所示。

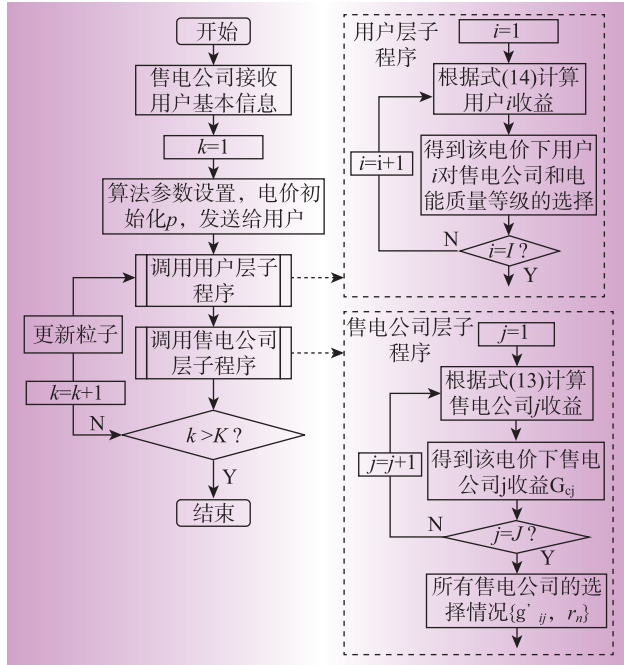


图1 模型求解步骤

Fig.1 Solving steps of model

主程序采用粒子群算法,每个粒子维度为 $1 \times NJ$,表示 J 个售电公司的在 N 种电能质量等级下的电价组合策略,粒子位置中每 N 个值作为1个元胞数组,每个元胞数组带入目标函数计算得到1个适应度值,即售电公司收益 G_{ej} 。

(1) 初始化参数

售电公司参数初始化,即给定电能质量等级及对应的电价初值,并限定不同电能质量等级电价的变化范围。设定电能质量基本水平为 r_0 ,售电公司成本系数为 α_{ej} 、 β_{ej} 。

用户参数初始化,即选取用户对售电公司的偏好系数 $\{\alpha_{ji}\}$,设定用户年用电量 $\{Q_{ij}\}$ 、用户效用参数 α_{ui} 和 β_{ui} 、用户IRP和该地区用户电力商品同化系数 δ_i 。

(2) 用户决策

用户根据售电公司的电价给出对售电公司和电能质量等级的选择,即用户根据式(5)选择售电公司,根据式(10)、式(11)选择电能质量等级。

(3) 售电公司收益计算

将电价、用户对售电公司的选择 $\{g'_{ji}\}$ 、用户用电量 $\{Q_{ij}\}$ 及用户对电能质量等级的选择 $\{r_n\}$ 带入到式(8),计算 J 个售电公司收益。根据粒子的元胞数组得到 J 个适应度值,以此更新个体历史最优。与当

前全局最优解比较适应度值,更新全局最优粒子。

(4) 寻找均衡点

判断迭代次数是否满足要求。如未满足,按照设定的惯性因子和加速常数更新粒子速度,再根据更新后的速度更新粒子。返回步骤(2)。直至找到用户与售电公司之间的均衡点。

3 算例分析

设定某区域有10个电力用户 $\{1, 2, \dots, i, \dots, 10\}$ 和3个售电公司A、B、C,用户可自行选择某一个售电公司购电。设定每个售电公司都可提供如表1所示的不同等级电能,分别表示低(L)、中(M)、高(H)3个电能质量等级, $N=3$,取值如表1所示。

表1 电能质量等级与指标值

Table 1 Power quality grades and its index value

等级	指标值
L	0.85
M	0.90
H	0.95

设定用户对售电公司A、B、C的偏好系数 α_{ji} 为

$$\alpha_{ji} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中: α_{ji} 为用户 i 对售电公司 j 的肯定偏好。

设定电能质量指标值 $r_{\max}=1$, $r_0=0.8$, $p_0=0.5$ 元/kWh。暂不考虑售电公司购电成本差异,供电成本系数均设置为 $a_c=0.2$, $b_c=0.3$ 。

我国2015年总体居民用户对电力价格的同化系数平均值为0.27649^[10]。这里假设用户 i 电力价格的同化系数 $\delta_i, i \in \{1, 2, \dots, 10\}$ 为0.27。设定用户的IRP、用户用电效用函数中参数设置满足式(9)不等式^[11],如表2所示。每个用户年计划购电量均设为1000 kWh。根据以上数据和所建数学模型,采用粒子群算法进行模型求解,在MATLAB环境下进行计算。

表2 用户用电效用参数和参考价格

Table 2 Electricity utility of users and IRP

用户	a_u	b_u	$p_m / (\text{元} \cdot \text{kWh}^{-1})$
1	20	40	1.00
2	22	44	1.05
3	24	48	1.10
4	26	52	1.15
5	28	56	1.20
6	30	60	1.25
7	32	64	1.30
8	34	68	1.35
9	36	72	1.40
10	38	76	1.45

3.1 博弈结果

由计算结果可见,在第10次博弈后售电公司和用户达到均衡,售电公司收益不再变化,如图2所示。得到各个售电公司的各个电能质量等级下的电价如表3所示。

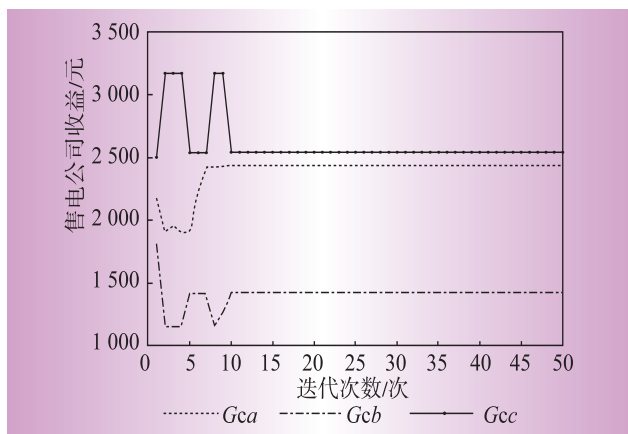


图2 寻优结果

Fig. 2 Iterative result

表3 博弈定价结果

Table 3 Pricing results of game theory pricing

售电公司	电能等级	$p_{sj}(r)$ /元	$r_j(r)$ /(元·kWh ⁻¹)	选择该等级的用户
A	L	0.800 0	0.399 5	
	M	1.100 0	0.432 0	
	H	1.280 0	0.465 5	3、8、9
B	L	0.546 4	0.399 5	1
	M	0.986 6	0.432 0	
	H	1.103 4	0.465 5	5、6
C	L	0.709 5	0.399 5	
	M	0.979 9	0.432 0	
	H	1.100 0	0.465 5	2、4、7、10

表3给出了博弈定价的结果,在该电价下售电公司获得的收益最大。其中,用户选择情况表示用户选择售电公司和相应电能质量等级的情况。比如用户1选择了售电公司B的L等级,说明用户1偏好售电公司B,而且选择等级L可以获得最大收益。

3.2 经济性分析

(1) 用户成本和收益分析

用户的用电成本与收益情况如表4所示,给出了用户在采用基本电价与采用主从博弈电价下的用电效用和收益情况比较。比对之后容易发现,与采用基本电价相比,用户收益有所提高。虽然选择更高等级电能质量时对应电价显著提高,但是用户的用电效用也得以提高从而使得用户受益。因此,该定价方式对用户具有吸引力。

表4 用户成本与收益

Table 4 Cost and benefit of users

用户	$U_i I$ /(元·kWh ⁻¹)		G_u /元	
	采用基本电价	采用博弈电价	采用基本电价	采用博弈电价
1	19.20	19.55	17 800	19 000
2	21.12	21.95	20 000	20 800
3	23.04	23.94	21 900	22 700
4	24.96	25.94	23 900	24 800
5	28.88	27.93	25 800	26 800
6	28.80	29.93	27 700	28 800
7	30.72	31.92	29 600	30 800
8	32.64	33.92	31 500	32 600
9	34.56	35.91	33 500	34 600
10	36.48	37.91	35 400	36 800

(2) 售电公司盈利分析

售电公司的成本如表3所示。售电公司采用主从博弈定价后获得的收益如表5所示。从表5可见,提供多等级电能质量电价后,售电公司销售相同电量的盈利与之前相比有了显著提高。

表5 售电公司盈利情况

Table 5 Benefit of power sale companies

售电公司	合作用户	售电量/MWh	G_c /元	
			采用基本电价	采用博弈电价
A	3、8、9	3	396	2 443.5
B	1、5、6	3	396	1 422.7
C	2、4、7、10	4	528	2 538.0

3.3 影响因素分析

影响定价结果的因素有很多,如售电公司的成本系数、用户用电边际效用系数、消费者参考价格、电力商品同化系数等。

当改变用户偏好系数 α_{ji} 时,售电公司的收益及电价博弈结果不同。

将式(17)矩阵的行从上往下分别置0,分别表示用户对售电公司A、B、C偏好系数为0的3种情况,得到如表6所示的售电公司收益,分别对应表6中情况1、情况2和情况3。

表6 不同用户偏好下的售电公司收益

Table 6 Benefits of power sale companies with different user preferences

情况	G_c /元		
	A	B	C
1	790	1 900	3 810
2	1 900	370	3 810
3	3 410	2 920	700

由表6可以看出,用户对售电公司的偏好系数较大影响着售电公司的收益情况。用户的偏好情况影响到用户对售电公司的选择,从而影响售电公

司收益。因此,对售电公司来说,应致力于打造良好的品牌效应和尽可能降低成本,增加对用户的吸引力,从而获取更多合作用户,增加收益。

4 结束语

本文在售电侧放开的背景下,从博弈论的角度出发,对电能的定价方法做了探讨。基于Stackelberg博弈的定价方法得到了使得用户和售电公司收益最大的电能质量等级价格,在该电价水平下,售电公司和用户任何一方都不会因为改变自身策略而得到更多的收益。同时,该方法满足了用户对电能质量的多样化要求,激励售电公司在电力市场竞争中通过推出符合用户用电意愿的多等级电能质量来扩大售电公司利润,也使得售电公司和用户更加重视电能质量,有利于整个电网电能质量水平的提升。

参考文献:

- [1] 刘秋华,何晓敏,冯奕,等.售电侧放开模式下售电商定价方法研究——基于贝叶斯博弈模型分析与应用[J].价格理论与实践,2018(7):147-150.
LIU Qiuhua, HE Xiaomin, FENG Yi, et al. Research on pricing model of sellers based on Bayesian game [J]. Price: Theory & Practice, 2018(7):147-150.
- [2] 翟亚飞,刘继春,刘俊勇.多种电价形式和负荷类型下售电公司的定价策略[J].供用电,2018,35(8):73-78,83.
ZHAI Yafei, LIU Jichun, LIU Junyong. Pricing strategy of power-retailing company under various price forms and load types [J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(8): 73-78, 83.
- [3] 董军,张晓虎,李春雪,等.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[J].电力自动化设备,2016,36(7):67-73.
DONG Jun, ZHANG Xiaohu, LI Chunxue, et al. Optimal TOU pricing strategy considering user satisfaction in automated demand response background [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(7):67-73.
- [4] 孔强,付强,林亭君,等.基于成本效益分析的峰谷分时电价优化模型[J].电力系统保护与控制,2018,46(15):60-67.
KONG Qiang, FU Qiang, LIN Tingjun, et al. Optimal peak-valley time-of-use power price model based on cost-benefit analysis [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15):60-67.
- [5] 齐放,张粒子,魏琰,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,2010,12(2):24-27,52.
QI Fang, ZHANG Lizi, WEI Yan, et al. Study on electricity tariffs based on Ramsey pricing theory [J]. Power Demand Side Management, 2010, 12(2):24-27, 52.
- [6] WEI W, LIU F, MEI S W. Energy pricing and dispatch for smart grid retailers under demand response and market price uncertainty [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3):1 364-1 374.
- [7] 金光厚,李庚银,周明.基于质量保险的多质量等级电能定价方法[J].中国电机工程学报,2006(9):113-119.
JIN Guanghou, LI Gengyin, ZHOU Ming. Quality insurance based electric energy pricing with multi-quality grades [J]. Proceedings of the CSEE, 2006(9):113-119.
- [8] LI G Y, JIN G H, ZHOU M. Quality insurance based electric energy pricing with multi-quality [C]. CIRED 2005-18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2005:1-5.
- [9] 曹昉,李欣宁,刘思佳,等.基于消费者参考价格决策及用户粘性的售电套餐优化[J].电力系统自动化,2018,42(14):67-74.
CAO Fang, LI Xinning, LIU Sijia, et al. Optimization of sales package for end-users based on user stickiness and reference pricing decision of consumers [J]. Automation of Electric Power System, 2018, 42(14):67-74.
- [10] 杨进,李庚银,周明.基于差别定价的电能质量服务定价方法[J].电力系统自动化,2006,30(8):41-46.
YANG Jin, LI Gengyin, ZHOU Ming. Power quality service pricing method based on differential pricing [J]. Automation of Electric Power System, 2006, 30(8):41-46.
- [11] MAZUMDAR T, RAJ S P, SINHA I. Reference price research: review and propositions [J]. Journal of Marketing, 2005, 69(4):84-102.
- [12] 张运贵,李晖照,王雪,等.基于双层博弈的实时电价定价策略研究[J].电工技术,2018(4):36-39.
ZHANG Yungui, LI Huizhao, WANG Xue, et al. Study on pricing strategy of real time electricity prices based on double game [J]. Electric Engineering, 2018(4):36-39.
- [13] 吴诚,高丙团,汤奕,等.基于主从博弈的发电商与大用户双边合同交易模型[J].电力系统自动化,2016,40(22):56-62.
WU Cheng, GAO Bingtuan, TANG Yi, et al. Master-slave game based bilateral contract transaction model for generation companies and large consumers [J]. Automation of Electric Power System, 2016, 40(22):56-62.
- [14] 夏炜,吕林,刘沛青.直购电交易中等效电能双边定价博弈研究[J].现代电力,2015,32(3):71-75.
XIA Wei, LV Lin, LIU Peiqing. Economic game theory research on bilateral electricity pricing in direct power purchase [J]. Modern Electric Power, 2015, 32(3):71-75.
- [15] 杜祖缙,张运杰.函数拟凹性的研究[J].大连海事大学学报,1996(1):97-100.
DU Zudi, ZHANG Yunjie. On properties of quasiconcave functions [J]. Journal of Dalian Maritime University, 1996(1):97-100.
- [16] 林骏骏,吴俊勇,刘迪,等.基于双层Stackelberg博弈的微能源网能量管理优化[J].电网技术,2019,43(3):973-983.
LIN Kaijun, WU Junyong, LIU Di, et al. Energy management optimization of micro energy grid based on hierarchical Stackelberg game theory [J]. Power System Technology, 2019, 43(3):973-983.

作者简介:

董立志(1994),男,山东潍坊人,硕士,主要从事电力市场、电能质量定价等方面工作;

刘皓明(1977),男,江苏盐城人,教授,博士,研究方向为智能电网、电力系统优化运行和电力市场。

(责任编辑 水 鹤)