

引用格式:王静智,赵磊,邓方明,等.居民用户参与电网调峰激励智慧用能策略研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):121-127.

Citation: WANG Jinzhi, ZHAO Lei, DENG Fangming, et al. Research on smart energy consumption strategy of residents participating in peak load regulation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 121-127.

居民用户参与电网调峰激励智慧用能策略研究

王静智^{1,2}, 赵磊^{1,2}, 邓方明^{1,2}, 曹紫薇^{1,2}, 张森林³, 马瑞³

(1. 国网电子商务有限公司, 北京 100053; 2. 国网电商科技有限公司, 天津 300309; 3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410114)

摘要:以实现居民用户智慧用能为着眼点,提出一种居民用户参与电网调峰激励智慧用能策略。首先,根据家用电器的负荷特性将居民用户用电负荷分为4类,并建立其相应数学模型;然后,综合考虑时间、用电满意度以及电费满意度约束建立居民用户用电成本优化模型;同时,考虑传统分时电价难以调动居民参与电网削峰填谷积极性,根据余弦相似度建立调峰效果评估模型,基于居民调峰贡献度提出市场激励机制;最后,将调峰效果引入夏普利值(Shapley value)分配中,建立居民用户与电网公司的合作博弈模型。仿真结果表明:所提策略能有效降低家庭用电成本,同时促进居民用户积极参与电网调峰。

关键词:调峰激励;用电满意度;智慧用能;合作博弈;用电成本

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.014 中图分类号: TM73 文章编号: 1673-9140(2024)04-0121-07

Research on smart energy consumption strategy of residents participating in peak load regulation

WANG Jinzhi^{1,2}, ZHAO Lei^{1,2}, DENG Fangming^{1,2}, CAO Ziwei^{1,2}, ZHANG Senlin³, MA Rui³

(1. State Grid Electronic Commerce Co., Ltd., Beijing 100053, China; 2. State Grid Electronic Commerce Technology Co., Ltd., Tianjin 300309, China; 3. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Focusing on enabling smart energy consumption for residential users, a smart energy strategy with incentives for residential users to participate in grid peak shaving is proposed. According to the load characteristics of household appliances, residential loads are classified into four categories, and corresponding mathematical models are established. Considering time constraints, electricity satisfaction constraints, and electricity bill satisfaction constraints, an optimization model for residential electricity consumption cost is established. Given that traditional time-of-use electricity pricing is inadequate in motivating residents to participate in grid peak shaving and valley filling, a peak shaving effect evaluation model is established based on cosine similarity, and a market incentive mechanism is proposed based on residents' contribution to peak shaving. Finally, the peak shaving effect is introduced into the Shapley value allocation to establish a cooperative game model between residential users and grid companies. Simulation results demonstrate that the proposed strategy can effectively reduce household electricity consumption costs while promoting active participation of residential users in grid peak shaving.

Key words: peak regulation incentive; electricity satisfaction; smart energy consumption; cooperative game; electricity cost

随着中国电力市场改革的进行,电力市场中各市场主体的交易环节和利益划分模式逐渐成熟,并

且持续运行了较长时间。在电力市场大改革之后,市场竞争的力度被大大提高,供应链的核心环节职

收稿日期: 2021-10-27; 修回日期: 2023-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(51977012); 国网电子商务有限公司科技项目(8200/2021-72001B)

通信作者: 马瑞(1971—),男,博士,教授,主要从事电力系统分析与控制、能源互联网及电力市场研究; E-mail: marui818@126.com

能也相应地受到影响,市场中企业间的关系也在慢慢改变,最重要的是,参与电力市场的各主体的利益划分模式也随之发生改变^[1]。

随着智能电网技术的高速发展,电网公司和用户的关系也从原本简单的电能单向传输慢慢发展为电能与信息的双向互动^[2]。作为电力系统的一部分,用户已经不是曾经的被动接收端,而是与电网积极互动的参与者^[3]。智能电网参与者已然包括了家庭用户,在经济性、舒适度等因素的制约下,居民侧积极参与电网的需求侧响应,对电网的安全和稳定具有重大的意义。文献[4]考虑用户的体感、出行等多种评价,建立智能社区双层调度策略,但是主要考虑的是运营商的收益,对居民的用电成本涉及不多;文献[5]建立考虑经济性和舒适度的家庭负荷模型,通过优化用电参数来制定用电计划,但是只考虑了居民侧的用电优化,缺乏电网侧与居民的相关互动机制。根据各地区电网分时电价情况以及用户偏好等因素,电网制定相关的互动政策和激励机制来调整家庭用电设备的运行,这是家庭用户参与电网互动的关键^[6-7]。文献[8]建立考虑用户调峰贡献度的激励机制,实现对分时电价的补充,但缺乏对用户参与电力系统备用和调频的研究;文献[9-10]以社区居民为整体作为研究对象来进行电能的优化管理,却没有从电力系统的角度来进行分析;文献[11]通过多元逻辑回归(mixed logistic regression, MLR)分类器的包装特征选择方法,分析影响住宅用电行为的详细信息;文献[12-13]通过建立奖惩机制来制定居民的用电计划,在居民侧调动需求响应的积极性;文献[14]提出了考虑可再生能源和电动汽车的居民用能管理策略,但没有涉及电力系统与用户的互动策略;文献[15-16]利用聚类算法对居民用户的用电行为进行分析,提高聚类准确率和减少计算复杂性的有效性。

为了充分调动居民用户参与电网调峰的积极性,相应智慧用能策略的提出具有十分重要的意义^[17]。分时电价是当前电网公司激励居民用户参与调峰的主要方式,但是正在实施的分时电价政策并未充分挖掘居民用户的调峰潜力,而且当前的分时电价也可能导致新的负荷高峰,因此,应提出新的激励机制以充分利用需求侧资源参与电网调峰。本文以居民智慧用能为出发点,对居民用户的常见家电进行特性分析并分类,考虑用电舒适度和用电成本,建立用户用电成本优化函数;从电力系统总负荷与居民负荷的关系出发,根据余弦相似度建立

居民用户对系统调峰贡献度量化模型,提出一种调峰奖惩方法。考虑电网与居民侧进行合作博弈,将调峰系数引入夏普利值(Shapley value)中,对双方受益进行划分,充分调动居民参与调峰的积极性。算例分析证明,本文所提居民用户参与电网调峰激励智慧用能策略,可以充分利用不同家电的特性参与电网调峰、节约用电成本,做到物尽其用,同时减少电网调峰压力,实现用户和电网的良好互动。

1 居民用户家电负荷分类

1.1 基荷类家电负荷模型

居民家庭的基荷类家电是指居民用电时的必需品,若对此类负荷的需求未被满足时,居民生活将会受到严重影响,如电灯等。基荷类家电不受家庭能效云平台调度,视为常数 $P_{a1,s}$,表示 s 时段基荷类家电的功率。

1.2 温控类家电负荷模型

电热毯、热水器及空调是常见的温控负荷家电,其耗电量与使用时间、所调温度及外部温度有关,数学模型如下:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{a2,s} \leq P_{s,\max}^w \\ T_{s+1}^{\text{in}} = \omega T_s^{\text{in}} + (1 - \omega) \left(T_s^{\text{out}} \mp \frac{\eta \cdot P_{a2,s}}{A_h} \right) \\ |T_s^{\text{in}}| \leq T_{s,\text{set}}^{\text{in}} \pm \Delta T \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_{a2,s}$ 为 s 时段温控类家电的功率; ω 为室内温度改变的惯性系数; T_s^{out} 、 T_s^{in} 分别为 s 时段室外和室内温度,当空调处于制热、制冷模式时,分别用+、-表示; $T_{s,\text{set}}^{\text{in}}$ 为 s 时段室内温度设定值; A_h 为热传导系数; η 为热传导效率; ΔT 为最大温差量。

1.3 可转移类家电负荷模型

对于洗衣机、洗碗机及烧水壶等可转移类家电,一旦运行就必须持续工作直到工作完毕,使用时间可以整体提前或延迟工作时段的家庭负荷,其运行时间和运行功率恒定,视为常数 $P_{a3,s}$,表示 s 时段可转移类家电的功率。运行约束如下:

$$\begin{cases} \sum_{i=s}^{s+T_a-1} \lambda_a(i) \geq y_a(s) T_a \\ \sum_{s=T_{\text{start}}}^{T_{\text{end}}} \lambda_a(s) = T_a \\ \sum_{s=T_{\text{start}}}^{T_{\text{end}}} y_a(s) = 1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, $\lambda_a(s)$ 为变量,表征设备在 s 时段是否运行,运行时取1,否则取0; $y_a(s)$ 为0/1变量,表征设备 a_3 在 s 时段是否启动; T_a 为设备 a_3 的总运行时段; T_{start} 、

T_{end} 分别为可调度的起始和结束运行时间。

1.4 可中断类家电负荷模型

以电动车为可中断负荷的典型代表。可中断负荷是指总运行时长固定不变,但是可以根据用户需要将其分配到不同时段运行,表达式如下:

$$P_{a_4,s} = \lambda_{a_4}(s)P_{\text{rate}}, s \in [T_{\text{start}}, T_{\text{end}}] \quad (3)$$

式中, $P_{a_4,s}$ 、 P_{rate} 分别为可中断类家电负荷 s 时段的运行和额定功率; $P_{\text{rate}}T_a = E_a$, E_a 为可中断负荷运行时间 T_a 的总用电量。

1.5 智能用电特性建模

将每小时分为 n 个时段,即 $(60/n)\text{min}$,一天有 $24n$ 个时间段, n 的取值越大模型精度也越高,但计算量也会随之增大。

假设智能家电类型为 a_i , $i=1,2,3,4$,其集合为 $A=[a_1, a_2, a_3, a_4]$,一日内用电量:

$$D_{a_i} = [d_{a_i,1} \quad d_{a_i,2} \quad \cdots \quad d_{a_i,24n}] \quad (4)$$

其中, $d_{a_i,s}$ 为 s 时段 a_i 类型智能家电的电量, $s=1,2,\dots,24n$ 。若 a_i 类型智能家电在 s 时段工作,则可以根据不同负荷类型的模型和已有数据得到 $d_{a_i,s}$;否则 $d_{a_i,s}=0$ 。

考虑整个居民用户用电需求情况,对智能家电用电进行优化,即优化智能家电所有时间段的耗电量 D_s , $D_s = \sum_{a_i \in A} d_{a_i,s}$, $s=1,2,\dots,24n$,其总用电量为

$$D = [D_1 \quad D_2 \quad \cdots \quad D_{24n}] \quad (5)$$

2 居民用户用电成本优化模型

在保证用户用电需求的基础上,通过合理调整智能家电运行时间,使得居民用户的整体用电费用最小,达到居民用户智能用电优化的目的。居民用户用电成本目标函数为

$$F_{\text{cost}} = \min \sum_{s=1}^{24n} D_s \rho_s \quad (6)$$

其中, ρ_s 表示 s 时段的电价,电价机制可参考当前常见的分时电价。实际情况下通常以人的意愿来决定智能家电的运行,智能家电的起始和结束运行时间是有限制的,即用电时间有一定范围的限制,同时考虑居民用户用电满意度和电价满意度约束。

1) 时间约束。

各种类型家用电器的使用需满足一定的时间约束,不能完全违背用户用电规律,其约束条件为

$$\begin{cases} \max [\eta_{\text{start}}, t_{\text{start}}] = T_{\text{start}} \\ \min [\eta_{\text{end}}, t_{\text{end}}] = T_{\text{end}} \\ T_{\text{max}} \leq T \leq T_{\text{min}} \end{cases} \quad (7)$$

式中, η_{start} 、 η_{end} 分别为用电电价的最低起始时间和结束运行时间; t_{start} 、 t_{end} 分别为智能家电实际可调度的起始时间和结束运行时间; T_{max} 、 T_{min} 分别为智能家电使用时间的上限和下限; T 为智能家电使用时间。

2) 用电满意度约束。

用户用电负荷曲线与负荷优化策略间的相似程度用 β 表示,用电优化策略越不符合用户用电习惯, β 值就越大,用电优化策略的用户满意度越低。随着负荷的延迟以及运行时间的延长,对用户舒适度的影响也越大。一般来说,可中断和可转移负荷对用户的满意度影响较大,因此,本文只考虑可中断和可转移负荷的影响,建立模型如下:

$$\beta = \frac{T_d}{T_{d,\text{max}}} = \frac{T_{\text{real}} - t_{\text{start}}}{t_{\text{end}} - t_{\text{start}}} \quad (8)$$

式中, $\beta \leq \beta_{\text{set}}$, β_{set} 为相似程度的最大值; T_d 为设备的实际延迟时间; T_{real} 为智能家电实际调度的起始时间; $T_{d,\text{max}}$ 为设备的最大可延迟时间。

3) 电费满意度。

用户侧电费满意度用 δ 表示,当用户用电的电费相较响应前减少时, δ 为正,即满意度较高;反之 δ 为负,即满意度较低。 δ 数学表达式为

$$\begin{cases} \delta = \frac{\sum_{s=1}^{24n} (D_s \rho_s - D'_s \rho'_s)}{\sum_{s=1}^{24n} D_s \rho_s} \\ \sum_{s=1}^{24n} D'_s \rho'_s \leq \sum_{s=1}^{24n} D_s \rho_s \\ \delta \geq \delta_{\text{set}} \end{cases} \quad (9)$$

式中, D'_s 为优化后的耗电量; ρ'_s 为优化后所选时段的电价; δ_{set} 为用户电费满意度的最小值。

3 电网与居民用户互动业务机制

3.1 居民用户与电网互动的的基本框架

电网与居民互动关系框架如图1所示。根据电网峰谷的调控和用户用电需求,居民用户调整各类电器的运行、参与电网调峰,减少用电成本并优化用户负荷曲线。对于居民用户家电,结合其负荷特性可分为4个类别,除了基荷类家电负荷是不可调度负荷之外,其他家电负荷均是可调度负荷。由图2可以看出,在分时电价的环境下,居民侧与电网公司通过进行信息交互,根据居民侧的用电信息和电网峰谷情况,电网对居民侧下达命令,实现电网和居民的良性互动。

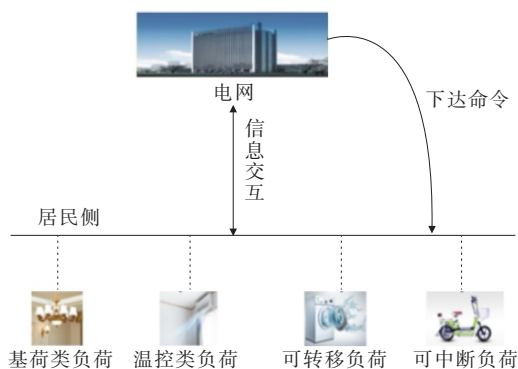


图1 电网与居民互动关系框架

Figure 1 Framework of interaction between power grid and residents

3.2 电网对居民智能用电的激励机制

电网公司应当提供不过于复杂且可以反映用户对电网调峰贡献效果的机制。考虑余弦相似度可以反映不同负荷曲线之间的关系,本文对余弦相似度进行改进,提出一种能够体现居民调峰效果的评估指标,评估模型为

$$H_{sf}(D_s) = \sum_{s=1}^{24n} D_s D_{sys.s} / \sqrt{\sum_{s=1}^{24n} D_s^2} \cdot \sqrt{\sum_{s=1}^{24n} D_{sys.s}^2} \quad (10)$$

式中, $H_{sf}(D_s)$ 为用户的调峰效果评估指标; $D_{sys.s}$ 为系统第 s 个时段的总负荷功率。

$H_{sf}(D_s)$ 越接近 1 表示居民用电情况越有利于电网调峰。随后建立反映调峰效果的奖励模型,其奖励费用表达式为

$$C_{mot} = \omega_{mot} \cdot \frac{H_{sf}(D_s)}{H_{sf,base}} \quad (11)$$

式中, ω_{mot} 为电网公司的激励费率; $H_{sf,base}$ 为居民调峰负荷曲线的调峰效果指标, $H_{sf,base} = H_{sf}(D_{sys}) / [\max(D_{sys.s}) - \min(D_{sys.s})]$; $H_{sf}(D_s) / H_{sf,base}$ 为居民用户的等效调峰容量。

4 电网居民利益划分模型

4.1 电网公司的收益模型

收取输配电过网费是电网公司的核心业务。由于电网企业成本费用中购电成本的占比大大减少,为保持电网公司正常稳定的运行,则必须投入一定的检修运行费用,故电网公司的盈利模型为

$$F_{dw} = \rho_s D(1 - \lambda) - P_{l1} D - P_g D - C_{mot} \quad (12)$$

式中, F_{dw} 为电网收益; λ 为平均线损率; P_{l1} 为输配电电价; P_g 为电网企业购电电价。

4.2 居民用户的收益模型

在考虑分时电价和电网公司的调峰激励后,居

民用户用电成本如下:

$$F_{jm} = C_{mot} - F_{cost} \quad (13)$$

式中, F_{jm} 为居民的收益; F_{cost} 为居民的用电成本。

4.3 电网居民利益分配模型

将居民和电网进行合作博弈,在 Shapley value 法的基础上,引入让利分配规则中的重要参数 K_{dw} , 该参数与居民用户调峰效果直接相关,调峰效果好。根据随机效用理论建立的 Logit 模型,可以反映用户调峰效果融入利益分配后的成效,调峰效果越好居民收益越大,居民参与调峰的积极性也越高,表达式如下:

$$K_{dw} = H_{sf} - 1 / e^{H_{sf}} \quad (14)$$

电网的利润由 Shapley value 分配确定,其具体利润分配比例的数学表达式如下:

$$R_{dw}(V) = \sum_{S_i \in S} \varphi(|S|) [V(S) - V(S - i)] \quad (15)$$

$$W_{dw} = R_{dw} + V(S) \cdot (K_{dw} - 1/2), \quad H_{sf} \in (0, 1] \quad (16)$$

$$\varphi(|S|) = \frac{(N - |S|)! (|S| - 1)!}{N!} \quad (17)$$

式(15)~(17)中, R_{dw} 为电网公司在合作中获得的利润分配; S_i 为参与者中包含第 i 个成员的所有子集; $\varphi(|S|)$ 为加权因子; $V(S)$ 为第 i 个成员所在 S 中的联盟收益; $V(S - i)$ 为不包含第 i 个成员的联盟收益; W_{dw} 为电网公司的最终利润; $|S|$ 为子集 S 中元素个数; N 为参与者总数, $N!$ 为 N 的阶乘。

5 算例分析

本文选取 2015 年 8 月某天 80 户居民用电电器负荷数据,并对家电进行理想化假设,假定设备运行时每个时段保持连续运行且均以额定功率运行,参考文献[8],将电网公司的激励费率设为 0.19 元/kW,各时段购电电价如图 2 所示;参考文献[18],拟定居民家电设备参数及工作情况,如表 1 所示。

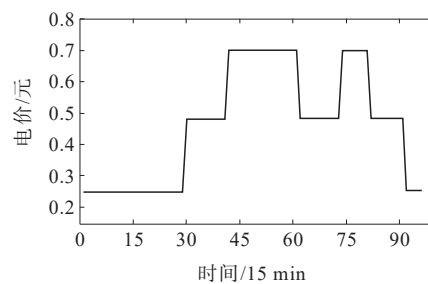


图2 各时段购电电价

Figure 2 Electricity purchase price in each period of time

表 1 家庭用电电器负荷数据

Table 1 Load data of household electrical appliances

可调度设备	可运行时段	功率/kW	最小运行时长/h
洗衣机	00:00—24:00	0.6	2
吸尘器	07:00—22:00	1.6	2
饮水机	05:00—08:00	1.5	1
	16:00—21:00	1.5	1
热水器	00:00—24:00	3.5	4
	07:00—21:00	3.0	8
空调	21:00—次日 07:00	1.5	5
电动汽车	18:00—次日 07:00	3.0	1

在分时电价的基础上,本文以 80 户居民为一个整体进行优化,在满足本文所提约束条件的前提下,设置未进行优化居民用能情况为场景 1,考虑本文所提居民用户用电优化策略为场景 2,模拟优化前、后居民用电负荷曲线如图 3 所示。

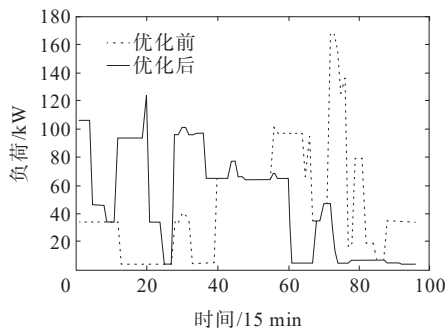


图 3 优化前、后居民用电负荷曲线

Figure 3 Residential power load curves before and after optimization

由图 3 可以看出,优化前、后用户负荷特性有着较为显著的差异。相比于优化前,优化后用户的主要负荷使用时段向前移动,方向朝着低谷电价开始时段,并在新的负荷高峰时段低谷电价开始时刻形成,负荷为 124 kW,负荷曲线也比优化前的相对平滑,所有电器的开启时间按照用电满意度约束的用电时间进行。显然,家庭用电高峰期仍为 03:00—08:30,按照居民用户用电习惯可保证最大的家庭用电舒适度,但是该用电方式使得用电高峰期仍为分时电价的峰时段至尖时段,即电价处于高峰时期。经过计算可以得到,优化前、后每个家庭用户的用电费用大约为 30.35、25.52 元/d。

优化前、后居民用电负荷如表 2 所示,可以看出,场景 1、2 的负荷峰值分别为 167、124 kW,负荷峰值下降了 25.74%,优化前、后的谷值保持不变,优

化前、后的峰谷差从原来的 163 kW 变成 120 kW,下降了 26.38%。

表 2 优化前、后居民用电负荷

Table 2 Residential power loads before and after optimization

场景	用电负荷		
	峰	谷	峰谷差
1	167	4	163
2	124	4	120

优化前、后居民用户用电成本曲线如图 4 所示,可以看出,优化后居民用户用电的时段向前移动,相对于未优化前,居民用户的主要用电时段没有明显的变化,不能满足人们的期望。因此,随着居民用户对家庭能源优化要求的不断提高,优化时不能只考虑舒适度或者电价单方面的需求,需要从多方面综合考虑。

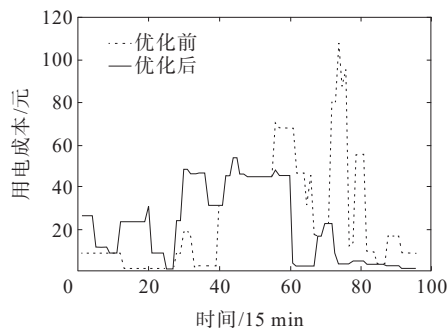


图 4 优化前、后居民用电成本曲线

Figure 4 Residential electricity costs before and after optimization

优化前、后成本对比如表 3 所示,场景 1、2 下居民用电总成本分别为 2 428.70、2 041.90 元,用电总成本下降了 15.92%;激励机制下居民用户参与电网调峰,可以看出,优化前、后场景 1 的调峰效果比场景 2 的差,激励与调峰效果呈正相关,场景 1、2 下居民最终用电总成本分别为 2 286.64、1 895.01 元,场景 2 比场景 1 的用电成本减少了 391.63 元。由此说明,居民用户参与电网调峰激励智慧用能策略可以兼顾电网和居民用户的利益,激励居民参与电网调峰是电网调峰资源的来源之一,可以实现电网与居民用户的友好互动。

表 3 优化前、后成本对比

Table 3 Cost comparison before and after optimization

场景	用电总成本/元	激励费用/元	调峰效果指标	最终用电成本/元
1	2 428.70	142.06	0.776 7	2 286.64
2	2 041.90	146.89	0.803 1	1 895.01

根据式(16)、(17)分别计算场景1、2的收益,如表4所示;联盟前、后成本对比如图5所示。由表4、图5可以看出,当利用Shapley value分配模型对利润进行分配时,需要进一步分析两两之间形成的小联盟所获取的收益。电网公司与居民形成联盟,联盟后场景1、2下的收益分别增长了309.03、322.40元。

表4 联盟前、后收益对比

Table 4 Revenue comparison before and after alliance

场景	方式	收益/元
1	非联盟	-3 090.53
	联盟	-2 781.50
2	非联盟	-3 223.90
	联盟	-2 901.50

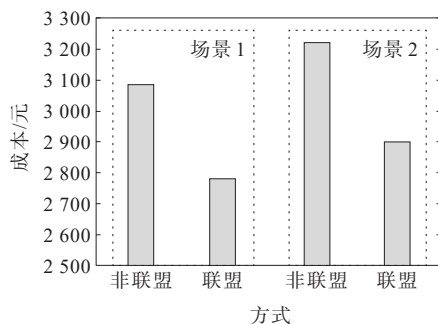


图5 联盟前、后成本对比

Figure 5 Cost comparison before and after alliance

当合作博弈主体为2个时,因传统Shapley value法收益是均分的,故为了激励居民参与电网调峰,利用调峰效果评估指标加入合作博弈的利益分配。当调峰效果评估指标越接近于1时,居民所分配的收益越高,调峰效果越好。场景1、2下的网荷双方收益对比如表5所示。

表5 场景1、2下的网荷双方收益对比

Table 5 Revenue comparison of power grid and load under scenario 1 and 2 元

主体	场景	非合作利益	改进Shapley合作收益分配
居民	1	-2 286.70	-1 900.50
	2	-1 905.50	-1 871.10
电网公司	1	-803.83	-880.96
	2	-1 318.40	-1 030.40

分析表5,从居民用户的角度来看,场景1下当其参与和不参与电网公司联盟时的收益分别为-1 900.50、-2 286.70元,同比收益增长了386.20元;场景2下当其进行用电成本优化、不参与电网公

司联盟时,收益为-1 905.50元,当其进行用电成本优化并参与电网公司联盟时,收益为-1 871.10元,同比收益增加了34.40元。这是因为场景1的调峰效果比场景2的差,场景2的用电成本比场景1的低。

从电网公司的角度来看,场景1下当其参与和不参与联盟时的收益分别为-880.96、-803.83元,同比收益减少了9.59%;场景2下当其参与和不参与联盟时的收益分别为-1 030.40、-1 318.04元,同比收益增长了21.82%。由此可以看出,在对居民用户进行成本优化的同时,参与联盟的智慧用能策略不仅能够兼顾居民用户的利益,同时也能兼顾电网公司的利益。

从调峰效果来看,为了激励居民参与电网调峰,利用调峰效果评估指标加入合作博弈的利益分配,调峰系数越接近1居民所分配的收益越高,调峰效果越好。因为场景1没有场景2的调峰效果好,所以从表3可以看出,场景1比场景2的用电成本高。

6 结语

本文针对居民用户参与电网调峰激励智慧用能策略展开了相关研究,根据余弦相似度建立了调峰效果评估模型,并建立居民调峰贡献度激励机制,同时在激励机制的基础上,采取以电网与居民用户进行合作博弈的形式,同时兼顾双方利益,促进居民用户积极参与电网调峰。

1) 针对不同类型的家庭用电负荷,在考虑时间、用电满意度及电价约束的基础上,以用电成本最低进行优化。算例分析表明:用电成本得到有效降低,转移了居民原始用电的小高峰时段,一定程度上降低了用电成本差。

2) 所提居民用户参与电网调峰激励智慧用能策略能够有效兼顾电网公司和居民用户的利益,是对分时电价的有效补充。

3) 基于合作博弈理论,用Shapley value法对居民和电网公司进行利益分配,引入居民调峰系数,进一步引导居民参与电网调峰,同时降低用电成本。

参考文献:

- [1] 向悦萍,杨健维,臧天磊,等.计及电能质量的电力市场多主体博弈模型[J].电网技术,2020,44(9):3383-3394.
XIANG Yueping, YANG Jianwei, ZANG Tianlei, et al. Multi-agent game model in electricity market considering power quality[J]. Power System Technology,

- 2020,44(9):3383-3394.
- [2] 陈岑,武传涛,林湘宁,等. 计及上下游市场的园区综合能源商购售能策略[J]. 电工技术学报,2022,37(1):220-231. CHEN Cen, WU Chuantao, LIN Xiangning, et al. Purchase and sale strategies of park integrated energy suppliers in wholesale and retail markets[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1): 220-231.
- [3] 孙毅,贾孟扬,陆俊,等. 计及用户需求响应的智能用电互动潜力分析[J]. 电力科学与技术学报 2016,31(4):43-50. SUN Yi, JIA Mengyang, LU Jun, et al. Analysis of the potential of intelligent electricity interaction taking into account the response of user needs[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 43-50.
- [4] 李振坤,黄滢,李谅,等. 计及需求侧响应的主动配电网多时间尺度优化调度[J]. 电力建设,2023,44(3):36-48. LI Zhenkun, HUANG Ying, LI Liang, et al. Multi-time scale optimal dispatching of active distribution network considering demand-side response[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3): 36-48.
- [5] 史林军,史江峰,杨启航,等. 基于分时电价的家庭智能用电设备的运行优化[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(24):88-95. SHI Linjun, SHI Jiangfeng, YANG Qihang, et al. Optimization of the operation of household smart electrical equipment based on time-of-use electricity price[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 88-95.
- [6] 王永明,陈宇星,殷自力,等. 基于大数据分析的电力用户行为画像构建方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 173-179. WANG Yongming, CHEN Yuxing, YIN Zili, et al. Research on construction method of power user behavior portrait based on big data analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 173-179.
- [7] 赵会茹,王学杰,李兵抗,等. 考虑能量共享的多社区光储系统分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化,2022,46(9):21-31. ZHAO Huiru, WANG Xuejie, LI Bingkang, et al. Distributionally robust optimal dispatch for multi-community photovoltaic and energy storage system considering energy sharing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9): 21-31.
- [8] 朱超婷,杨玲君,崔一铂,等. 考虑需求响应用户参与度的主动配电网优化调度[J]. 电测与仪表,2023,60(4):99-105. ZHU Chaoting, YANG Lingjun, CUI Yibo, et al. Optimal scheduling of active distribution network considering user participation in demand response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 99-105.
- [9] 孙毅,贾孟扬,陆俊,等. 需求侧管理中面向居民用电的互动化评价模型[J]. 电力系统自动化,2017,41(13):62-69. SUN Yi, JIA Mengyang, LU Jun, et al. Interactive evaluation model for residential power consumption in DSM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 62-69.
- [10] HUANG Y, ZHANG J, MO Y, et al. A hybrid optimization approach for residential energy management[J]. IEEE Access, 2020, 8: 225201-225209.
- [11] YU Y, WANG B, WANG Z, et al. Wrapper feature selection based multiple logistic regression model for determinants analysis of residential electricity consumption[C]//Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT), Singapore, 2017.
- [12] ZHANG Y, MENG K, KONG W, et al. Bayesian hybrid collaborative filtering-based residential electricity plan recommender system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15: 4731-4741.
- [13] VIVEKANANTHAN C, MISHRA Y, LEDWICH G, et al. Demand response for residential appliances via customer reward scheme[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 5(2): 809-820.
- [14] 韩峰,曾成碧,苗虹. 计及EV与可再生能源的家庭微电网能源管理系统[J]. 电力科学与技术学报,2021,36(1):79-86. HAN Feng, ZENG Chengbi, MIAO Hong. A home microgrid energy management system that takes into account EVs and renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 79-86.
- [15] 白东壮,田世明,邹毅豪,等. 基于FDA的居民用户空调用电行为分类分析方法[J]. 智慧电力,2022,50(3):44-49+71. BAI Dongzhuang, TIAN Shiming, ZOU Yihao, et al. Classification analysis method of residential air conditioning electricity consumption behavior based on functional data analysis model[J]. Smart Power, 2022, 50(3): 44-49+71.
- [16] 朱明辉,权琛,朱超,等. 耦合聚类基线及舒适度的居民负荷需求响应评估方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(5): 99-105+112. ZHU Minghui, QUAN Chen, ZHU Chao, et al. An evaluation method of residents' load demand response based on coupling clustering baseline and comfort degree [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(5): 99-105+112.
- [17] HERATH P, VENAYAGAMOORTHY G K. Scalable residential demand response management[J]. IEEE Access, 2021, 9: 159133-159145.
- [18] 傅质馨,李紫嫣,朱俊澎,等. 面向多用户的多时间尺度电力套餐与家庭能量优化策略[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(11):21-31. FU Zhixin, LI Ziyang, ZHU Junpeng, et al. Multi-user multi-timescale power packages and home energy optimization strategies[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 21-31.