

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2022.06.014

计及多重影响因素的居民需求响应行为分析

刘晓峰, 陈雪颖, 柏颖, 王维

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210023)

摘要:居民用户需求响应的实施对于实现节能减排具有重要意义。为进一步促进居民需求响应,探究各种因素对居民需求响应参与度的影响程度,文中提出一种计及多重影响因素的居民需求响应行为分析方法。首先,根据居民参与需求响应的主要影响因素,即社交关系、属性影响以及自身意愿建立多重因素影响模型;其次,利用3层因素间的相互作用和居民决策过程的马尔可夫性质建立居民需求响应的马尔可夫决策方程,用以分析不同阶段居民参与需求响应的行为特性;最后,通过算例量化各因素对居民需求响应行为的影响程度。仿真结果表明,多重因素影响下的居民需求响应参与度低于仅考虑单方面因素下的参与度,且不同因素间的交互影响也会导致用户参与度的变化。

关键词:居民需求响应;参与度;居民决策行为;多重影响因素;居民行为特性;马尔可夫决策方程

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)06-0116-09

0 引言

为积极响应我国在2020年提出的“双碳”目标,国家电网提出系列举措,其中在能源消费侧要求构建可中断、可调节多元负荷资源,完善相关政策和价格机制,引导各类电力市场主体挖掘调峰资源。需求响应(demand response, DR)作为一种激励机制,通过引导电力用户主动改变电力消费行为的方式,促进电力供需平衡,提高能源利用效率,实现节能减排^[1-3]。电力用户通常包括居民、商业以及工业用户,其中居民用户基数大,柔性负荷资源丰富,具有较大的响应潜力,因而分析居民参与DR具有重要意义^[4-6]。

目前,针对居民用户参与DR的研究大多集中在优化调度方面,主要从市场机制入手,利用价格型和激励型2种响应模式,对用户收益、舒适度和用户响应特性等进行分析^[7-9],制定优化调度策略;或以负荷聚合商为实施主体,将用户侧响应资源按不同负荷类型聚合形成负荷群,针对特定种类的负荷制定相应的激励措施^[10-11],从而降低负荷曲线的峰谷差,实现配电网的经济运行。例如文献[7]分析了用户在价格型DR和激励型DR下的响应特性,以配电网日运行成本最小为目标函数建立主动配电网调度模型,求解最优响应策略。目前针对居民DR参与度的研究不多,且其中大部分文献只研究面向单一种类负荷的用户参与度,从负荷层面建立响应模型分析物理因素对用户响应概率的影

响^[12-13],或在DR策略中考虑用户参与的不确定性问题^[14]。例如文献[12]建立了温控类负荷的响应模型,量化了物理因素对响应概率的影响趋势及程度,有助于评价用户群体的响应积极性与DR策略的合理性。

上述有关优化调度的文献虽然以居民为研究对象分析DR策略,但是均默认居民为全部参与DR状态,并不涉及其参与DR决策行为的动态变化。然而,在DR项目实施过程中,居民全部参与的难度很大,必定会存在部分居民不参与的情况,因此为进一步推进DR项目的实施,需要对居民DR参与度进行研究。现有关于居民DR参与度的文献均从负荷层面入手,未曾从用户层面分析居民参与DR的决策行为,探究影响居民DR参与度的具体因素。

对具有不同行为特性的居民,有针对性地探究影响居民决策的因素,分析各因素对居民造成的影响,才能制定相应的策略,提高居民参与DR的积极性。为此,结合现有文献的不足之处,文中从以下两方面展开讨论:(1)居民DR行为受众多因素影响,应如何考虑多种因素的共同影响;(2)DR项目实施过程中,居民在不同阶段的状态都可能发生改变,应如何描述居民DR行为的动态变化。鉴于此,文中提出一种计及多重影响因素的居民DR行为特性分析方法,从居民的行为特性入手,探究不同因素对居民决策的影响程度,为制定DR机制提供决策依据。

1 居民DR行为分析架构

为更好地促进DR项目在居民侧的实施,需要

收稿日期:2022-06-12;修回日期:2022-09-17

基金项目:江苏省重点研发计划资助项目(BE2020081-4)

对居民是否参与响应的决策行为深入分析。居民决策行为受多种因素影响,如图1所示,可将其划分为两大类,一是外界环境因素,如政策宣传程度、社交关系、属性影响等;二是用户自身意愿因素,居民会根据自身条件进行选择,主要受主观接受程度和收入水平的影响^[15]。政策宣传主要对居民用户初始情况产生影响。政策宣传越到位,DR执行的初始阶段参与人数越多,此后居民会受社交关系、属性及自身意愿的影响进行DR决策。由于政策宣传程度主要影响用户初始参与度,并非文中研究重点,因此文中重点考虑社交关系、属性及自身意愿对居民参与度的影响。

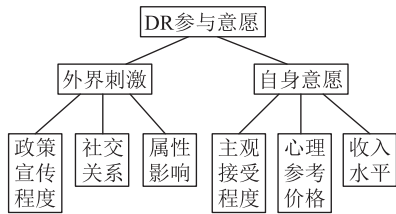


图1 影响居民参与DR的因素

Fig.1 Factors affecting residents' participation in DR

当DR项目实施时,居民会在社交关系、属性以及自身意愿3个层面的影响下进行决策,为便于分析,这3层影响因素分别以 G_1 、 G_2 、 G_3 表示,具体如图2所示。由图2可知,除了3层因素单独影响外,各因素间的相互作用也会改变居民决策。以社交关系和属性影响为例,若居民间的用电属性相似,则说明其阶级、职业、生活习惯等特性相近,居民间交往更频繁,从而会增强社交关系对居民参与DR概率的影响。进一步,基于对3层因素及其交互作用的建模分析,可分别得到居民在不同条件下的状态转移概率,进而利用状态转移概率树得出马尔可夫动态方程组,对用户参与度展开分析。

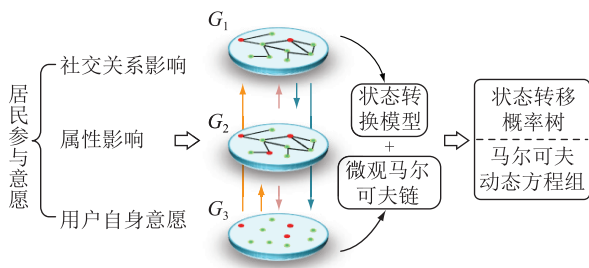


图2 计及多重影响因素的居民DR行为分析架构

Fig.2 DR behavior analysis architecture for residents considering multiple influencing factors

文中将整个DR过程划分为不同阶段,在每个阶段结束时,居民可自主决定下一阶段的决策。通常,居民下一阶段的决策只受当前阶段影响,与过去是否参与无关,具有无后效性,因此居民进行DR

决策的行为具有马尔可夫性质,即满足式(1)。

$$P(X_{t+1} | X_0, \dots, X_t) = P(X_{t+1} | X_t) \quad (1)$$

式中: $P(X_{t+1} | X_t)$ 为在 t 阶段居民决策状态为 X_t 的条件下, $t+1$ 阶段居民决策状态为 X_{t+1} 的概率。居民的状态转换模型如图3所示,其中 S 态为居民不参与DR状态; I 态为居民参与DR状态; β 为居民受到影响后由 S 态转化为 I 态的概率,反映了不同因素对居民的影响程度; μ 为居民由 I 态转化为 S 态的概率,反映了居民受舒适度或用电成本等影响而退出DR的概率。文中所述场景以刚开始推行DR项目时为起点,初始状态下居民大部分不参与响应。为获得较高的用户参与度,提高居民参与DR的响应潜力,文中重点讨论居民由 S 态转变为 I 态的过程,不对 μ 展开讨论。假设居民会以一个确定的概率值 μ 自发地退出响应。

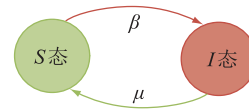


图3 居民状态转换模型

Fig.3 State transition model for residents

2 居民用户DR行为影响因素

2.1 社交关系影响

社交关系影响主要是指在社交网络中居民间的社交关系对居民参与DR的影响。在现实生活中,居民的决策行为极易受他人影响,当其他用户处于参与状态时,决策用户受他人影响而选择参与DR的概率与两人社交关系相关,具体表现为社交关系越紧密,影响程度越强^[16]。对于一个总数为 N 的居民群体,为刻画居民在社交关系影响下受不同用户影响而选择参与DR的概率,建立影响概率矩阵 A :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & a_{1i} & a_{1j} & \cdots & a_{1N} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & 1 & a_{ij} & \cdots & a_{iN} \\ a_{j1} & \cdots & a_{ji} & 1 & \cdots & a_{jN} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{N1} & \cdots & a_{Ni} & a_{Nj} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $a_{ij} \in [0,1]$ 为在用户 j 参与DR的条件下用户 i 受用户 j 的影响选择参与DR的概率。

考虑到用户实际的社交关系比较复杂,会同时受多个用户影响,且其参与概率也受3层因素影响。在此假设有 M 个用户,则此时用户 i 在社交关系,即 G_1 层影响下受所有用户的影响而选择参与DR的概

率为:

$$P_{1,i,t} = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - a_{ij} P_{j,t}^1) \quad (3)$$

式中: $\prod_{j=1}^M (1 - a_{ij} P_{j,t}^1)$ 为用户 i 受 M 个用户影响不参与 DR 的概率; $P_{j,t}^1$ 为 t 阶段用户 j 在 G_1 层影响下处于 I 态的概率, 具体计算方式见 3.1 节。

2.2 属性影响

属性影响指居民间的用电相似性对其进行 DR 决策造成的影响^[17]。居民在进行 DR 决策时会考虑到自身的用电行为和用电需求, 为保证自身用电舒适度, 居民会参考与自身有相似用电行为和用电需求的用户决策。当参考用户处于 I 态时, 用户间用电相似度越高, 居民受其影响程度越强, 选择参与 DR 的概率就越高。居民在属性影响下的关系矩阵为 $\mathbf{B} = (b_{ij})_{N \times N}$, b_{ij} 取值为 0 或 1, $b_{ij} = 0$ 说明用户 i 和 j 间不存在联系; $b_{ij} = 1$ 说明用户 i 和 j 间存在联系, 会相互产生影响。文中通过构造日负荷特征向量^[18-19], 利用余弦距离对不同用户的用电相似度进行量化。日负荷特征向量 \mathbf{Q}_i 为:

$$\mathbf{Q}_i = [Q_{\max} \quad Q_{\min} \quad Q_{\text{median}} \quad \sigma_{\text{median}}] \quad (4)$$

式中: Q_{\max} , Q_{\min} 分别为日负荷中的最大负荷和最小负荷; Q_{median} 为负荷中位数; σ_{median} 为相对于中位数的标准偏差。

对于不同的日负荷特征向量 \mathbf{Q}_i 和 \mathbf{Q}_j , 其用电相似度 ε_{ij} 可表示为:

$$\varepsilon_{ij} = \cos \langle \mathbf{Q}_i, \mathbf{Q}_j \rangle = \frac{\mathbf{Q}_i^T \mathbf{Q}_j}{\sqrt{(\mathbf{Q}_i^T \mathbf{Q}_i)(\mathbf{Q}_j^T \mathbf{Q}_j)}} \quad (5)$$

此时用户 i 在用电属性, 即 G_2 层影响下受所有用户影响而选择参与 DR 的概率为:

$$P_{2,i,t} = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - \varepsilon_{ij} P_{j,t}^2) \quad (6)$$

式中: $P_{j,t}^2$ 为 t 阶段用户 j 在 G_2 层影响下处于 I 态的概率, 具体计算方式见 3.1 节。

2.3 居民用户自身意愿

居民在进行电力商品消费时, 会将价格作为衡量标准。在进行 DR 决策时, 居民会根据以往经验、历史价格以及自身收入水平得到心理参考价格^[20], 并与实际补偿电价对比, 二者的偏差大小即可反映出居民自身意愿。不同收入水平的用户对价格的敏感系数和接受程度不同, 但二者均与居民的收入水平存在一定关系。敏感系数指居民在设定当前阶段的心理参考价格时, 对外界价格变动的敏感程度, 值越大表示用户对价格的变动越敏感, 因此用户在设置心理参考价格时, 会对历史价格比较看

重; 接受程度指用户的心理参考价格与实际补偿电价间的最大偏差程度, 值越大说明用户能接受的价格偏移量越大。参考文献[21], 电力用户对电价的接受程度在 0.27 左右, 考虑到不同居民的收入差异, 将居民的敏感系数和接受程度的范围划分在 0.1~0.5, 并根据居民收入水平划分为 5 档, 具体如表 1 所示。表 1 中, R 为居民的年收入; R_{av} 为人均年收入。假设居民的收入水平服从正态分布, 则用户 i 心理参考价格的计算公式为:

$$K_{i,t} = \delta_i x_{t-1} + (1 - \delta_i) K_{i,t-1} \quad (7)$$

式中: $K_{i,t}$, $K_{i,t-1}$ 分别为 t 阶段、 $t-1$ 阶段用户 i 的心理参考价格; δ_i 为用户 i 对价格的敏感系数; x_{t-1} 为 $t-1$ 阶段的市场补偿价格。

表 1 居民对价格的敏感系数和接受程度
Table 1 Price sensitivity coefficient and acceptance degree of residents

收入水平	敏感系数	接受程度
$R \in (0, 0.25R_{\text{av}}]$	0.5	0.1
$R \in (0.25R_{\text{av}}, 0.75R_{\text{av}}]$	0.4	0.2
$R \in (0.75R_{\text{av}}, 1.25R_{\text{av}}]$	0.3	0.3
$R \in (1.25R_{\text{av}}, 1.75R_{\text{av}}]$	0.2	0.4
$R \in (1.75R_{\text{av}}, \infty)$	0.1	0.5

文中利用心理参考价格与实际补偿电价的偏移量来衡量居民用户自身意愿, 如图 4 所示, 当实际补偿电价位于用户可接受范围内时, 用户自身意愿会上升。

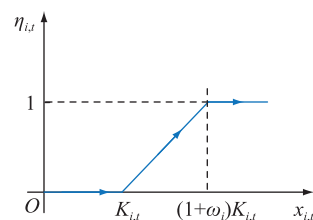


图 4 用户自身意愿变化趋势
Fig.4 Trend of user's will

由此可得用户自身意愿 $\eta_{i,t}$ 的具体表达式为:

$$\eta_{i,t} = \begin{cases} 0 & 0 < x_{i,t} < K_{i,t} \\ \frac{1}{\omega_i K_{i,t}} x_{i,t} - \frac{1}{\omega_i} & K_{i,t} \leq x_{i,t} < (1 + \omega_i) K_{i,t} \\ 1 & x_{i,t} \geq (1 + \omega_i) K_{i,t} \end{cases} \quad (8)$$

式中: ω_i 为用户 i 对价格偏差的接受程度; $x_{i,t}$ 为用户 i 对应的实际补偿电价。

此时用户 i 在自身意愿, 即 G_3 层影响下选择参与 DR 的概率为:

$$P_{3,i,t} = \eta_{i,t} \quad (9)$$

3 居民 DR 决策行为建模分析

3.1 多重因素交互影响分析

除上述 3 层因素的单独影响外,因素间的相互作用也会改变居民决策,在此引入影响系数 $\alpha = [\alpha_{12} \alpha_{13} \alpha_{21} \alpha_{23} \alpha_{31} \alpha_{32}]$ 反映不同因素间的相互影响程度。首先考虑因素间的两两相互作用,当 G_1 层因素分别与另外 2 层影响因素产生相互影响时,用户 i 由 S 态转化为 I 态的概率为:

$$\begin{cases} R_{i,t}^{1,2} = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - \alpha_{12} a_{ij} P_{j,t}^{I_1}) \\ R_{i,t}^{1,3} = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - \alpha_{13} a_{ij} P_{j,t}^{I_1}) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $R_{i,t}^{1,2}$, $R_{i,t}^{1,3}$ 分别为 G_2 、 G_3 层因素对 G_1 层产生影响后用户 i 在 t 阶段的状态转移概率; α_{12} , α_{13} 分别为 G_2 、 G_3 层因素对 G_1 层的影响系数。 $\alpha_{12} > 1$ 时,说明 G_2 层因素对 G_1 层有正面影响,用户在 G_1 层因素作用下的参与概率提高; $\alpha_{12} < 1$,说明 G_2 层因素对 G_1 层产生负面影响,用户在 G_1 层因素作用下的参与概率降低; $\alpha_{12} = 1$ 时,说明 2 层因素间互不干扰。其余影响系数同理。

$$P_{j,t}^{I_1} = P_{j,t}^{I_1 S_2 S_3} + P_{j,t}^{I_1 S_2 I_3} + P_{j,t}^{I_1 I_2 S_3} + P_{j,t}^{I_1 I_2 I_3} \quad (11)$$

$$P_{j,t}^{I_2} = P_{j,t}^{S_1 I_2 S_3} + P_{j,t}^{S_1 I_2 I_3} + P_{j,t}^{I_1 I_2 S_3} + P_{j,t}^{I_1 I_2 I_3} \quad (12)$$

式中: $P_{j,t}^{S_1 I_2 S_3}$ 为 t 阶段用户 j 在 G_1 、 G_2 、 G_3 层分别处于 S 态、 I 态、 S 态的概率。其余变量含义相似。

同理可得 G_2 、 G_3 层内用户由 S 态转化为 I 态的概率分别为:

$$\begin{cases} R_{i,t}^{2,1} = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - \alpha_{21} \varepsilon_{ij} P_{j,t}^{I_2}) \\ R_{i,t}^{2,3} = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - \alpha_{23} \varepsilon_{ij} P_{j,t}^{I_2}) \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} R_{i,t}^{3,1} = \alpha_{31} \eta_{i,t} \\ R_{i,t}^{3,2} = \alpha_{32} \eta_{i,t} \end{cases} \quad (14)$$

进一步考虑 3 层因素间的交互作用,可以得到用户 i 由 S 态转化为 I 态的概率分别为:

$$W_{i,t}^{1,23} = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - \alpha_{12} \alpha_{13} a_{ij} P_{j,t}^{I_1}) \quad (15)$$

$$W_{i,t}^{2,13} = 1 - \prod_{j=1}^M (1 - \alpha_{21} \alpha_{23} \varepsilon_{ij} P_{j,t}^{I_2}) \quad (16)$$

$$W_{i,t}^{3,12} = \alpha_{31} \alpha_{32} \eta_{i,t} \quad (17)$$

式中: $W_{i,t}^{1,23}$ 为 G_2 、 G_3 层同时对 G_1 层有影响作用时 G_1 层用户 i 在 t 阶段的状态转换概率; $W_{i,t}^{2,13}$, $W_{i,t}^{3,12}$ 与 $W_{i,t}^{1,23}$ 含义相似。

3.2 居民 DR 马尔可夫决策方程

居民的 DR 决策过程具有马尔可夫性质,因此

可以利用马尔可夫方程对居民下一阶段的决策行为进行预测,得到整个响应进程中用户参与度的变化趋势。为获取马尔可夫方程,首先需要建立状态转移概率树^[22-23],通过概率树可以得到每一阶段用户所有可能的变化状态及转移概率。图 5 为 $S_1 S_2 S_3$ 状态下的概率树,同理可得另外 7 个状态转移概率树。概率树的根代表用户在 t 阶段的可能状态,叶为 $t+1$ 阶段的可能状态。

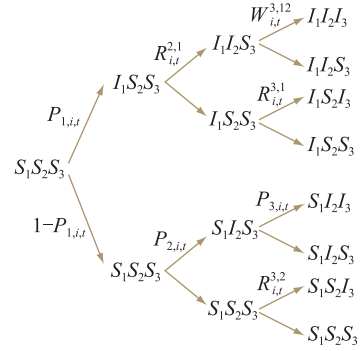


图 5 状态转移概率树

Fig.5 State transition probability tree

从概率树可以看出用户最终有 8 种不同状态,而实际上用户只有参与和退出 2 种状态,在此假设只有用户在 3 层因素的影响下全部为参与状态即用户状态为 $I_1 I_2 I_3$ 时,才认定用户为参与 DR 状态,其余均属于用户退出 DR 状态。利用概率树写出 8 个状态的马尔可夫决策方程,在此受到文章篇幅限制,只列出其中 2 个动态方程,其余方程可参照式(18)、式(19)推出,其中 $P_{i,t+1}^{S_1 S_2 S_3}$ 是用户 i 在 $t+1$ 阶段处于退出响应状态时的其中一种情况。

$$\begin{aligned} P_{i,t+1}^{S_1 S_2 S_3} = & (1 - P_{1,i,t}) (1 - P_{2,i,t}) (1 - P_{3,i,t}) P_{i,t}^{S_1 S_2 S_3} + \\ & (1 - R_{i,t}^{1,3}) (1 - R_{i,t}^{2,3}) \mu_3 P_{i,t}^{S_1 S_2 I_3} + \\ & (1 - R_{i,t}^{1,2}) \mu_2 (1 - P_{3,i,t}) P_{i,t}^{S_1 I_2 S_3} + \\ & (1 - W_{i,t}^{1,23}) \mu_2 \mu_3 P_{i,t}^{S_1 I_2 I_3} + \\ & \mu_1 (1 - P_{2,i,t}) (1 - P_{3,i,t}) P_{i,t}^{I_1 S_2 S_3} + \\ & \mu_1 (1 - R_{i,t}^{2,3}) \mu_3 P_{i,t}^{I_1 S_2 I_3} + \\ & \mu_1 \mu_2 (1 - P_{3,i,t}) P_{i,t}^{I_1 I_2 S_3} + \mu_1 \mu_2 \mu_3 P_{i,t}^{I_1 I_2 I_3} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} P_{i,t+1}^{I_1 I_2 I_3} = & P_{1,i,t} R_{i,t}^{2,1} W_{i,t}^{3,12} P_{i,t}^{I_1 S_2 S_3} + \\ & R_{i,t}^{1,3} W_{i,t}^{2,13} (1 - \mu_3) P_{i,t}^{S_1 S_2 I_3} + \\ & R_{i,t}^{1,2} (1 - \mu_2) W_{i,t}^{3,12} P_{i,t}^{S_1 I_2 S_3} + \\ & W_{i,t}^{1,23} (1 - \mu_2) (1 - \mu_3) P_{i,t}^{S_1 I_2 I_3} + \\ & (1 - \mu_1) R_{i,t}^{2,1} W_{i,t}^{3,12} P_{i,t}^{I_1 S_2 S_3} + \\ & (1 - \mu_1) W_{i,t}^{2,13} (1 - \mu_3) P_{i,t}^{I_1 S_2 I_3} + \\ & (1 - \mu_1) (1 - \mu_2) W_{i,t}^{3,12} P_{i,t}^{I_1 I_2 S_3} + \\ & (1 - \mu_1) (1 - \mu_2) (1 - \mu_3) P_{i,t}^{I_1 I_2 I_3} \end{aligned} \quad (19)$$

式中: μ_g ($g = 1, 2, 3$) 为用户由 I 态转化为 S 态的概

率,为常量。此外,所有状态下概率之和须为1,即:

$$P_{i,t}^{S_1S_2S_3} + P_{i,t}^{S_1S_2I_3} + P_{i,t}^{S_1I_2S_3} + P_{i,t}^{S_1I_2I_3} + P_{i,t}^{I_1S_2S_3} + P_{i,t}^{I_1S_2I_3} + P_{i,t}^{I_1I_2S_3} + P_{i,t}^{I_1I_2I_3} = 1 \quad (20)$$

迭代求解式(18)、式(19)等8个动态方程,可以跟踪任何初始条件下居民DR参与度的时间演变。此外,还可以求解整个系统的稳定状态,即居民最终的参与度水平。

3.3 居民DR参与度稳定阈值分析

根据马尔可夫决策方程可以求出最终稳定后的静态阈值 ρ ,即居民用户最终稳定后的DR参与度。

$$\rho^{I_1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{i,t}^{I_1S_2S_3} + P_{i,t}^{I_1S_2I_3} + P_{i,t}^{I_1I_2S_3} + P_{i,t}^{I_1I_2I_3}) \quad (21)$$

$$\rho^{I_2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{i,t}^{S_1I_2S_3} + P_{i,t}^{S_1I_2I_3} + P_{i,t}^{I_1I_2S_3} + P_{i,t}^{I_1I_2I_3}) \quad (22)$$

$$\rho^{I_3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{i,t}^{S_1S_2I_3} + P_{i,t}^{S_1I_2I_3} + P_{i,t}^{I_1S_2I_3} + P_{i,t}^{I_1I_2I_3}) \quad (23)$$

$$\rho^{I_1I_2} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{i,t}^{I_1I_2S_3} + P_{i,t}^{I_1I_2I_3}) \quad (24)$$

$$\rho^{I_1I_2I_3} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{i,t}^{I_1I_2I_3} \quad (25)$$

式中: ρ^{I_1} , ρ^{I_2} , ρ^{I_3} 分别为在 G_1 、 G_2 、 G_3 层因素影响下的居民DR参与度; $\rho^{I_1I_2}$ 为在 G_1 、 G_2 层因素共同影响下的居民DR参与度; $\rho^{I_1I_2I_3}$ 为在3层因素共同影响下的居民DR参与度。

为分析马尔可夫决策方程临界阈值,也可通过建立 8×8 型雅可比矩阵 J 对公式进行求导分析。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_{i,t+1}^{S_1S_2I_3}}{\partial P_{j,t}^{S_1S_2I_3}} & \frac{\partial P_{i,t+1}^{S_1S_2I_3}}{\partial P_{j,t}^{S_1I_2S_3}} & \dots & \frac{\partial P_{i,t+1}^{S_1S_2I_3}}{\partial P_{j,t}^{I_1I_2I_3}} \\ \frac{\partial P_{i,t+1}^{S_1S_2I_3}}{\partial P_{j,t}^{S_1I_2S_3}} & \frac{\partial P_{i,t+1}^{S_1S_2I_3}}{\partial P_{j,t}^{I_1S_2S_3}} & \dots & \frac{\partial P_{i,t+1}^{S_1S_2I_3}}{\partial P_{j,t}^{I_1I_2I_3}} \\ \frac{\partial P_{i,t+1}^{S_1I_2S_3}}{\partial P_{j,t}^{S_1S_2I_3}} & \frac{\partial P_{i,t+1}^{S_1I_2S_3}}{\partial P_{j,t}^{S_1I_2S_3}} & \dots & \frac{\partial P_{i,t+1}^{S_1I_2S_3}}{\partial P_{j,t}^{I_1I_2I_3}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_{i,t+1}^{I_1S_2S_3}}{\partial P_{j,t}^{S_1S_2I_3}} & \frac{\partial P_{i,t+1}^{I_1S_2S_3}}{\partial P_{j,t}^{S_1I_2S_3}} & \dots & \frac{\partial P_{i,t+1}^{I_1S_2S_3}}{\partial P_{j,t}^{I_1I_2I_3}} \\ \frac{\partial P_{i,t+1}^{I_1S_2S_3}}{\partial P_{j,t}^{S_1I_2S_3}} & \frac{\partial P_{i,t+1}^{I_1S_2S_3}}{\partial P_{j,t}^{I_1S_2S_3}} & \dots & \frac{\partial P_{i,t+1}^{I_1S_2S_3}}{\partial P_{j,t}^{I_1I_2I_3}} \end{bmatrix} \quad (26)$$

各求导公式遵循以下规则:

$$\frac{\partial P_{i,t+1}^{S_1I_2S_3}}{\partial P_{j,t}^{S_1I_2S_3}} = \begin{cases} \beta_2 \mathbf{B}^T & i \neq j \\ 1 - \mu_2 & i = j \end{cases} \quad (27)$$

式(27)可以写成:

$$\frac{\partial P_{i,t+1}^{S_1I_2S_3}}{\partial P_{j,t}^{S_1I_2S_3}} = \beta_2 \mathbf{B}^T + (1 - \mu_2) \mathbf{I} = \beta_2 \mathbf{B} + (1 - \mu_2) \mathbf{I} \quad (28)$$

$$\beta_2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_{2,i,t} \quad (29)$$

式中: \mathbf{I} 为单位矩阵。其余的求导同理,最终的雅可

比矩阵为:

$$J = \begin{bmatrix} (1 - \mu_3) \mathbf{I} & \mathbf{0} & \dots & \mu \mu_2 (1 - \mu_3) \\ \mathbf{0} & \beta_2 \mathbf{B} + (1 - \mu_2) \mathbf{I} & \dots & \beta_3 \mathbf{B} + \mu_1 (1 - \mu_2) \mu_3 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & (1 - \mu_1) (1 - \mu_2) (1 - \mu_3) \end{bmatrix} \quad (30)$$

式中: $\mathbf{0}$ 为所有元素皆为0的 $N \times N$ 型矩阵。临界阈值满足上述矩阵最大特征值的绝对值小于1,即系统达到稳定状态需要满足:

$$\max \{ |(1 - \mu_3) \mathbf{I}|, |\beta_2 \lambda_B + (1 - \mu_2) \mathbf{I}|, \dots, |(1 - \mu_1) (1 - \mu_2) (1 - \mu_3)| \} < 1 \quad (31)$$

当 $\beta_1/\mu_1 < 1/\lambda_A$, $\beta_2/\mu_2 < 1/\lambda_B$ 时,影响因素不足以对用户产生影响;当 $\beta_1/\mu_1 \geq 1/\lambda_A$, $\beta_2/\mu_2 \geq 1/\lambda_B$ 时,转移概率才可能偏离0,影响因素才会对用户产生一定影响,其中 λ_A , λ_B 分别为邻接矩阵 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 的最大特征值。由此可以作为某一影响因素是否可以纳入影响用户DR决策因素判断依据。

4 仿真结果分析

选取含有1000户的某居民小区作为研究对象,随机生成一个包含3个不同拓扑结构的网络,其中 $N=1000$ 。初始情况下以每层大部分节点为 S 态,极少数节点为 I 态为原则,给出了居民用户在不同状态下的概率初值,如表2所示。

表2 居民用户初始概率值

Table 2 Initial probability values of residential users

用户状态	概率	用户状态	概率
$S_1S_2S_3$	0.995	$S_1I_2I_3$	0.002
$S_1S_2I_3$	0.003	$I_1S_2I_3$	0.002
$S_1I_2S_3$	0.003	$I_1I_2S_3$	0.002
$I_1S_2S_3$	0.003	$I_1I_2I_3$	0

4.1 用户参与度演化分析

为探究在DR项目实施过程中用户参与度的演化过程,先对用户在单一因素影响下的参与情况进行分析,分别得到了 ρ^{I_1} , ρ^{I_2} , ρ^{I_3} 的演化趋势,如图6所示。 ρ^{I_1} , ρ^{I_2} , ρ^{I_3} 的演化趋势相似,在DR项目实施前期用户参与度较低,随着DR进程的不断推进,参与度开始上升最终达到稳定。说明3层因素均能对居民决策行为产生影响,改变决策进程。

以 ρ^{I_1} , ρ^{I_2} , $\rho^{I_1I_2I_3}$ 为例,对比单一因素、2层、3层因素共同影响下的演化趋势,如图7所示。从 ρ^{I_1} 的演化趋势可以看出用户在社交关系影响下用户参与度不断上升,最终稳定在0.87左右;从 $\rho^{I_1I_2}$ 的演化趋势可以看出用户在社交关系和用电相似度因素共同作用下的用户参与度不断上升,最终稳定

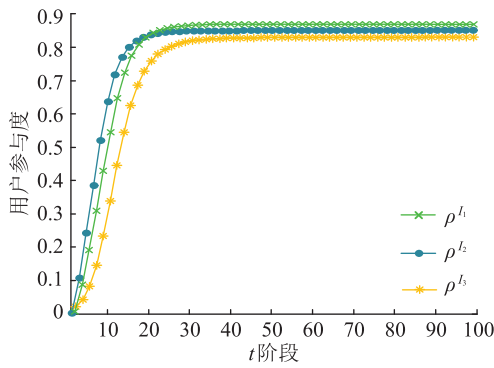


图6 $\rho^{I1}, \rho^{I2}, \rho^{I3}$ 的演化趋势
Fig.6 Evolution trend of $\rho^{I1}, \rho^{I2}, \rho^{I3}$

在 0.84 左右; $\rho^{I1/I2/I3}$ 为用户在 3 层因素共同影响下的 DR 参与度,最终稳定在 0.79 左右。由此可以看出,用户在单一因素影响下的参与度最高,在 3 层因素共同影响下的参与度最低。说明用户决策受众多因素影响时,当受其中某一因素影响不参与 DR 时,用户最终可能会退出响应,使得整体的参与度下降,而这也是现实生活中居民参与水平较低的一个重要原因。

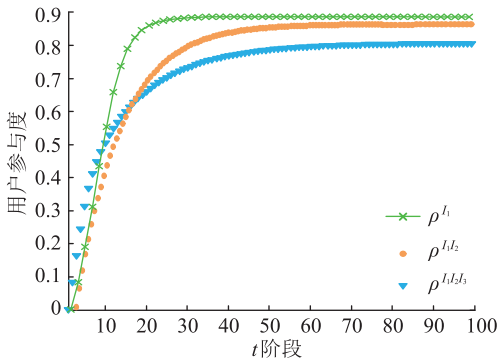


图7 $\rho^{I1}, \rho^{I1I2}, \rho^{I1I2I3}$ 的演化趋势
Fig.7 Evolution trend of $\rho^{I1}, \rho^{I1I2}, \rho^{I1I2I3}$

4.2 3层因素对居民决策的影响程度

由于影响系数 α 能够反映不同因素之间的相互影响程度,通过不同的取值可以划分出 4 个场景。场景一:各影响因素之间互不干扰,即 $\alpha_{mn} = 1 (\forall m, n = 1, 2, 3 \text{ 且 } m \neq n)$; 场景二:其他因素对社交关系的影响具有促进作用,即 $\alpha_{1n} > 1 (n = 2, 3)$; 场景三:其他因素对用电相似度的影响具有促进作用,即 $\alpha_{2n} > 1 (n = 1, 3)$; 场景四:其他因素对用户自身意愿的影响具有促进作用,即 $\alpha_{3n} > 1 (n = 1, 2)$ 。场景一中 $\alpha_{mn} = 1$; 场景二中 $\alpha_{12} = \alpha_{13} = 1.5, \alpha_{21} = \alpha_{23} = \alpha_{31} = \alpha_{32} = 1$; 场景三中 $\alpha_{21} = \alpha_{23} = 1.5, \alpha_{12} = \alpha_{13} = \alpha_{31} = \alpha_{32} = 1$; 场景四中 $\alpha_{31} = \alpha_{32} = 1.5, \alpha_{12} = \alpha_{13} = \alpha_{21} = \alpha_{23} = 1$ 。

图 8 比较了在社交关系影响下 4 个场景中用户参与度的变化情况。由于用户受社交关系影响程

度的范围为 $[0, 1]$, 为便于描述, 将其划分为 5 个等级, 即等级 1 为 $[0, 0.2]$ 、等级 2 中为 $(0.2, 0.4]$ 、等级 3 为 $(0.4, 0.6]$ 、等级 4 为 $(0.6, 0.8]$ 、等级 5 为 $(0.8, 1]$, 分别研究用户影响程度在 5 个等级下的参与情况。在其他影响因素恒定的情况下, 可以看出当影响等级较低时群体最终参与 DR 的概率较低。随着影响等级升高, 用户参与度不断上升, 但场景二中用户受到其他因素对社交关系影响程度的促进作用, 其参与度会略高于其他场景。说明用户在社交关系的影响下, 群体内的影响程度越高, 最终稳定后的用户参与度就会越大。

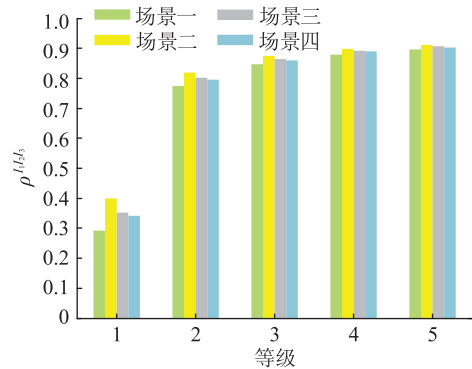


图8 社交关系对用户参与度的影响

Fig.8 Impact of social connections on user participation

图 9 给出了 4 个场景中用户参与度随用电相似度的变化情况, 可以看出场景三中用户对相似度变化的敏感程度更大, 其他 3 个场景中用户参与度的变化趋势相似, 且不论在哪一个场景中, 用户参与度都会随相似度升高而增加。说明用户在用电相似度的影响下, 群体内的用电相似度越高, 最终稳定后的用户参与度就会越大。

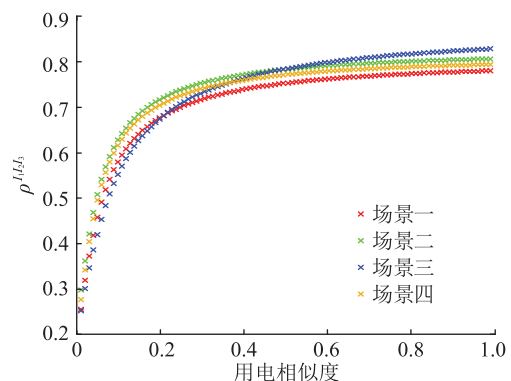


图9 用电相似度对用户参与度的影响

Fig.9 Impact of power consumption similarity on user participation

图 10 分析了在自身意愿影响下 4 个场景中用户参与度的变化情况。对照场景一, 可以看出场景四的用户受自身意愿的影响最大, 用户参与度最

高;场景二和场景三的用户受自身意愿的影响相同,用户参与度变化趋势差别不大。4个场景的用户参与度总体呈上升趋势,说明用户自身意愿越高,最终选择参与 DR 的概率越大。

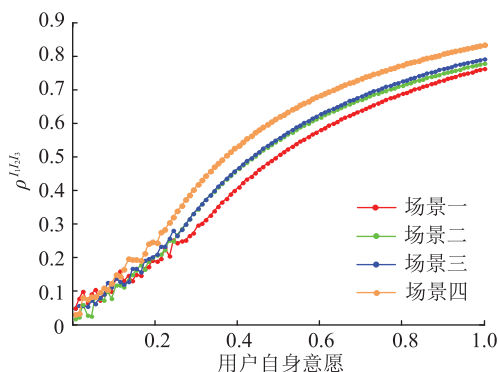


图 10 用户自身意愿对用户参与度的影响

Fig.10 Impact of user intention on user participation

4.3 3层因素与参与度的影响性

为定量分析各影响因素对居民参与度影响性的强弱,引入皮尔逊相关系数 r ,具体公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})(Z_i - \bar{Z})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (Z_i - \bar{Z})^2}} \quad (32)$$

式中: Y_i 为用户 i 相应的影响因素; \bar{Y} 为相应影响因素的平均值; Z_i 为用户 i 最终选择参与 DR 的概率; \bar{Z} 为所有用户参与 DR 的平均概率。

以场景一为例,利用式(32)计算出3层因素与用户参与度 $\rho^{1/2/3}$ 之间的相关系数,以此来反映各影响因素对用户参与度影响性的强弱。影响因素与用户参与度的相关系数越大,说明该因素对用户参与度的影响越强。 G_1 、 G_2 、 G_3 层因素对用户参与度的影响强度分别为 0.746 6、0.663 9 和 0.836 2,其中用户自身意愿对用户参与度的影响最强,因用户意愿受补偿价格影响,通过调整补偿价格来提升居民响应强度的效果更明显,因此在制定 DR 策略时应重点考虑补偿电价的变化。

为探究不同因素间的相互作用,分别对 α 取不同数值,分析各因素间存在正面影响、负面影响以及互不干扰 3 种模式下用户参与度的变化情况,如图 11 所示。当取 $\alpha_{mn} = 1.5$ 时各因素间存在正面影响,此时用户参与度最高,收敛时间最快;当取 $\alpha_{mn} = 1$ 时各因素间互不干扰,在这种情况下用户参与度较高,收敛时间较快;当取 $\alpha_{mn} = 0.5$ 时各因素间存在负面影响,此时用户参与度最低,收敛时间最慢。

将 2 层影响系数结合,观察在 2 层因素共同作

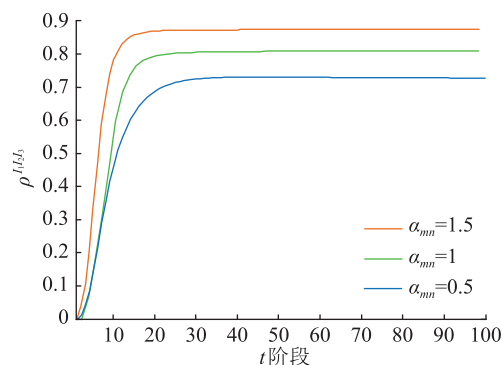


图 11 在不同 α 取值下用户参与度的变化趋势

Fig.11 Trend of user participation at different values of α

用下不同影响系数的取值对用户参与度的影响。此处以 G_1 层和 G_2 层为例,如图 12 所示。用户参与度随着 α_{12} 和 α_{21} 的增加而增加,当 α_{12} 和 α_{21} 达到最大值时,用户参与度最高;当 α_{12} 和 α_{21} 达到最小值时,用户参与度最低。

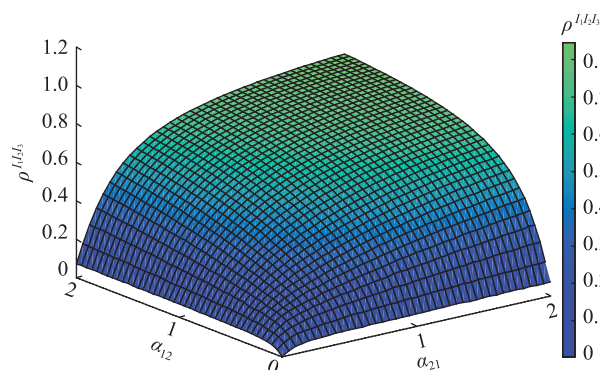


图 12 α_{12} 和 α_{21} 的共同作用对用户参与度的影响

Fig.12 Combined effect of α_{12} and α_{21} on user participation

结合图 11、图 12,说明不同因素间的相互作用会影响用户决策进程,当各因素间存在正面影响时,因素间的相互作用会促进用户决策,缩短收敛时间,快速达到稳定状态,提高居民整体的参与水平。

5 结论

文中对居民用户行为进行分析,提出了一种计及多重影响因素的居民 DR 行为分析方法,该方法可以分析 DR 进程中居民状态的动态变化并对 DR 复杂的变化过程进行描述。主要结论如下:

(1) 在多种因素的共同影响下,用户参与度会存在一定程度的下降且不同因素间的交互作用会影响居民的参与水平。

(2) 用户间的社交关系、用电属性以及自身意愿等均会对居民 DR 参与度产生影响。从用户层面

来说,居民间的社交关系影响程度和用电相似度越高,就越有利于调动居民参与 DR 的积极性,提升整体参与水平;从电网层面来说,通过实时调整适合的 DR 补偿电价,可以有效提升居民参与意愿,提高用户参与度。

本文得到江苏省高等学校自然科学研究面上项目“居民需求响应有限理性决策及长期演化特性研究”(20KJB470024)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 王毅,张宁,康重庆,等. 电力用户行为模型:基本概念与研究框架[J]. 电工技术学报,2019,34(10):2056-2068.
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Electrical consumer behavior model: basic concept and research framework [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(10):2056-2068.
- [2] 黄晓明,史守圆,余涛. 考虑智能家居平台自动需求响应的微电网运行优化策略[J]. 电力信息与通信技术,2021,19(8):1-9.
HUANG Xiaoming, SHI Shouyuan, YU Tao. Optimal operation strategy of microgrid considering the participation of smart home platform in demand response [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021, 19(8):1-9.
- [3] 王彩霞,时智勇,梁志峰,等. 新能源为主体电力系统的需求侧资源利用关键技术及展望[J]. 电力系统自动化,2021,45(16):37-48.
WANG Caixia, SHI Zhiyong, LIANG Zhifeng, et al. Key technologies and prospects of demand-side resource utilization for power systems dominated by renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16):37-48.
- [4] 刘晓峰,高丙团,罗京,等. 基于非合作博弈的居民负荷分层调度模型[J]. 电力系统自动化,2017,41(14):54-60.
LIU Xiaofeng, GAO Bingtuan, LUO Jing, et al. Non-cooperative game based hierarchical dispatch model of residential loads [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14):54-60.
- [5] 李晨希,史佳琪,刘念,等. 基于复杂网络的电力用户群体演化分析模型[J]. 中国电机工程学报,2022,42(16):5835-5847,6160.
LI Chenxi, SHI Jiaqi, LIU Nian, et al. Analysis model of power user group evolution based on complex network [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16):5835-5847, 6160.
- [6] 张潼,于鹤洋,田江,等. 基于非侵入式负荷辨识的聚合负荷需求响应能力在线评估[J]. 电力工程技术,2020,39(6):19-25,65.
ZHANG Tong, YU Heyang, TIAN Jiang, et al. Online aggregation monitoring of low-voltage power load demand response capability based on non-intrusive load identification [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6):19-25, 65.
- [7] 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/OL]. 电测与仪表:1-9[2022-9-13]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20201217.1641.003.html>.
- [8] 孙毅,胡亚杰,郑顺林,等. 考虑用户响应特性的综合需求响应优化激励策略[J]. 中国电机工程学报,2022,42(4):1402-1413.
SUN Yi, HU Yajie, ZHENG Shunlin, et al. Integrated demand response optimization incentive strategy considering users' response characteristics [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4):1402-1413.
- [9] 涂京,周明,宋旭帆,等. 居民用户参与电网调峰激励机制及优化用电策略研究[J]. 电网技术,2019,43(2):443-453.
TU Jing, ZHOU Ming, SONG Xufan, et al. Research on incentive mechanism and optimal power consumption strategy for residential users' participation in peak shaving of power grid [J]. Power System Technology, 2019, 43(2):443-453.
- [10] 齐先军,程桥,吴红斌,等. 激励型需求响应对配电网运行可靠性的影响[J]. 电工技术学报,2018,33(22):5319-5326.
QI Xianjun, CHENG Qiao, WU Hongbin, et al. Impact of incentive-based demand response on operational reliability of distribution network [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22):5319-5326.
- [11] 彭一海,刘继春,刘俊勇. 两级电力市场环境下考虑多类型零售套餐的售电公司购售电策略[J]. 电网技术,2022,46(3):944-957.
PENG Yihai, LIU Jichun, LIU Junyong. Electricity purchasing and selling strategies for electricity retailers considering multiple types of retail packages in two level electricity market [J]. Power System Technology, 2022, 46(3):944-957.
- [12] 李章允,王钢,汪隆君,等. 居民负荷需求响应参与度的物理影响因素分析[J]. 电气自动化,2017,39(6):42-46.
LI Zhangyun, WANG Gang, WANG Longjun, et al. Analysis on physical influence factors of demand response engagement of residential load [J]. Electrical Automation, 2017, 39(6):42-46.
- [13] 郑若楠,李志浩,唐雅洁,等. 考虑居民用户参与度不确定性的激励型需求响应模型与评估[J]. 电力系统自动化,2022,46(8):154-162.
ZHENG Ruonan, LI Zhihao, TANG Yajie, et al. Incentive demand response model and evaluation considering uncertainty of residential customer participation degree [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8):154-162.
- [14] 彭文昊,陆俊,冯勇军,等. 计及用户参与不确定性的需求响应策略优化方法[J]. 电网技术,2018,42(5):1588-1594.
PENG Wenhao, LU Jun, FENG Yongjun, et al. A demand response strategy optimization considering user participation uncertainty [J]. Power System Technology, 2018, 42(5):1588-1594.

- [15] 孙伟卿,郑钰琦,薛贵挺. 考虑响应率差异的需求响应交易机制设计与效果分析[J]. 电力系统自动化,2021,45(22):83-94.
SUN Weiqing,ZHENG Yuqi,XUE Guiting. Design and effect analysis of demand response transaction mechanism considering response rate difference[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(22):83-94.
- [16] 杨伟宏,秦阳,吴兵兵. 环境感知的新冠肺炎传播态势的建模与分析[J]. 计算机应用研究,2021,38(7):2077-2080.
YANG Weihong,QIN Yang,WU Bingbing. Modeling and analysis of environment-aware COVID-19 transmission[J]. Application Research of Computers,2021,38(7):2077-2080.
- [17] 李顺昕,远振海,丁健民,等. 基于聚类的用户用电行为及其影响因素分析[J]. 电力需求侧管理,2019,21(3):53-58.
LI Shunxin,YUAN Zhenhai,DING Jianmin, et al. Analysis of users' electricity behavior and influencing factors based on clustering [J]. Power Demand Side Management, 2019, 21 (3):53-58.
- [18] 赵天辉,张耀,王建学. 基于空间密度聚类 and 异常数据域的负荷异常值识别方法[J]. 电力系统自动化,2021,45(10):97-105.
ZHAO Tianhui,ZHANG Yao,WANG Jianxue. Identification method of load outlier based on density-based spatial clustering and outlier boundaries[J]. Automation of Electric Power Systems,2021,45(10):97-105.
- [19] 刘伟,仰文林,赵选宗,等. 基于多特征向量效益评估的电力交易评价模型的研究[J]. 电子设计工程,2021,29(5):169-173.
LIU Wei,YANG Wenlin,ZHAO Xuanzong, et al. Research on evaluation model of electric power transaction based on multi eigenvector benefit evaluation[J]. Electronic Design Engineering,2021,29(5):169-173.
- [20] 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.
ZHANG Jie,SUN Weiqing,LIU Wei. Real time pricing considering demand response revenue of electricity sellers [J]. Power System Technology,2022,46(2):492-504.
- [21] 曹昉,李欣宁,刘思佳,等. 基于消费者参考价格决策及用户黏性的售电套餐优化[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 Systems,2018,42(14):67-74.
- [22] 高锋阳,袁成,李昭君,等. 近似贝叶斯计算结合马尔科夫链蒙特卡洛的概率潮流计算[J]. 太阳能学报,2021,42(11):265-272.
GAO Fengyang,YUAN Cheng,LI Zhaojun, et al. Probabilistic load flow method using approximate Bayesian computation and Markov chain Monte Carlo[J]. Acta Energeiae Solaris Sinica, 2021,42(11):265-272.
- [23] LI Q,WANG Z,WU B, et al. Competition and cooperation; dynamical interplay diffusion between social topic multiple messages in multiplex networks[J]. IEEE Transactions on Computational Social Systems,2019,6(3):467-478.

作者简介:



刘晓峰

刘晓峰(1991),男,博士,讲师,研究方向为需求侧管理和智能配用电等(E-mail:liu-xiaofeng@njnu.edu.cn);

陈雪颖(1997),女,硕士在读,研究方向为需求侧管理;

柏颖(1996),女,硕士在读,研究方向为电力市场。

Analysis of residents' demand response behavior considering multiple influencing factors

LIU Xiaofeng, CHEN Xueying, BAI Ying, WANG Wei

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: The implementation of residents' demand response (DR) is of great importance in achieving energy conservation and emission reduction. In order to further promote residents' DR and investigate the influence of various factors on DR participation, an approach for analyzing residents' DR behavior that considers multiple influencing factors is proposed in this paper. Firstly, a multi-factor influence model is developed based on the main influencing factors, namely social relationships, attribute influence and their own willingness. Secondly, based on the interaction among the three levels of factors and the Markov property of decision-making process, Markov decision equations are established for residents' DR, which are applied to analyze the characteristics of DR behavior at different stages. Finally, the influence of each factor on DR behavior is quantified through case study. The results show that the participation of residents in DR considering multiple influencing factors is lower than the participation influenced by one factor. Moreover, the interaction among different factors can also lead to the changes in residential participation.

Keywords: residents' demand response; participation; decision-making behavior of residents; multiple influencing factors; behavioral characteristics of residents; Markov decision equation

(编辑 陆海霞)