

售电公司与用户之间灵活合同风险决策模型

樊豆, 张少华, 王 晔

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要: 在基于实时定价的电力零售市场中, 电价波动剧烈且具有较大不确定性, 用户需要采用合适的风险管理工具来规避或控制利益风险。首先, 提出一种售电公司与用户之间结合期权交易思想的灵活合同, 其中, 用户可根据自己购电意愿确定合同敲定价(即愿意支付的最高市场价格)。该灵活合同不仅能使用户回避零售市场价格不利波动的风险, 而且能保留市场价格有利波动时的获利机会。其次, 为了确定灵活合同的风险溢价即权利金并鼓励合同双方参与合同交易, 从用户角度, 引入考虑用户类型的用电效益函数来描述不同用户的用电意愿, 通过有灵活合同时的用电净效益不小于无合同时的用电净效益来确定权利金的上限值; 从售电公司角度, 考虑权利金上限值的约束, 提出了一个考虑风险偏好的灵活合同权利金决策模型。最后, 算例仿真验证了模型的合理性和有效性。

关键词: 电力零售市场; 实时电价; 风险管理; 灵活合同; 权利金

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

Risk decision-making model for flexible contract between electricity retail company and customer

FAN Dou, ZHANG Shaohua, WANG Xian

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: In the electricity retail market based on real-time pricing, the electricity price is highly volatile and uncertain. Customers need to adopt appropriate risk management tools to avoid or control risk. First, a flexible contract was proposed based on the idea of optional contract between an electricity retail company and a customer, in which the customer can set the strike price of the flexible contract as the highest market price it is willing to pay. The flexible contract can not only enable the customer to avoid the risk of adverse price fluctuations in the retail market, but also remain the opportunities for the customer to make profit when the market price fluctuates favorably. Second, in order to determine the risk premium of the flexible contract and encourage both parties to participate in the contract transaction, a utility function considering customer type was introduced to describe the electricity consumption willingness of different customers, and the

收稿日期: 2022-03-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61773252)

第一作者: 樊豆(1997-), 女, 硕士研究生。研究方向: 电力市场风险管理。E-mail: dfan0226@126.com

通信作者: 张少华(1966-), 男, 教授。研究方向: 电力市场风险管理和博弈分析。E-mail: eeshzhang@shu.edu.cn

upper limit of the premium was determined under the condition that the customer's net utility with the flexible contract was not less than that without the contract. From the viewpoint of the retail company, a risk decision-making model considering the upper limit of the premium was also proposed to determine the premium. Finally, an example was given to verify the reasonableness and effectiveness of the proposed model.

Keywords: *electricity retail market; real-time price; risk management; flexible contract; premium*

电力零售市场的实时定价 (real-time pricing, RTP) 机制能准确及时地反映电力成本, 有效激励电力用户的需求响应, 有助于提升电力系统的运行效率^[1-3]。然而, 实时电价波动剧烈, 会给市场参与者带来巨大的风险, 如果不加以有效防范管理, 将会造成灾难性的后果。例如 2021 年 2 月, 基于实时定价的美国得州电力市场由于极端天气原因导致用户支付电费飞升^[4]。因此市场参与者需要采用远期合同、期权合同等风险管理工具来控制风险^[5-7]。其中, 结合期权交易思想的灵活合同作为有效的风险管理工具, 不仅能给市场参与者提供电价有利波动时的获利机会, 而且还能回避电价不利波动带来的风险^[8-9]。在此背景下, 如何设计灵活的风险管理合同, 激励用户主动积极地参与零售市场交易, 是基于实时定价的电力零售市场设计中需要考虑的重要问题。

现有结合期权思想的灵活电力合同模型研究主要涉及可中断电力合同。Gedra 等^[8-9]把可中断负荷管理合同描述为一种带有看涨期权的灵活合同, 把可中断发电合同描述为一种带有看跌期权的灵活合同, 并基于期权定价理论给出了合同价格的确定方法。张少华等^[10]构造了双边可选择的灵活合同, 其中给予合同卖电方在高现货电价时中断买方供电而卖电给市场的权利, 同时给予合同买电方在低现货电价时拒绝接受卖方供电而到市场上去买电的权利, 并利用期权定价理论给出了合同价格的最优选择模型。Kamat 等^[11]、张少华等^[12]进一步在可中断合同中考虑了提前通知中断选择。Baldick 等^[13]采用动态规划方法, 从售电公司角度给出了可中断电力合同的价值评估和中断策略决策模型。Sheybani 等^[14]将 Black-Scholes 期权定价方法引入期权和日前市场的均衡模型, 提出了一种新的期权定价模型。曹玲玲^[15]把可中断电力期权考虑为依赖现货电价变化且执行次数不确定的障碍期权, 并采用蒙特卡罗模拟方法对电

力期权进行定价。张显等^[16]采用数值法与蒙特卡罗近似法相结合, 给出了可中断电力合同中新型期权的定价方法。周晓薇^[17]介绍了 3 种电力期权合同权利金定价方法, 分别为基于几何布朗运动的 Black-Scholes 定价方法、基于复杂混合电价模型的解析法和蒙特卡罗模拟法。以上研究大多采用期权定价理论确定可中断合同的价值, 从而确定权利金, 并没有考虑合同双方对于权利金的接受意愿。因此, 现有的灵活合同模型并不保证合同双方能积极自愿地参与。

本文给出一种售电公司和用户之间结合期权交易思想的灵活合同, 其中, 用户可根据自己购电意愿确定合同敲定价 (即愿意支付的最高市场价格), 若零售市场价格小于合同敲定价, 则用户按市场价格支付; 若市场价格超过合同敲定价, 则用户按合同敲定价支付。为了确定灵活合同的权利金, 从用户角度, 采用考虑用户类型的用电效益函数来描述不同用户的用电意愿, 通过有灵活合同时的用电净效益不小于无合同时的用电净效益可确定权利金的上限值; 从售电公司角度, 采用考虑风险偏好的效用函数, 提出了一个用于决策权利金的优化模型。最后通过算例仿真验证了模型的合理性和有效性。

1 灵活合同描述

图 1 给出了售电公司与用户之间的灵活合同示意图。该灵活合同主要包括合同电能 D 、合同敲定价 s 、零售市场价格 p 和权利金等参数。售电公司通过提供包含不同价格套餐的灵活合同菜单与用户进行交易, 菜单中有不同的合同敲定价以及相应的权利金, 用户可根据自己购电意愿选择合同敲定价, 即愿意支付的最高市场价格。权利金为用户购买灵活合同所支付的溢价。

用户先按实时定价的零售市场价格 p 从售电

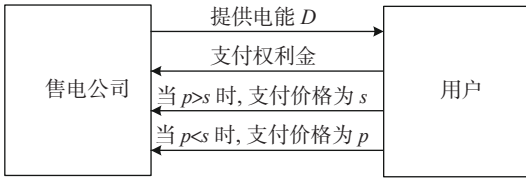


图1 灵活合同示意

Fig. 1 Schematic diagram of flexible contract

公司购买电能 D , 然后根据灵活合同约定进行合同结算。当零售市场价格大于合同敲定价时, 售电公司需支付市场价格与合同敲定价的差价给用户, 此时用户的实际支付价格为合同敲定价; 当零售市场价格小于合同敲定价时, 用户按市场价格支付, 此时灵活合同不起作用。可以看出, 用户签订灵活合同可消除零售市场价格不利波动(涨价)的风险, 售电公司获得用户支付的权利金, 代价是承担涨价时的用户风险。虽然只有当零售市场价格高于合同敲定价时, 用户才能得到差价补偿, 但无论市场价格大于或小于合同敲定价, 用户都需要向售电公司支付权利金。

灵活合同的风险溢价即权利金与合同敲定价、零售市场价格及其波动程度等因素有关, 并直接关系到合同双方的利益。本文将从用户角度, 通过有灵活合同时的用电净效益不小于无灵活合同时的用电净效益, 确定权利金的上限值 λ^+ ; 从售电公司角度, 考虑权利金上限值 λ^+ 的约束, 给出一个用于决策灵活合同权利金 λ 的优化模型。

2 模型构建

2.1 灵活合同权利金上限值的确定

本节将从用户角度, 通过有灵活合同时的用电净效益不小于无灵活合同时的用电净效益, 确定权利金的上限值 λ^+ 。考虑将来某一高峰时段(1 h)的零售市场价格 p 为随机变量, 均值 μ 、标准差 σ 服从对数正态分布。

2.1.1 用户的用电效益函数

为了描述不同类型用户的用电意愿, 假设该时段用户的用电效益函数为 $U(\theta, d)$ 。其中: d 为用户在该时段的用电量; θ 为用户类型参数, 用于区分不同类型用户的不同用电效率, 并且 θ 越大, 用户的用电效率越高。

合理的用户效益函数 $U(\theta, d)$ 满足以下特性^[18]:

a. 效益函数 $U(\theta, d)$ 是用电量 d 的非减函数, 即

$$\frac{\partial U(\theta, d)}{\partial d} \geq 0 \quad (1)$$

b. 边际用电效益是一个非增的函数, 即

$$\frac{\partial^2 U(\theta, d)}{\partial d^2} \leq 0 \quad (2)$$

c. 用户不消耗电量时, 效益为 0, 即

$$U(\theta, d)|_{d=0} = 0 \quad (3)$$

d. 当用电量 d 一定时, 具有较大类型参数 θ 的用户其效益也较大, 即

$$\frac{\partial U(\theta, d)}{\partial \theta} > 0 \quad (4)$$

根据以上性质, 参照文献 [19], 本文把不同类型用户的效益函数统一描述为

$$U(\theta, d) = \theta (k_1 d - 0.5 k_2 d^2) \quad (5)$$

式中: k_1, k_2 为大于 0 的常数; 用户类型参数 $\theta \in (0, 1)$ 。由上式可以得到边际用电效益函数

$$MU(\theta, d) = \frac{\partial U(\theta, d)}{\partial d} = \theta (k_1 - k_2 d) \quad (6)$$

在用户理性的用电量范围内, 有 $MU(\theta, d) > 0$, 即 $d < k_1/k_2$ 。

2.1.2 权利金上限值的确定

有灵活合同时, 用户的净效益可表示为

$$W(\theta, D, \lambda) = U(\theta, D) - C(D, \lambda) + Z(D) \quad (7)$$

$$U(\theta, D) = \theta (k_1 D - 0.5 k_2 D^2) \quad (8)$$

$$C(D, \lambda) = (p + \lambda) D \quad (9)$$

$$Z(D) = \eta(p, s) D \quad (10)$$

$$\eta(p, s) = \begin{cases} 0, & p < s \\ p - s, & p \geq s \end{cases} \quad (11)$$

式中: $W(\theta, D, \lambda)$ 为有灵活合同时的用户净效益; $C(D, \lambda)$ 表示用户在零售市场的购电成本和权利金支出; $Z(D)$ 表示售电公司给予用户的差价补偿。

用户最大化净效益需要满足

$$\frac{\partial W}{\partial D} = 0 \quad (12)$$

将式(7)代入式(12), 可得到有灵活合同时用户的最优用电量为

$$D = \begin{cases} \frac{k_1}{k_2} - \frac{p + \lambda}{k_2 \theta}, & p < s \\ \frac{k_1}{k_2} - \frac{s + \lambda}{k_2 \theta}, & p \geq s \end{cases} \quad (13)$$

将式(13)代入式(7), 得有灵活合同时用户的用电净效益为

$$W = \begin{cases} \frac{1}{2k_2\theta}(k_1\theta - p - \lambda)^2, & p < s \\ \frac{1}{2k_2\theta}(k_1\theta - s - \lambda)^2, & p \geq s \end{cases} \quad (14)$$

无灵活合同时, 用户的净效益可表示为

$$W_0(\theta, D_0) = U_0(\theta, D_0) - C_0(D_0) \quad (15)$$

$$U_0(\theta, D_0) = \theta(k_1 D_0 - 0.5k_2 D_0^2) \quad (16)$$

$$C_0(D_0) = pD_0 \quad (17)$$

式中: $W_0(\theta, D_0)$ 为无灵活合同时用户净效益; D_0 为无灵活合同时用户的用电量; $U_0(\theta, D_0)$, $C_0(D_0)$ 分别表示无灵活合同时用户的用电效益和购电成本。

同理, 通过最大化用户的用电净效益, 得出无灵活合同时用户的最优用电量为

$$D_0 = \begin{cases} \frac{k_1}{k_2} - \frac{p}{k_2\theta}, & p < k_1\theta \\ 0, & p \geq k_1\theta \end{cases} \quad (18)$$

将式(18)代入式(15)中, 得出无灵活合同时用户的用电净效益为

$$W_0 = \begin{cases} \frac{1}{2k_2\theta}(k_1\theta - p)^2, & p < k_1\theta \\ 0, & p \geq k_1\theta \end{cases} \quad (19)$$

考虑有灵活合同时的用户期望用电净效益不小于无合同时的期望用电净效益, 即

$$E[W(\theta, D, \lambda)] \geq E[W_0(\theta, D_0)] \quad (20)$$

当上式取等式时即可确定权利金的上限值 λ^+ , 即最大权利金 λ^+ 满足

$$E[W(\theta, D, \lambda^+)] = E[W_0(\theta, D_0)] \quad (21)$$

2.2 灵活合同权利金的决策模型

2.2.1 售电公司的效用

考虑售电公司的风险偏好, 采用均值-方差效用函数^[20]来描述售电公司的效用

$$V(\pi) = E[\pi] - BVar[\pi] \quad (22)$$

式中: V 表示售电公司的效用; $E[\pi]$ 和 $Var[\pi]$ 分别表示售电公司利润 π 的数学预期和方差; B 为售电公司的风险偏好系数。 B 为正值时, 表明售电公司是风险厌恶者, 而且 B 越大, 表明售电公司越厌恶风险; B 为 0 时, 表明售电公司是风险中立者; B 为负值时, 表明售电公司是风险喜好者。

2.2.2 灵活合同权利金的决策模型

考虑针对各类用户的灵活合同权利金上限约

束, 售电公司可通过自身效用最大化, 获得与各类用户进行灵活合同交易的权利金 λ , 相应的决策模型为

$$\begin{aligned} & \text{Maximize } V(\pi(D, \lambda)) = E[\pi(D, \lambda)] - BVar[\pi(D, \lambda)] \\ & \lambda \\ & \text{s.t. } 0 < \lambda \leq \lambda^+ \end{aligned} \quad (23)$$

其中售电公司的利润可表示为

$$\pi(D, \lambda) = R(D, \lambda) - S(D) - Z(D) \quad (24)$$

$$R(D, \lambda) = (p + \lambda)D \quad (25)$$

$$S(D) = \gamma D \quad (26)$$

式中: $R(D, \lambda)$ 表示售电公司收益, 其中包括用户支付的权利金; $S(D)$ 表示售电公司供电成本; γ 是成本系数, 当售电公司通过批发市场获取电能时, γ 为批发市场价格; $Z(D)$ 表示售电公司给予用户的差价补偿, 由式(10)~(11)确定。有灵活合同时用户用电量 D 由式(13)确定。由式(13)可以看出, 当零售市场价格超过合同敲定价时, 用户按合同敲定价向售电公司购电, 这时用户的用电量是一定的。因此与无合同时相比, 灵活合同降低了用户用电量的波动性。

该优化问题的目标函数为非线性函数, 约束条件中也有非线性函数, 因此, 该优化模型是一个非线性规划 (nonlinear programming, NLP) 模型, 采用 GAMS 软件下的 CONOPT 求解器进行求解^[21]。

3 算例仿真

考虑不同类型的用户参与未来某一高峰时段 (1 h) 的购电, 该时段的零售市场价格 p 服从对数正态分布, 即 $p \sim \lg N(\mu, \sigma^2)$, 取 $\mu=60$, $\sigma=6$ 。为了规避零售市场价格不确定性带来的风险, 用户可与售电公司签订灵活合同。假设用户用电效益函数中系数 $k_1=320$ \$/MWh, $k_2=1.0$ \$/(MWh)², 考虑 4 类用户 (用户类型参数 θ 分别取 0.3, 0.4, 0.5, 0.6), 不同类型用户具有不同的合同敲定价, 售电公司需设计针对不同类型用户的灵活合同权利金。假定售电公司的风险偏好系数 B 取 0.01, 售电公司的供电成本系数 $\gamma=23$ \$/MWh。

3.1 不同类型用户的权利金上限值

表 1 和图 2 给出了不同类型用户在不同合同敲定价下愿意支付的权利金上限值。可以看出, 在同一合同敲定价下, 权利金上限值随着用户类型参数的增大而增大。这是因为用户类型参数越大意味着其用电效率相对较高, 因此, 具有较大类型

表 1 不同类型用户的权利金上限值

Tab.1 Maximum premium for customers with different types

用户类型 参数	合同敲定价/(\$·MWh ⁻¹)			
	60	62	64	66
0.3	2.942	2.090	1.433	0.950
0.4	3.252	2.360	1.660	1.133
0.5	3.363	2.456	1.741	1.198
0.6	3.421	2.506	1.782	1.232

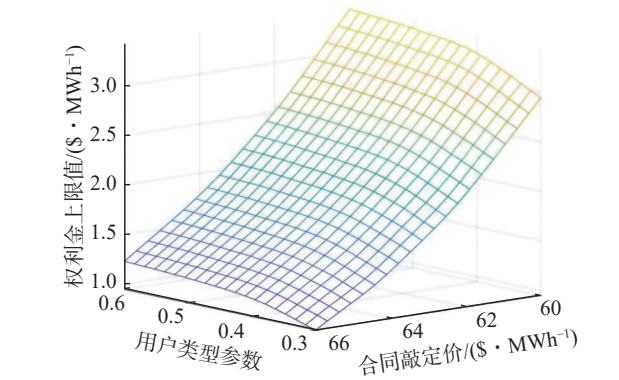


图 2 权利金上限值随合同敲定价和用户类型的变化
Fig. 2 Variations of maximum premium with strike price and customer type

参数的用户愿意支付的权利金上限值相对较大。

对于同一类型用户，较大的合同敲定价意味着用户愿意支付的最高市场价格较大，即在灵活合同中售电公司承担的涨价风险相对较小，因此用户愿意支付的权利金上限值相对较小。

3.2 灵活合同菜单

考虑权利金上限的约束，售电公司通过效用最大化决策，可以得到不同类型用户在不同敲定价下的灵活合同权利金。表 2 给出了售电公司与用户之间的灵活合同菜单，包括不同类型用户在不同敲定价下的灵活合同权利金和用户的用电量，图 3 和图 4 分别为权利金和用电量的变化趋势。可以看出，在同一合同敲定价下，权利金随着用户类型参数的增大而增大，即售电公司对于具有较大类型参数的用户，其收取的权利金也较高，且用户的用电量随着类型参数的增大而增大。

对于同一类型用户，权利金随着合同敲定价的增大而减少，较大的合同敲定价意味着用户愿意支付的最高市场价格较大，即在灵活合同中售电公司承担的涨价风险相对较小，因此售电公司收取的权利金相对较小。

表 2 灵活合同菜单
Tab.2 Flexible contract menu

用户类型 参数	合同敲定价/(\$·MWh ⁻¹)							
	60		62		64		66	
	权利金/(\$·MWh ⁻¹)	用电量/MWh	权利金/(\$·MWh ⁻¹)	用电量/MWh	权利金/(\$·MWh ⁻¹)	用电量/MWh	权利金/(\$·MWh ⁻¹)	用电量/MWh
0.3	2.545	120.682	1.623	120.633	0.859	120.681	0.238	120.834
0.4	2.963	168.745	2.071	168.632	1.302	168.510	0.542	168.387
0.5	3.148	198.773	2.283	198.712	1.563	198.646	0.698	198.579
0.6	3.209	218.836	2.416	218.844	1.629	218.802	0.767	218.760

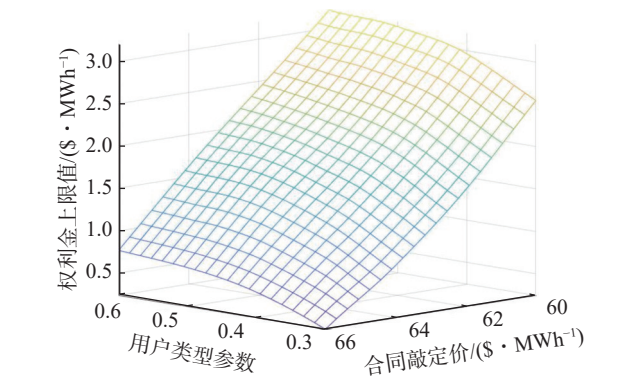


图 3 灵活合同权利金随合同敲定价和用户类型的变化
Fig. 3 Variations of flexible contract premium with strike price and customer type

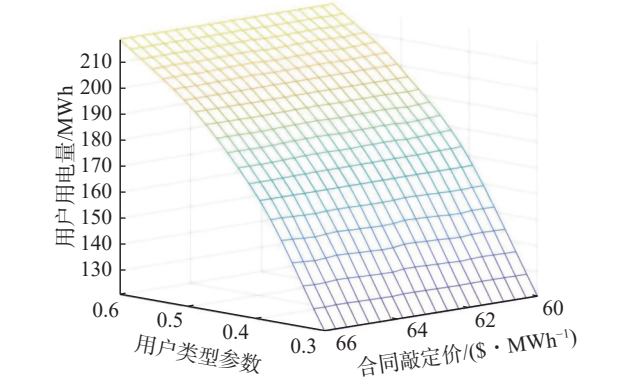


图 4 用户用电量随合同敲定价和用户类型的变化
Fig. 4 Variations of customer power consumption with strike price and customer type

3.3 灵活合同对用户和售电公司的影响

表 3 给出了当合同敲定价 $s=60$ \$/MWh 时灵活合同对用户期望净效益、净效益标准差以及售电公司期望利润、利润标准差和效用的影响。从表 3 中可以看出，与无灵活合同时相比，有灵活合同时各类用户其期望净效益增加，净效益标准

差均减小。
图 5 为不同零售电价场景下，有无灵活合同时用户用电量的变化。从图 5 和表 3 中可以看出，与无灵活合同时相比，有灵活合同时用户用电量的波动性降低，减少了售电公司面临的风险，因此售电公司期望利润和效用均增加，利润标准差减小。

表 3 灵活合同对用户和售电公司的影响
Tab.3 Impacts of flexible contract on customers and retail company

用户类型 参数	用户				售电公司					
	期望净效益/(\$·h ⁻¹)		净效益标准差/(\$·h ⁻¹)		期望利润/(\$·h ⁻¹)		利润标准差/(\$·h ⁻¹)		效用/(\$·h ⁻¹)	
	无合同	有合同	无合同	有合同	无合同	有合同	无合同	有合同	无合同	有合同
0.3	2 162.457	2 210.077	895.624	507.076	4 228.826	4 389.663	302.316	82.100	4 198.594	4 381.453
0.4	5 714.031	5 762.956	1 296.913	688.541	6 199.431	6 268.221	559.806	353.240	6 143.450	6 232.897
0.5	9 892.976	9 935.856	1 539.584	799.355	7 381.794	7 419.282	935.082	528.879	7 288.286	7 366.394
0.6	14 385.606	14 431.953	1 701.780	874.067	8 170.036	8 186.857	1 194.415	648.043	8 050.594	8 122.053

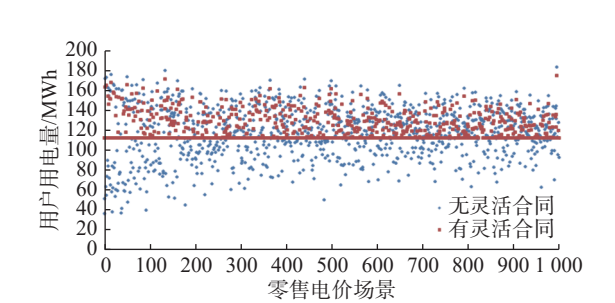


图 5 不同零售电价场景下的用户用电量
Fig.5 Customer's power consumptions under different retail price scenarios

3.4 售电公司不同风险偏好下的结果分析

表 4 中给出了当合同敲定价 $s=66$ \$/MWh，用户类型参数 $\theta=0.3$ 时，售电公司不同风险偏好系数下的优化结果。风险偏好系数 B 越大，表明售电公司风险厌恶程度越高。从表 4 中可以看出，对

于风险偏好系数较大的售电公司，会选择相对保守的策略，权利金增大，售电量降低，利润标准差减少，效用降低。

表 4 售电公司不同风险偏好对结果的影响
Tab.4 Results under retail company's different risk preferences

风险偏好 系数	利润标准差/ (\$·h ⁻¹)	售电公司效用/ (\$·h ⁻¹)	权利金/ (\$·MWh ⁻¹)	售电量/ MWh
0.05	126.903	4 319.314	0.121	121.222
0.25	120.804	4 294.623	0.506	119.940
0.45	117.897	4 270.786	0.739	119.163
0.65	116.343	4 247.376	0.891	118.656

3.5 零售市场价格不确定性对结果的影响

表 5 给出了当合同敲定价 $s=62$ \$/MWh，用户类型参数 $\theta=0.3$ 时，零售市场价格不确定性对结

表 5 零售市场价格不确定性对结果的影响
Tab.5 Impacts of retail market price uncertainty on results

σ	用户				售电公司						权利金/ (\$·MWh ⁻¹)	权利金 上限值/ (\$·MWh ⁻¹)
	净效益标准差/(\$·h ⁻¹)		期望净效益/(\$·h ⁻¹)		效用/(\$·h ⁻¹)		利润标准差/(\$·h ⁻¹)		期望利润/(\$·h ⁻¹)			
	有合同	无合同	有合同	无合同	有合同	无合同	有合同	无合同	有合同	无合同		
3	341.264	450.515	2 230.763	2 167.578	4 415.760	4 390.542	30.670	68.581	4 416.067	4 391.228	0.181	0.704
4	431.814	594.111	2 236.880	2 169.345	4 401.820	4 353.528	53.619	114.496	4 354.673	4 402.356	0.552	1.112
5	531.823	759.266	2 245.281	2 177.212	4 383.132	4 294.906	79.590	200.405	4 383.928	4 296.910	1.023	1.587
6	595.611	895.624	2 261.243	2 189.038	4 359.705	4 198.594	96.277	302.316	4 369.333	4 228.826	1.623	2.090

果的影响。零售市场价格标准差 σ 越大, 其不确定性越大。从表 5 中可知, 权利金上限值以及合同权利金均随着零售市场价格不确定性的增大而增大。从表 5 中可以看出, 随着零售市场价格不确定性的增大, 售电公司的期望利润下降, 同时利润分布的标准差增大, 导致效用减小。与无灵活合同时相比, 有灵活合同时售电公司的期望利润增加, 利润标准差减少, 效用增加, 并且效用增加程度随零售市场价格不确定性的增大而增大。同样从表 5 中看出, 用户期望净效益随着零售市场价格不确定性的增大而增大, 同时净效益分布的标准差增大。与无灵活合同时相比, 有灵活合同时用户的期望净效益增加, 净效益标准差减少。

4 结 论

本文研究了售电公司和用户之间结合期权交易思想的灵活合同模型, 该灵活合同可使用户回避零售市场价格不利波动的风险, 而且能保留市场价格有利波动时的获利机会。通过考虑用户类型的用电效益函数, 提出了从用户角度确定灵活合同权利金上限值的方法; 通过考虑风险偏好特性的售电公司效用模型以及权利金上限值的约束, 给出了用于确定权利金的风险决策模型。最后通过算例分析验证了模型方法的合理性和有效性, 并且表明: 该灵活合同模型有助于降低市场价格不确定环境下用户和售电公司的风险, 可提高用户效益和售电公司效用, 促进不同类型用户参与基于实时定价的零售市场。

参考文献:

- [1] 吴志强, 高岩, 王波. “负载-效用”两级均衡下智能电网实时电价定价策略 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 65–73.
- [2] HUANG W J, ZHANG N, KANG C Q, 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(1): 12.
- [3] 张婕, 孙伟卿, 刘唯. 考虑需求响应收益的售电商实时电价决策模型 [J]. 电网技术, 2022, 46(2): 492–504.
- [4] 严道波, 文劭宇, 杜治, 等. 2021 年得州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示 [J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 121–128.
- [5] DENG S J, OREN S S. Electricity derivatives and risk management[J]. *Energy*, 2006, 31(6/7): 940–953.
- [6] PINEDA S, CONEJO A J. Using electricity options to hedge against financial risks of power producers[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2013, 1(2): 101–109.
- [7] NIROMANDFAM A, YAZDANKHAH A S, KAZEMZADEH R. Designing risk hedging mechanism based on the utility function to help customers manage electricity price risks[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 185: 106365.
- [8] GEDRA T W, VARAIYA P P. Markets and pricing for interruptible electric power[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1993, 8(1): 122–128.
- [9] GEDRA T W. Optional forward contracts for electric power markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1994, 9(4): 1766–1773.
- [10] 张少华, 李渝曾, 王长军, 等. 结合期权理论的双边可选择电力远期合同模型 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(21): 28–32.
- [11] KAMAT R, OREN S S. Exotic options for interruptible electricity supply contracts[J]. *Operations Research*, 2002, 50(5): 835–850.
- [12] 张少华, 刘刚, 李渝曾. 考虑提前通知的可中断负荷管理模型 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(4): 63–66, 103.
- [13] BALDICK R, KOLOS S, TOMPAIDIS S. Interruptible electricity contracts from an electricity retailer's point of view: valuation and optimal interruption[J]. *Operations Research*, 2006, 54(4): 627–642.
- [14] SHEYBANI H R, BUYGI M O. Equilibrium-Based black-Scholes option pricing in electricity markets[J]. *IEEE Systems Journal*, 2021: 1–11.
- [15] 曹玲玲. 基于现代期权理论的可中断电力远期合约的研究 [D]. 保定: 华北电力大学(河北), 2007.
- [16] 张显, 王锡凡, 王建学, 等. 可中断电力合同中新型期权的定价 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 18–23.
- [17] 周晓薇. 电力期权市场构建及期权定价模型研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [18] NIROMANDFAM A, YAZDANKHAH A S, KAZEMZADEH R. Modeling demand response based on utility function considering wind profit maximization in the day-ahead market[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 251: 119317.
- [19] FAHRIOGLU M, ALVARADO F L. Designing incentive compatible contracts for effective demand management[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(4): 1255–1260.
- [20] LIU M, WU F F. Managing price risk in a multimarket environment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2006, 21(4): 1512–1519.
- [21] 魏传江, 王浩, 谢新民, 等. GAMS 用户指南 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.