

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201442

# 基于用户需求行为的综合能源服务产品定价策略研究

张颖梓<sup>1</sup>, 李华强<sup>1</sup>, 李旭翔<sup>2</sup>, 汪伟<sup>3</sup>, 徐浩<sup>3</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司天府新区供电公司, 四川 成都 610000;  
3. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610094)

**摘要:** 目前, 国内综合能源服务业的迅速发展与其商业化策略研究的匮乏形成鲜明对比, 两者发展的不平衡使得我国综合能源服务的发展呈现出市场潜力难以释放、市场主体规模化发展需求难以满足的困境。而定价策略作为产品商业化运营的关键技术, 是深入进行商业策略研究的必要前提和重要基础。以用户需求行为与能源服务商的产品定价策略间的相互影响关系作为切入点展开研究。首先, 基于用户的综合能源服务产品需求量的概念, 分析了用户的产品需求区间并构建了用户需求行为量化模型。其次, 提出了考虑用户选择需求行为的综合能源服务产品基础定价模型, 在满足用户行为选择偏好的同时使服务商获得最大期望净收益。在此基础上, 构建了服务商的产品竞争风险指标, 并以风险最小作为定价目标对基础定价策略进行了修正和优化。算例分析表明, 所提综合能源服务产品定价策略具有可行性和合理性, 可为综合能源服务的市场推广提供价格制定策略方面的理论支撑。

**关键词:** 综合能源服务; 用户需求行为; 市场竞争风险; 定价策略; 离散选择模型

## Pricing strategy of integrated energy service products based on user demand behavior

ZHANG Yingzi<sup>1</sup>, LI Huaqiang<sup>1</sup>, LI Xuxiang<sup>2</sup>, WANG Wei<sup>3</sup>, XU Hao<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Tianfu Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610000, China; 3. State Grid Sichuan Economic and Technological Research Institute, Chengdu 610094, China)

**Abstract:** The rapid development of the domestic integrated energy service industry is in sharp contrast to the lack of commercialization strategy research. This unbalanced development makes it difficult to release the market potential of the integrated energy service and meet the large-scale development needs of market entities. Pricing strategy, as the key method of product commercialization operation, is an important prerequisite and necessary foundation for in-depth commercialization strategy research. This paper explores the relationship between user demand behavior and the energy service provider's product pricing strategy. First, it analyzes the user's product demand range and a quantitative model of the user demand behavior is constructed based on the user demand for comprehensive energy service products. Secondly, the basic pricing model for comprehensive energy service products that considers the user selection and demand behavior is proposed to satisfy the user behavior selection preference while enabling service providers to obtain the largest expected net income. Then, a product competition risk index of the service provider is constructed, and the basic pricing strategy is revised and optimized with minimum risk as the pricing objective. The example results show that the proposed pricing strategy for integrated energy service products is feasible and effective and can provide theoretical support for price-setting strategies for the marketing of integrated energy services.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52199619000J).

**Key words:** integrated energy service; user demand behavior; market competing risk; pricing strategy; discrete choice model

## 0 引言

新一轮全球能源革命浪潮和能源互联网建设目

标的推进, 带来了能源结构调整和能源技术变革的新要求<sup>[1-3]</sup>。在此背景下, 传统单一能源服务已无法满足能源市场和用户综合用能的需求, 综合能源服务因其具有多能源互补互联、可有效提高能源综合利用效率、商业模式创新化等特征应运而生, 成为

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52199619000J)

响应推进能源革命进程的重要能源服务手段,可有效解决能源转型过程中的诸多问题,对构建新型能源体系具有重要支撑意义<sup>[4-7]</sup>。

目前,国外部分发达国家的综合能源服务发展较为成熟、能源市场建设较完善,如 OPower 等大型综合能源服务商,以能源服务技术革新和综合能源系统升级为支撑,致力为用户提供经济、高效的服务方案<sup>[8-10]</sup>。而国内综合能源服务则起步较晚,随着 2017 年国网公司的战略转型<sup>[11]</sup>,才正式进入大众视野。国内学者围绕综合能源系统物理构架<sup>[12-13]</sup>、能源互联网商业模式与市场机制<sup>[14-16]</sup>、能源服务经济评估与交易方法<sup>[17]</sup>等方面已展开了诸多研究。然而,在能源服务产品的价格策略制定方面的研究仍十分匮乏,这极大程度阻碍了服务产品的潜力释放和规模化发展。

综合能源服务产品的定价机理不同于传统电力市场侧提出的诸如市场出清价格预测法<sup>[18-19]</sup>、博弈论的应用<sup>[20-21]</sup>、成本分析法<sup>[22]</sup>等方法,综合能源服务除具有一般商品特性之外,还因其用户群体的用能需求差异性,使得综合能源服务产品设计呈现出内容多样化和形式各异等特点,这就要求综合能源服务产品的市场化需要紧密贴合“用户个性化需求”这一核心,也就要求能源服务商制定具有用户差异化的价格策略。

基于此,本文从消费者行为分析理念出发,研究用户需求行为不确定性与综合能源服务产品价格的关系。首先,对综合能源服务产品需求量概念和用户产品需求区间进行分析,构建了考虑用户选择意愿的需求行为量化模型。其次,将用户需求选择意愿影响引入定价环节,以服务商期望净收益最大为目标,提出一种考虑用户选择需求行为的综合能源服务产品基础定价模型。在此基础上,进一步考虑市场竞争对价格的影响,构建了服务商的产品竞争风险指标,并以风险最小为目标对基础定价策略进行修正和优化,建立了基于产品市场竞争力的服务商风险约束定价优化模型。最后,以某制造企业为例进行了实证分析,算例表明,本文所提出的定价策略可在最大程度上为能源服务商带来期望净收益的同时,有效满足用户的综合用能需求和感知增值价值。此外,考虑竞争风险因素的优化定价策略相较于基础定价,其价格水平更符合实际市场需求,大幅度提高了服务商所定价格产品在能源市场的竞争能力,在保障能源服务商的期望收益前提下显著提高了用户的感知增值价值。

## 1 综合能源服务产品的用户需求分析

### 1.1 综合能源服务产品需求概述

目前学术界对综合能源服务尚无统一定义,综合能源服务需求也因其产品的能源综合性和差异化,不同于传统电力市场中以时间尺度为背景分能源类型进行的用户需求量化分析<sup>[23]</sup>。不同综合能源服务对需求量的表现形式有所差别,为了更好地贴合各能源服务产品的内涵与物理特征,本文借鉴经济学中的商品需求概念<sup>[24]</sup>,将综合能源服务产品需求量分两类进行定义与解释:

**服务产品类。**为用户提供基础能源供给的同时可满足其增值服务需求。对于此类产品,能源服务商主要通过供应终端能源设备进而为用户提供实质性能源服务,因此将用户  $i$  对此类综合能源服务产品  $j$  的需求量  $Q_i^j$  定义为:能源服务商向用户提供服务产品所包含的终端能源供给设备的设备容量,单位 kW。若产品  $i$  的终端供给设备不唯一,则将  $Q_i^j$  视为主发电设备的装机容量  $Q_{i,(N_i)}^j$ ;其他设备容量可用其与主装机设备容量的比值来表示。此类服务产品主要可包括分布式屋顶光伏服务(Photovoltaic, PV)、“冷-热-电”三联供服务(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)等。

**服务管理类。**能源服务商主要通过技术管理手段向既有设备用户提供如节约用能成本、清洁低碳、能效管理提升等功能为主的能效增值服务。此类产品的实质是某种具有增值效用的管理服务技术,故用户对此类综合能源服务产品的需求只存在是否购买以及愿意支付的服务费用总额。因此将此类产品的用户需求量  $Q_i^j$  解释为用户选择购买服务管理类综合能源服务的服务费用,单位万元。此类综合能源服务产品主要可包括节能改造服务、电能质量提升服务、设备运维服务等。

综上,服务产品类和服务管理这两类综合能源服务产品的区别主要体现在服务内容和需求量的表现形式上,但两者定价策略的机理具有一致性。因此,为简化行文内容,本文后续主要针对建设—承包—经营(Building Owning Operation, BOO)模式<sup>[9]</sup>下的服务产品类综合能源服务展开进行说明。

### 1.2 综合能源服务产品的用户需求区间

需求区间表示当用户对综合能源服务产品的消费目标存在不同情况时,所有可能存在的需求量选择行为的集合。以两类极端消费目标为依据,分析用户对综合能源服务产品的需求上下限情况<sup>[25]</sup>。

**综合能源服务产品的用户需求上限:**考虑用户为购买意愿强的风险偏好型用户,在满足自身不亏

损的前提下, 用户将尽可能多地购买综合能源服务产品  $j$  作为消费目标。此时, 有用户需求量上限模型为

$$\begin{aligned} \max \quad & Q_i^j \\ \text{s.t.} \quad & \Pi_j(p_i, Q_i^j) \geq 0 \\ & C_j(p_i, Q_i^j) \leq \bar{C}_j \\ & Q_i^j \leq Q_{j, \text{limit}} \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $C_j(p_i, Q_i^j)$  为用户购买综合能源服务产品  $j$  所需的总成本;  $\bar{C}_j$  为用户成本预算上限, 万元;  $Q_{j, \text{limit}}$  为用户受环境、政策等外部因素影响产生的最大需求量约束值, kW;  $\Pi_j(p_i, Q_i^j)$  为用户购买需求量为  $Q_i^j$  的产品  $j$  的净收益, 万元。

其中, 用户购买服务产品类综合能源服务的总成本  $C_j(p_i, Q_i^j)$  和用户净收益  $\Pi_j(p_i, Q_i^j)$  的计算如式(2)所示。

$$\begin{cases} \Pi_j(p_i, Q_i^j) = V_j(p_i, Q_i^j) - C_j(p_i, Q_i^j) \\ C_j(p_i, Q_i^j) = p_i \cdot Q_i^j \cdot T \\ V_j(p_i, Q_i^j) = B_j(p_i, Q_i^j) + \xi_{i,\Sigma}^j \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $p_i$  为综合能源服务产品的单价, 万元/(kW 年);  $V_j(p_i, Q_i^j)$  为用户购买综合能源服务产品  $j$  所获得的服务能效收益, 万元;  $B_j(p_i, Q_i^j)$  表示综合能源服务产品  $j$  为用户带来的基础用能效用(本质为服务能够向用户提供的能源总量所对应的经济成本), 万元;  $\xi_{i,\Sigma}^j$  表示综合能源服务产品  $j$  的增值用能效用(即服务除了能提供的基本供能之外还能给用户带去的增值效益),  $\xi_{i,\Sigma}^j = \sum_A L_A^{i,j} \cdot h_A^j$  [25], 万元。

服务产品类综合能源服务的基础用能效用的计算如式(3)所示。

$$B_j(p_i, Q_i^j) = \int_{t=0}^{t=T} \sum_Y Q_{i,Y}^{j,e} \cdot p_{i,Y}^j(t) dt \quad (3)$$

式中:  $Y$  表示产品可提供的用能能源类别,  $Y=1,2,3,4$  分别代表电能、燃气、热能、冷能;  $p_{i,Y}^j(t)$  为  $t$  时刻用户  $i$  通过传统能源市场购买  $Y$  能源的单价, 万元/kWh(除电能外的其他能源价格均按能量单位 kWh 进行折算);  $Q_{i,Y}^{j,e}$  表示容量  $Q_i^j$  的产品可实时为用户提供的  $Y$  类能源量。

综合能源服务产品的用户需求下限: 考虑用户为购买意愿弱的风险规避型用户, 在满足自身基本使用需求的前提下, 用户将尽可能地少购买综合能

源服务产品  $j$ , 以最低成本实现预期净收益作为消费目标。此时, 有用户需求下限模型为

$$\begin{aligned} \arg \min_{Q_i^j} \quad & C_j(p_i, Q_i^j) \\ \text{s.t.} \quad & \Pi_j(p_i, Q_i^j) \geq E(\Pi_j) \\ & C_j(p_i, Q_i^j) \leq \bar{C}_j \\ & Q_i^j \leq Q_{j, \text{limit}} \end{aligned} \quad (4)$$

式中,  $E(\Pi_j)$  为用户对综合能源服务产品  $j$  使用的期望收益值, 通常存在大多数用户的预期净收益难以预测的情况, 因此在实际论证中根据对偶理论可将用户需求下限视为使用户净收益达到最大的量。

综上, 由式(1)、式(4)可得用户  $i$  购买综合能源服务产品  $j$  的需求上限值  $Q_{i, \text{down}}^{j, p_i}$  和需求下限值  $Q_{i, \text{up}}^{j, p_i}$ , 由此, 可得用户  $i$  的综合能源服务产品需求区间模型为

$$[Q_{i, \text{down}}^{j, p_i}, Q_{i, \text{up}}^{j, p_i}] \quad (5)$$

### 1.3 综合能源服务产品的用户个性化选择需求行为量化

用户需求区间只可模糊界定用户可能存在的产 品需求量范围, 而不足以精准刻画用户因用能心理、选择偏好等随机因素影响而产生的不同产品需求量购买行为。因此, 在需求区间基础上, 将用户选择偏好性以及其它不可观测因素带来的选择行为的随机不确定性影响偏差, 通过随机效用函数  $\varepsilon_j(p_i, Q_i^j)$  来表示[26]。此时, 用户对综合能源服务产品  $j$  的选择效用模型为

$$U_j(p_i, Q_i^j) = V_j(p_i, Q_i^j) + \varepsilon_j(p_i, Q_i^j) \quad (6)$$

由产品需求量  $Q_i^j$  的物理含义和实际情况, 在区间  $[Q_{i, \text{down}}^{j, p_i}, Q_{i, \text{up}}^{j, p_i}]$  内对需求量  $Q_i^j$  做离散化处理, 得到用户的可选择需求量集为

$$\begin{aligned} Q_i^j(p_i) = [ & Q_{i, \text{down}}^j, Q_{i, \text{down}}^j + \Delta Q, Q_{i, \text{down}}^j + 2\Delta Q, \dots, \\ & Q_{i, k}^j, \dots, Q_{i, \text{up}}^j - 2\Delta Q, Q_{i, \text{up}}^j - \Delta Q, Q_{i, \text{up}}^j ] \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $\Delta Q$  为离散步长, 可根据实际需求量级进行调整;  $k$  为集合中可供用户选择的数量。

由式(2)可知, 用户在选择不同综合能源服务产品需求量行为时, 购买成本也不同, 根据离散选择理论基础[27], 本文将用户选择行为的目标从效用最大化等价转换为用户净收益最大,  $\Pi_j'(p_i, Q_i^j) = U_j(p_i, Q_i^j) - C_j(p_i, Q_i^j)$ 。因此, 用户  $i$  对服务产品需求集中需求量为  $Q_{i,k}^j$  的选择意愿模型可表示为

$$P(Q_{i,k}^j) = P[\Pi_j'(Q_{i,k}^j) \geq \Pi_j'(Q_i^j), \forall Q_{i,k}^j \neq Q_i^j] \quad (8)$$

在综合能源服务用户的需求量选择中, 随机项  $\varepsilon_j(p_i, Q_i^j)$  的联合密度函数服从独立同 Gumbel 分布, 即选择行为服从 IIA(Independence of Irrelevant Alternatives)假设。故采用多项式 Logit 模型对式(8)做化简推导, 得到用户的选择需求行为意愿模型为

$$P(p_i, Q_{i,k}^j) = \frac{\exp[V_j(p_i, Q_{i,k}^j) - C_j(p_i, Q_{i,k}^j)]}{\sum_{Q_i^j \in Q} \exp[V_j(p_i, Q_i^j) - C_j(p_i, Q_i^j)]} \quad (9)$$

## 2 综合能源服务产品定价模型

### 2.1 综合能源服务产品的基础定价模型

能源服务商的成本-效益分析是制定价格模型的前提基础, 能源服务商的成本支出主要包括终端能源设备的购入、运维、驱动能源成本和相关人工费用, 可表示为

$$C_j^s(Q_{i,k}^j) = C_{j,op}^s(Q_{i,k}^j) + C_{j,e}^s(Q_{i,k}^j) + C_{j,eq}^s(Q_{i,k}^j) + C_{j,r}^s(Q_{i,k}^j) \quad (10)$$

式中:  $C_{j,op}^s(Q_{i,k}^j)$  为综合能源服务产品  $j$  终端能源设备的运维成本;  $C_{j,eq}^s(Q_{i,k}^j)$  为能源服务商所需的设备购买成本;  $C_{j,e}^s(Q_{i,k}^j)$  为综合能源服务产品  $j$  的驱动能源所需的经济成本;  $C_{j,r}^s(Q_{i,k}^j)$  为人工服务费等管理费用支出。单位均为万元。

能源供应商的收益  $I_j^s(p_i, Q_{i,k}^j)$  为收取的用户综合能源服务产品费用, 能源服务商的净收益可表示为

$$\Pi_j^s(p_i, Q_{i,k}^j) = I_j^s(p_i, Q_{i,k}^j) - C_j^s(Q_{i,k}^j) \quad (11)$$

由前文可知, 产品价格影响用户需求区间, 而用户在需求区间内选择需求量的不确定性构成了服务商收益的不确定。因此, 能源服务商作为价格决策方, 在定价中就需要考虑不同用户选择行为对自身收益的影响, 制定“一户一价格”的差别定价策略。

本文将综合能源服务产品的基础定价策略概述为: 基于用户需求行为量化模型, 将用户选择行为的影响以期望的形式引到能源服务商净收益的表达中, 并以服务商期望净收益值最大为目标, 在满足用户选择意愿的同时可让其获得较大用能增值。考虑用户选择行为的基础定价模式可表示为

$$\begin{aligned} & \arg \max_{p_i} E[\Pi_j^s(p_i, Q_{i,k}^j)] \\ & \text{s.t.} \quad Q_{i,k}^j \in Q_i^j(p_i) \end{aligned} \quad (12)$$

式中,  $E[\Pi_j^s(p_i, Q_{i,k}^j)]$  为服务商在价格  $p_i$  下的期望净收益值, 将用户不确定的选择行为通过期望的形式进行了量化, 可表示为

$$E[\Pi_j^s(p_i, Q_{i,k}^j)] = \sum_{Q_{i,k}^j \in Q(p_i)} P(p_i, Q_{i,k}^j) \cdot \Pi_j^s(p_i, Q_{i,k}^j) \quad (13)$$

综上, 由式(10)一式(13)计算可得到, 使能源服务商满足期望净收益最大的综合能源服务产品的基础定价结果  $p_i^b$ , 此时服务商期望净收益值为  $E[\Pi_j^s(p_i^b, Q_{i,k}^j(p_i^b))]$ 。

### 2.2 综合能源服务产品的优化定价模型

综合能源服务发展至今, 能源市场参与主体量急剧增加, 能源服务竞争压力逐渐增大<sup>[28]</sup>, 同类型能源服务产品相互竞争时, 若竞争力不足, 则有丢失用户市场、带来收益损失的风险。因此, 作为影响能源服务产品市场竞争力水平的主要因素, 能源服务商在制定价格策略时, 还需要考虑竞争风险对定价目标的反馈影响作用, 在基础定价模型上进行价格策略制定的修正和优化调整。

基于金融领域的风险理论<sup>[29]</sup>, 本文构建了能源服务商的市场竞争风险值指标  $f_{ser,j}^{(p_i)}$ , 模型如式(14)所示。

$$f_{ser,j}^{(p_i)} = \sum_{Q_{i,k}^j \in Q_i^j} t_{p_i} \cdot |E[\Pi_j^s(p_i, Q_{i,k}^j)] - \Pi_j^s(p_i, Q_{i,k}^j)|^+ \quad (14)$$

式中:  $|x|^+$  表示当  $x$  的值大于零时表达式结果为  $x$ , 否则表达式结果取 0;  $t_{p_i}$  为产品的市场竞争力。由概率选择规律中的多项式分对数规则, 将产品市场竞争力  $t_{p_i}$  表示为

$$t_{p_i} = \frac{\exp(\eta \cdot u_{p_i,1})}{\sum_{x \in \{0,1\}} \exp(\eta \cdot u_{p_i,x})} \quad (15)$$

式中:  $\eta$  为一比例参数,  $\eta$  越大该模型越接近确定性规则下的理想化购买行为;  $u_{p_i,x}$  表示用户“买( $x=1$ )”或“不买( $x=0$ )”两种情况的支付效用, 由用户自购市场其他同类产品中最具竞争优势的全寿命周期单位成本  $LCC_{other}$  与购买服务商所供综合能源服务产品的全寿命周期单位成本  $LCC_s$  的相对大小关系决定。

$$u_{p_i} = \begin{cases} \frac{LCC_{other} - LCC_s}{LCC_{other}}, & LCC_s < LCC_{other} \\ 0, & LCC_s > LCC_{other} \end{cases} \quad (16)$$

式中, 用户购买其他同类产品的全寿命周期成本  $LCC_{other} = \min\{LCC_{other}^1, LCC_{other}^2, \dots, LCC_{other}^N\}$ ,  $N$  为市场中其他同类型产品种类数,  $N=1,2,3,\dots$ 。

$LCC_{other}^N = C_{fixed}^N + \sum_{t=1}^{T_1} C_{var}^N \times (1+r)^{t-1}$ ,  $r$  为通货膨胀的

折现率<sup>[23]</sup>,  $T_1$ 为产品全寿命周期,  $C_{\text{fixed}}^N$ 为用户购买其他同类产品  $N$  的固定成本,  $C_{\text{var}}^N$ 为变动成本; 而用户购买能源服务商所供综合能源服务产品的全寿命周期单位成本  $LCC_s = \sum_{t=1}^{T_1} \frac{P_t}{(1+r)^{t-1}}$ 。

综上, 基于产品市场竞争力影响, 考虑服务商风险控制需求, 服务商风险约束优化定价策略可定义为: 以产品市场竞争力影响下服务商的市场竞争风险最小为目标, 同时满足期望净收益值不小于其最低期望值为约束条件。据此, 基于产品市场竞争力的服务商风险约束优化定价模型可用式(17)表示。

$$\begin{aligned} \arg \min_{p_i} \quad & f_{\text{ser},j}^{(p_i)} \\ \text{s.t.} \quad & E[\Pi_j^s(p_i, Q_{i,k}^j)] \geq R_s \\ & Q_{i,k}^j \in Q_i^j(p_i) \end{aligned} \quad (17)$$

式中,  $R_s$  表示能源服务商预期的最低净收益。联立式(14)一式(17), 可得考虑能源服务商风险约束的综合能源服务产品优化价格  $p_i^r$ , 此时服务商期望净收益值为  $E[\Pi_j^s(p_i^r, Q_{i,k}^{j,p_i^r})]$ 。

### 3 算例分析

本文以同一地区某制造企业  $M$  和某酒店  $H$  为研究对象, 以 PV 产品为例, 分析针对这 2 个用户的 PV 服务产品的价格制定情况, PV 服务产品的具体内容见表 1。

表 1 PV 服务产品服务内容

Table 1 PV service product service content

产品	PV 服务
功能属性	1) 基础电能供应 2) 以节约用能成本为主的增值效益 3) 享受“安装”-“运营”-“维护”一体化服务
产品技术设备	多晶硅光伏组件(峰值功率 270 Wp)
商业模式	BOO 模式为主, 合同期限 10 年, 付费服务

用户基本用能概况见附表 1。用户  $M$  的屋顶最大占地面积为 45 161 m<sup>2</sup>, 预算成本上限为 1 500 万元; 用户  $H$  的屋顶最大占地面积为 56 526 m<sup>2</sup>, 预算成本上限为 3 150 万元。结合所处地光照条件、单位容量服务产品设备占地面积和实际可利用面积, 计算得到用户  $M$  和用户  $H$  实际可装的 PV 服务设备最大总容量分别为 3 499 kW、4 100 kW。此外, 根据市场 270 Wp 多晶硅光伏组件历史价格, 综合其他费用, 能源服务商在 10 年合同期内平均每年生产运营 PV 产品的总单位容量成本可定为 0.03 万元/(kW 年)。

### 3.1 用户 $M$ 的 PV 服务产品需求分析

在用户两类极端消费目标下, 可得制造企业  $M$  在不同价格下的需求量区间如图 1 所示。当价格  $p_M > 0.1676$  万元/(kW 年), 如图 B 点右侧所示时, 用户的净收益值为负数, 故只有价格低于 0.1676 万元/(kW 年)时, 用户才存在理论意义上的选择需求意愿, 此时服务商才有进行市场交易的机会。同时, 由两个区间局部放大图可知, 不同价格下的 PV 服务产品需求量普遍存在 100~150 kW 的需求不确定误差范围, 这使得能源服务商的净收益值存在一定范围的波动。同理, 可得用户  $H$  的需求区间如附图 1 所示, 限于篇幅此处不再展开叙述。

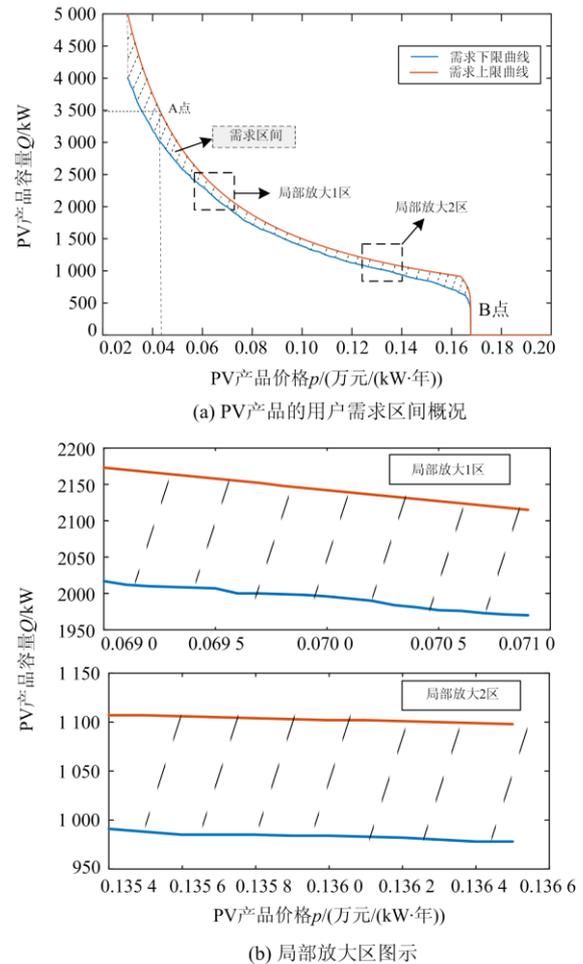


图 1 不同 PV 产品价格下的  $M$  用户需求区间

Fig. 1  $M$  user demand interval of PV products at different prices

### 3.2 PV 服务产品定价分析

采用 Matlab 为计算工具, 以遍历的求解思想, 从服务商不亏损的最低产品售卖价格  $p_{\text{min}} = 0.03$  万元/(kW 年)起, 计算基础定价目标下的 PV 产品价格和仅假定能源服务市场中只存在“用户自建”这类光伏产品的横向竞争时的优化价格。

光伏设备的全寿命周期为 20 年，根据近 5 年国内工商业屋顶光伏市场价格，用户自购单位成本可设为 0.45 万元/kW，此后每年的单位运行成本以第一年成本的 3% 计算，通货膨胀折现率  $r = 6\%$ 。计算得到，用户自建屋顶光伏发电系统的全寿命周期成本  $LCC_{other}$  为 0.947 万元/kW，而用户购买服务商所提供的 PV 产品的全寿命周期成本  $LCC_s$  随产品价格变化如图 2 所示。

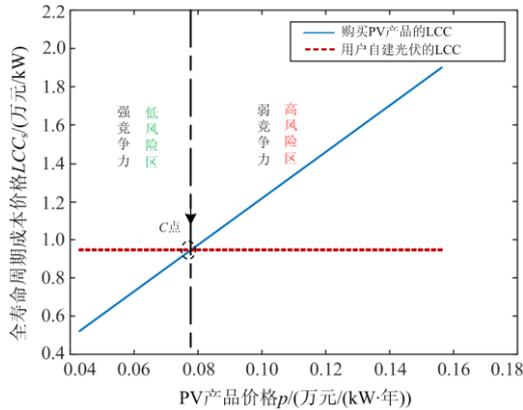


图 2 PV 产品的全寿命周期成本

Fig. 2 Life cycle cost of PV products

由图 2 可知，以价格为 0.0798 万元/(kW 年)的 C 点为界，可将价格影响下的产品市场竞争力水平划分为强竞争力与弱竞争力两部分。强竞争力表明能源服务商在此价格区间内承担的竞争风险小，具有较大 PV 产品商业推广潜力；弱竞争力则表明能源服务商在此价格区间内竞争力极弱，PV 产品几乎失去用户市场，故在优化定价中的 PV 价格不宜高于 0.0798 万元/(kW 年)。

计算得到的制造企业 M 与酒店 H 两个用户的基础定价和优化定价情况如表 2 所示，用户 M 在区间内不同 PV 产品容量的选择意愿及相应服务商净

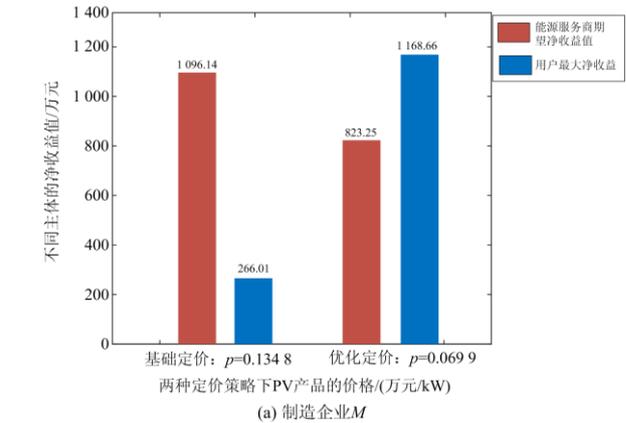
表 2 两种定价策略的计算结果

Table 2 Calculation results of two pricing strategies

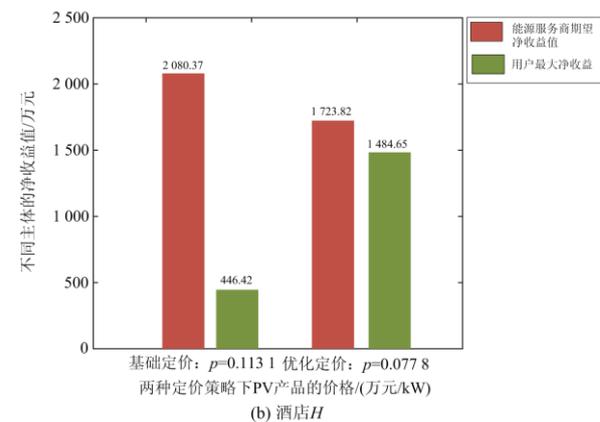
用户	定价策略	价格 (万元/(kW 年))	服务商期望净收益/万元	用户最大净收益/万元	市场竞争力 $t$	需求区间/kW
制造企业 M	基础定价策略	0.134 8	1 096.14	266.01	0	[998, 1112]
	优化定价策略	0.069 9	823.25	1 168.66	0.53	[1998, 2145]
酒店 H	基础定价策略	0.113 1	2 080.37	446.42	0	[2387, 2785]
	优化定价策略	0.077 8	1 723.82	1 484.65	0.50	[3477, 4048]

收益见附表 2、附表 3。由表 2 可知，该 PV 产品面对两个不同的用户时有不同的最优价格，制造企业的 PV 最优价格为 0.0699 万元/(kW 年)，而酒店的 PV 最优价格则为 0.0778 万元/(kW 年)，验证了本文所提“一户一价格”的差异化定价策略。此外，能源服务商在市场运营活动时，采用差异化定价可有效因地“用户”制宜，使价格能一方面满足用户各异性需求和感知价值，进而有效提高产品的市场占有率和用户粘性，另一方面还能使能源服务商的产品市场推广销售更具灵活性，可拓宽盈利范围、提高市场竞争力，保证自己的收益呈现稳中有升的发展。

根据图 3(a)，对用户 M 而言，相较于基础定价，采用优化定价策略，服务商期望净收益值降低了 272.89 万元，而用户最大净收益值增加了 902.65 万元；同时由图 3(b)可知，对用户 H 而言，采用优化定价策略时服务商的期望净收益值降低了 356.55 万元，而用户最大净收益值增加了 1 038.23 万元，显然用户净收益增长幅度远远高于服务商期望净收益降低幅度。故从全局角度出发，服务商采用优化定价策略，能有效约束因市场竞争给自身带来的收益风险，保持自身期望净收益值无大幅度降低的同时



(a) 制造企业 M



(b) 酒店 H

图 3 基础定价 vs 优化定价对比图

Fig. 3 Comparison chart of basic pricing vs. optimized pricing

使用户支付购买意愿显著增强; 同时, 相对于基础定价策略和“用户自建”类光伏竞争产品, 具有价格竞争优势, 有助于扩大 PV 产品的市场份额, 利于 PV 服务产品后续的规模化推广。

#### 4 结论

针对目前国内综合能源服务在商业化中面临的定价方法缺乏问题, 本文提出了基于用户需求选择行为的综合能源服务产品定价策略, 主要结论有:

1) 针对不同用户需求行为不确定性对定价产生的影响, 定价模型通过构造用户选择概率模型并作用到能源服务商的期望净收益表达中得到有效解决, 使得服务产品价格的制定不仅满足了供给侧期望效益, 还兼顾了用户侧选择意愿和用能收益, 实现差异化定价。

2) 定价模型的优化主要针对市场同类型产品竞争这一问题, 通过构造产品竞争风险指标对定价模型进行约束, 使服务商在规避市场风险的同时, 达到风险约束水平下的净收益最大化。

3) 算例表明, 在实际运用中, 采用优化定价模型可有效降低服务商产品定价风险, 在满足自身期望净收益的同时提高了产品市场竞争力和用户需求程度。

综上, 本文所提综合能源服务产品定价策略具有一定实用性和创新性, 可填补国内能源服务市场定价策略研究的空白, 为我国综合能源服务的规模化发展及市场化推广提供一定的价格理论参考。后续可在综合能源服务产品定价策略的继续优化、市场潜力评估和风险控制策略等市场运营技术方面做进一步的研究, 继续助力综合能源服务的市场化进程。

#### 附录

附表 1 用户 M 与 H 的基本概况表(2019 年)

Attached Table 1 Basic profile of users M and H

参数	制造企业 M	酒店 H
负荷类型	迎峰型	多峰型
电价类型(10 kV)	工商业用电	工商业用电
年用电量/万 kWh	469.35	1 552.91
平均负荷/kW	535.79	1 772.73
峰值负荷/kW	1 157.05	6 531.64
负荷率	0.46	0.27
年供冷用电量/万 kWh	38.02	89.38
平均供冷负荷/kW	43.40	102.03
峰值供冷负荷/kW	286.96	1 348.58
年供热用电量/万 kWh	28.71	77.77
平均供热负荷/kW	32.77	88.78
峰值供热负荷/kW	202.14	1 119.61
节能需求程度	0.6	0.3

附表 2 基础定价策略下服务商的净收益分布情况

Attached Table 2 Net income distribution of service

providers under basic pricing strategy

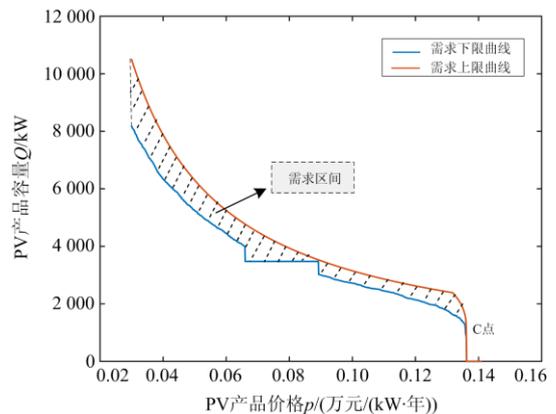
需求量/ kW	服务商净 收益/万元	选择 概率/%	需求量/ kW	服务商净 收益/万元	选择 概率/%
998	1 045.904	5.494	1 058	1 108.784	4.351
1 003	1 051.144	5.484	1 063	1 114.024	4.182
1 008	1 056.384	5.452	1 068	1 119.264	4.008
1 013	1 061.624	5.412	1 073	1 124.504	3.830
1 018	1 066.864	5.359	1 078	1 129.744	3.656
1 023	1 072.104	5.281	1 083	1 134.984	3.484
1 028	1 077.344	5.183	1 088	1 140.224	3.310
1 033	1 082.584	5.071	1 093	1 145.464	3.137
1 038	1 087.824	4.946	1 098	1 150.704	2.961
1 043	1 093.064	4.812	1 103	1 155.944	2.786
1 048	1 098.304	4.670	1 108	1 161.184	2.615
1 053	1 103.544	4.515			

附表 3 优化定价策略下服务商的净收益分布情况

Attached Table 3 Net income distribution of service

providers under optimized pricing strategy

需求量/ kW	服务商净 收益/万元	选择 概率/%	需求量/ kW	服务商净 收益/万元	选择 概率/%
1 998	797.202	3.930	2 073	827.127	3.477
2 003	799.197	3.925	2 078	829.122	3.423
2 008	801.192	3.917	2 083	831.117	3.368
2 013	803.187	3.904	2 088	833.112	3.311
2 018	805.182	3.887	2 093	835.107	3.254
2 023	807.177	3.867	2 098	837.102	3.195
2 028	809.172	3.841	2 103	839.097	3.135
2 033	811.167	3.811	2 108	841.092	3.072
2 038	813.162	3.779	2 113	843.087	3.007
2 043	815.157	3.744	2 118	845.082	2.942
2 048	817.152	3.705	2 123	847.077	2.877
2 053	819.147	3.665	2 128	849.072	2.811
2 058	821.142	3.624	2 133	851.067	2.743
2 063	823.137	3.579	2 138	853.062	2.677
2 068	825.132	3.530			



附图 1 不同 PV 产品价格下的 H 用户需求区间

Attached Fig.1 User demand interval of PV

products at different prices

## 参考文献

- [1] 舒印彪, 薛禹胜, 蔡斌, 等. 关于能源转型分析的评述(一)转型要素及研究范式[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9): 1-15.  
SHU Yinbiao, XUE Yusheng, CAI Bin, et al. A review of energy transition analysis part one elements and paradigms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(9): 1-15.
- [2] 孙宏斌, 郭庆来, 卫志农. 能源战略与能源互联网[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(6): 537-538.  
SUN Hongbin, GUO Qinglai, WEI Zhinong. Guest editorial: energy strategy and energy internet[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(6): 537-538.
- [3] 刘耀, 吴佳玮, 肖晋宇, 等. 有源型柔性直流输电技术在全球能源互联网背景下的应用研究[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(2): 107-116.  
LIU Yao, WU Jiawei, XIAO Jinyu, et al. Application of active MMC-HVDC in the background of global energy interconnection[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2020, 3(2): 107-116.
- [4] 吴奕, 朱旭, 陈丽娟, 等. 考虑多主体参与的综合能源型 IDN 协调优化调度[J]. 广东电力, 2019, 32(10): 20-27.  
WU Yi, ZHU Xu, CHEN Lijuan, et al. Coordinated optimization dispatching of incremental distribution network with integrated energy considering multi-agent participation[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(10): 20-27.
- [5] 陈泽雄, 高军伟, 林亚培, 等. 园区综合能源微网动态优化调度算法[J]. 广东电力, 2020, 33(10): 64-74.  
CHEN Zexiong, GAO Junwei, LIN Yapei, et al. Mixed integer linear programming algorithm for dynamic optimal scheduling of integrated energy campus microgrid[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(10): 64-74.
- [6] 曾红, 刘天琪, 何川, 等. 含电转气设备的气电互联综合能源系统多目标优化[J]. 电测与仪表, 2019, 56(8): 99-107.  
ZENG Hong, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Multi objective optimization for integrated natural gas and electricity energy system considering power to gas[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(8): 99-107.
- [7] 蒋诗百, 杨丽娜, 刘权, 等. 考虑柔性负荷的能源互联网型园区综合能源优化研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 83-88.  
JIANG Shibai, YANG Lina, LIU Quan, et al. Research on comprehensive energy optimization of energy interconnected parks considering flexible load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 83-88.
- [8] 买亚宗, 石书德, 张勇. 国外综合能源服务的发展实践与启示[N]. 国家电网报, 2019-01-08(005).  
MAI Yazong, SHI Shude, ZHANG Yong. Development practice and enlightenment of integrated energy services abroad[N]. State Grid News, 2019-01-08(005).
- [9] 封红丽. 国内外综合能源服务发展现状及商业模式研究[J]. 电器工业, 2017(6): 34-42.  
FENG Hongli. Current situation and business model of integrated energy services at home and abroad[J]. China Electrical Equipment Industry, 2017(6): 34-42.
- [10] 曾鸣, 刘道新, 李娜, 等. 综合能源系统的关键经济问题研究[J]. 华东电力, 2013, 41(7): 1403-1408.  
ZENG Ming, LIU Daoxin, LI Na, et al. Key economic issues in integrated energy system[J]. East China Electric Power, 2013, 41(7): 1403-1408.
- [11] 国家电网有限公司. 关于在各省公司开展综合能源服务业务的意见[Z]. 2017.  
State Grid Corporation of China. Opinions on developing integrated energy services in provincial companies[Z]. 2017.
- [12] 李秋燕, 王利利, 张艺涵, 等. 能源互联网多能流的耦合模型及动态优化方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 179-186.  
LI Qiuyan, WANG Lili, ZHANG Yihan, et al. A review of coupling models and dynamic optimization methods for energy internet multi-energy flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 179-186.
- [13] 杨海柱, 李梦龙, 江昭阳, 等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 30-37.  
YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas loads response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 30-37.
- [14] 刘敦楠, 曾鸣, 黄仁乐, 等. 能源互联网的商业模式与市场机制(二)[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3057-3063.  
LIU Dunnan, ZENG Ming, HUANG Renle, et al. Business models and market mechanisms of E-Net(2)[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3057-3063.
- [15] KAILE Z, SHANLIN Y, ZHEN S. Energy internet: the business perspective[J]. Applied Energy, 2016, 178.
- [16] 谢光龙, 贾梦雨, 韩新阳, 等. 城市能源互联网的商业模式探讨[J]. 电力建设, 2018, 39(2): 10-17.  
XIE Guanglong, JIA Mengyu, HAN Xinyang, et al. Preliminary exploration on business model of urban

- energy internet[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(2): 10-17.
- [17] WEI F, JING Z, WU P, et al. A Stackelberg game approach for multiple energies trading in integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2017, 200.
- [18] CHRISTOPH G, DAVID W. Measuring competitiveness of the EPEX spot market for electricity[J]. Energy Policy, 2013, 62.
- [19] 朱国荣, 单钰淇, 劳咏昶, 等. 电力现货市场环境下的火电厂定价策略研究—基于短期竞价博弈模型的分析[J]. 价格理论与实践, 2020(6): 92-96, 180.  
ZHU Guorong, SHAN Yuqi, LAO Yongchang, et al. Research on the pricing strategy of thermal power plants in the electricity spot market environment—based on the perspective of short-term bidding game model of marginal cost[J]. Price: Theory & Practice, 2020(6): 92-96, 180.
- [20] 周建中, 李清清, 李超顺, 等. 基于博弈论的发电侧竞价市场均衡特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 82-87.  
ZHOU Jianzhong, LI Qingqing, LI Chaoshun, et al. Analysis on equilibrium characteristics of supply side bidding market based on game theory[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 82-87.
- [21] 方宇娟, 魏韡, 梅生伟, 等. 考虑节点边际价格的热电联产机组主从博弈竞价策略[J]. 控制理论与应用, 2018, 35(5): 682-687.  
FANG Yujuan, WEI Wei, MEI Shengwei, et al. Stackelberg game strategy for combined heat power unit considering locational marginal prices[J]. Control Theory & Applications, 2018, 35(5): 682-687.
- [22] 刘雨梦, 陈皓勇, 黄龙, 等. 基于多群体协同进化的电力市场均衡模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 38-45.  
LIU Yumeng, CHEN Haoyong, HUANG Long, et al. Equilibrium model of electricity market based on multi-swarm co-evolution[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 38-45.
- [23] 高鸿业. 西方经济学(微观部分)[M]. 7版. 北京: 中国人民大学出版社, 2018.
- [24] HUANG Wujing, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. From demand response to integrated demand response: review and prospect of research and application[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 148-150. DOI: 10.1186/s41601-019-0126-4.
- [25] 王静雯, 李华强, 李旭翔, 等. 综合能源服务效用模型及用户需求评估[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(2): 411-425.  
WANG Jingwen, LI Huaqiang, LI Xuxiang, et al. Utility model and demand assessment method of integrated energy service[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 411-425.
- [26] 颜慧. 基于离散选择模型的消费者消费偏好分析[D]. 成都: 成都理工大学, 2018.  
YAN Hui. Consumption preference analysis based on discrete choice model[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [27] 聂冲, 贾生华. 离散选择模型的基本原理及其发展演进评介[J]. 数量经济技术经济研究, 2005(11): 151-159.  
NIE Chong, JIA Shenghua. Research on the theoretical basis and evolution of discrete choice models[J]. The Journal of Quantitative & Technical Economics, 2005(11): 151-159.
- [28] 封红丽. 综合能源服务市场竞争主体最新进展及发展趋势与挑战[J]. 电器工业, 2019(12): 51-61.  
FENG Hongli. The latest progress, development trends and challenges of the main players in the integrated energy service market[J]. China Electrical Equipment Industry, 2019(12): 51-61.
- [29] 王明涛. 证券投资风险计量、预测与控制[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2003.
- 
- 收稿日期: 2020-11-22; 修回日期: 2021-01-25
- 作者简介:  
张颖梓(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场与技术经济; E-mail: 673272265@qq.com  
李华强(1965—), 男, 教授, 通信作者, 研究方向为电压稳定与控制、电能质量分析与评估、电力市场与技术经济等。E-mail: lihuaqiang@scu.edu.cn
- (编辑 葛艳娜)