

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210975

## 面向多用户的多时间尺度电力套餐与家庭能量优化策略

傅质馨<sup>1,2</sup>, 李紫嫣<sup>1,2</sup>, 朱俊澎<sup>1,2</sup>, 袁越<sup>1,2</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 河海大学可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 江苏 南京 211100)

**摘要:** 在智能互联网环境下, 居民用户参与需求响应时的不确定因素对家庭能量管理调度策略的实施效果存在较大影响。为此, 提出了一种计及用户响应不确定性的多时间尺度可变电价套餐和用电策略。首先, 明确多时段可变电价套餐的定义, 基于价格型和激励型响应不确定性机理构建电力套餐的模型, 并建立完成聚类后的多用户与电网的模型。其次, 通过求解基于多用户和电网的非合作和合作博弈模型, 获得最优的电价方案和日前优化计划。然后, 根据需求响应信息和用户用电安排建立日内滚动优化模型, 获得局部动态分时电价和日内调度计划。最后, 根据用户实际响应偏差建立实时调整模型, 获得动态激励和实时用电计划。以多家庭用户调度组为例进行仿真分析, 通过比较不同模型优化结果, 验证了考虑用户响应不确定性的电力套餐及多时间尺度协调优化的有效性。

**关键词:** 需求响应; 家庭能量管理; 多时间尺度; 电力套餐; 不确定性; 博弈模型

### Multi-user multi-timescale power packages and home energy optimization strategies

FU Zhixin<sup>1,2</sup>, LI Ziyang<sup>1,2</sup>, ZHU Junpeng<sup>1,2</sup>, YUAN Yue<sup>1,2</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering of Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** In the smart internet, the response uncertainty of residential users has a great influence on the implementation of a home energy management strategy. A multi-time variable electric price package and electricity consumption strategy are proposed considering the response uncertainty. First, the multi-time power package is defined, and the power package model is built by a price-based and an incentive-based uncertainty mechanism. The model of multi-user after clustering and grid are established. Secondly, by analyzing cooperative and non-cooperative game models based on multi-user and the grid, an optimal electric price and day-ahead plan are obtained. Then, according to the response demand and users' electricity consumption management, a rolling intraday optimization model is established, and the local dynamic TOU and intraday scheduling plan are obtained. Finally, a real-time model is established according to the actual response deviation to obtain dynamic excitation and a real-time electricity use plan. Taking a multi-home user dispatching group as an example, simulation and analysis are carried out. By comparing the optimization results of different models, the effectiveness of the power package and multi-time scale optimization strategy considering the response uncertainty is verified.

This work is supported by the Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51807051).

**Key words:** demand response; home energy management; multi-time scales; price package; uncertainty; game model

## 0 引言

需求响应(Demand Response, DR)是电网框架下实现需求侧与供应侧的一种互动形式<sup>[1]</sup>。在需求

侧响应相关技术研究上, 我国起步较晚, 已开始在试点城市(如上海、北京、佛山等地)建设各自的 DR 资源库, 因地制宜采用不同的实施方式<sup>[2]</sup>。在需求响应的研究及实践中, 重点在于分析总结用户的用电习惯特性, 并指导制定科学合理的需求响应策略<sup>[3]</sup>。

居民负荷作为需求侧的重要组成部分, 具有资

基金项目: 国家自然科学基金青年项目资助(51807051); 江苏省自然科学基金青年项目资助(BK20180507)

源分散、用电效率低下的特点,但其用电时段集中、基数大<sup>[4]</sup>,有着巨大的需求响应潜力<sup>[5-6]</sup>。在家庭能量管理系统(Home Energy Management System, HEMS)中,居民自主参与需求响应项目的同时合理安排用电计划<sup>[7]</sup>。

目前,针对工商业领域的需求响应策略已有深入的研究和广泛的应用,并在相关研究中提出了电价激励响应<sup>[8]</sup>、用户能耗<sup>[9]</sup>等模型。而关于居民侧需求响应管理的研究分析较少,主要针对需求响应电价和激励机制的制定进行研究。文献[10]指出在居民侧尖峰电价的指引信号比电价折扣更强烈。文献[11-12]考虑用户用电特征,制定了能够反映电力需求的可变电价。文献[13-14]提出了引导居民完成响应目标,实现削峰填谷的激励机制。然而上述文献均未考虑到居民用户响应的不确定性。文献[15-16]分别考虑了用户参与电网的不确定性和响应程度的不确定性,文献[15]建立多种柔性负荷响应模型,文献[16]考虑到可再生能源和居民行为的不确定性,引入疲劳指数来保证居民的满意度。但对不确定性的研究分析并不全面,落脚点主要集中在分布式能源接入、用户参与响应、响应程度不足的不确定性,现有文献未考虑到居民用户响应过度的情况。

在面向需求响应的家庭能量优化调度策略方面,文献[17]指出当收到需求响应事件(Demand Response Event, DRE)请求时,用户需要主动地转移高峰负荷,建立了包含分布式光伏的多时间尺度家庭能量管理模型。文献[18-19]对含柔性负荷的智能小区建模,以减少居民用电费用和降低负荷峰值为目标,合理调度柔性负荷的使用。文献[20]的主要贡献是在实时能源价格方案下应用北极熊优化方法解决家庭能源管理系统中需求响应型电器的调度问题。以上文献主要研究居民用户参与电网需求响应的优化策略,本文考虑在给出负荷调度策略的同时深入研究和分析电价或激励与用户用电行为的关系。

因此,本文建立电价差和负荷转移率的不确定性模型、可中断负荷补偿和响应度的不确定性模型,先后从价格型和激励型 DR 两个角度分析居民负荷在实际响应中的不确定性,将可转移负荷、温控负荷和 DRE 信息在三个时间尺度上协调优化,给出计及不确定性的多时间尺度可变电力套餐和家庭优化调度策略。

## 1 问题提出及模型建立

### 1.1 多时间尺度可变电力套餐定义及问题提出

传统的电力套餐<sup>[21]</sup>包含分时电价和静态激励机制,多时间尺度<sup>[22]</sup>可变电力套餐采用的是局部动

态分时电价和动态激励。只采用日前调度无法处理临时发布的 DRE 信息,进行日内调度时,可计划响应 DRE 的程度及具体的响应安排<sup>[23]</sup>。考虑到用户实际响应时存在响应不足或过度的情况,再进行实时调度以校正用户的响应程度。制定规则如下所述。

1) 进行日前调度计划。根据多用户与电网的博弈模型,得到每个用户设备使用时间的最优解,并作为后续可变电力套餐的基准值;对居民用户的日负荷曲线进行聚类分析,按比例选取每类典型家庭组成多用户联合调度组。多用户联合调度组表示为  $\{A_1, A_2, L, A_{N_1}, B_1, B_2, L, B_{N_2}, C_1, C_2, L, C_{N_3}, D_1, D_2, L, D_{N_4}\}$ , 用户数量为  $N = N_1 + N_2 + N_3 + N_4$ 。由于四类用户相互独立,因此以 A 类用户为例建模, B、C、D 类用户与 A 类用户的模型相同。

2) 进行日内调度计划。考虑 DRE 信息和用户用电安排,在第一步基准值的基础上,采用价格型需求响应不确定性模型,在响应电网 DRE 信息时段,设置局部动态电价。以峰谷时段负荷转移情况为例进行分析,如图 1 所示。

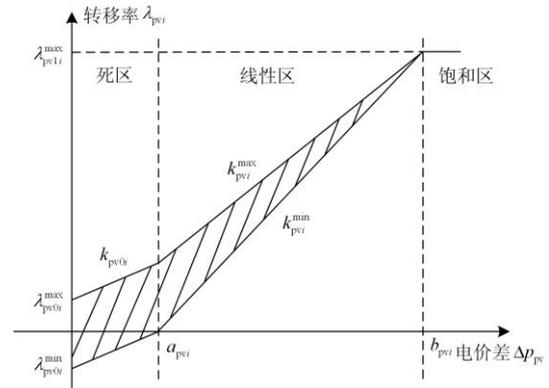


图 1 价格型需求响应不确定机理

Fig. 1 Uncertainty mechanism of price-based demand response

从峰时段向谷时段转移负荷称为正向转移,反之称为反向转移。图 1 为用户  $i$  的峰谷时段的负荷转移情况,其中:  $\Delta p_{pv}$  为峰谷电价差;  $\lambda_{pvi}$  为峰谷电量转移率,即负荷转移量与峰时段平均负荷之比;  $k_{pvi}^{\max}$  和  $k_{pvi}^{\min}$  分别为峰谷转移曲线积极响应斜率和消极响应斜率,如式(1)、式(2)所示;  $k_{pvi}^0$  为死区内时响应曲线的斜率,满足  $k_{pvi}^0 < k_{pvi}^{\min}$ ;  $a_{pvi}$  为转移率均大于等于 0 时临界电价差; 转移率逐渐趋于饱和时的电价差为  $b_{pvi}$ ;  $\lambda_{pvi}^{\max}$  和  $\lambda_{pvi}^{\min}$  分别为无电价差时正向负荷转移率的最大值和反向负荷转移率的最小值;  $\lambda_{pvi}^{\max}$  为用户  $i$  的最大峰谷负荷转移率。

$$k_{pvi}^{\max} = \begin{cases} \lambda_{pv0i}^{\max} + k_{pv0i} \Delta p_{pv} & 0 \leq \Delta p_{pv} < a_{pvi} \\ k_{pvi}^{\max} (\Delta p_{pv} - a_{pvi}) + \lambda_{pv0i}^{\max} + k_{pv0i} a_{pvi} & a_{pvi} \leq \Delta p_{pv} < b_{pvi} \\ \lambda_{pv1i}^{\max} & \Delta p_{pv} \geq b_{pvi} \end{cases} \quad (1)$$

$$k_{pvi}^{\min} = \begin{cases} \lambda_{pv0i}^{\min} + k_{pv0i} \Delta p_{pv} & 0 \leq \Delta p_{pv} < a_{pvi} \\ k_{pvi}^{\min} \Delta p_{pv} & a_{pvi} \leq \Delta p_{pv} < b_{pvi} \\ \lambda_{pv1i}^{\max} & \Delta p_{pv} \geq b_{pvi} \end{cases} \quad (2)$$

可采用相同方法确定用户  $i$  峰平时段、平谷时段的用电转移率  $\lambda_{pfi}$  和  $\lambda_{tvi}$ , 拟合各时段负荷如式(3)所示。

$$L_i^t = \begin{cases} L_{t0}^t - \lambda_{pfi} L_{pfi0}^{av} - \lambda_{tvi} L_{tvi0}^{av}, & t \in T_p \\ L_{t0}^t + \lambda_{pfi} L_{pfi0}^{av} - \lambda_{tvi} L_{tvi0}^{av}, & t \in T_f \\ L_{t0}^t + \lambda_{pvi} L_{pvi0}^{av} + \lambda_{tvi} L_{tvi0}^{av}, & t \in T_v \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $L_i^t$  和  $L_{t0}^t$  分别为  $t$  时段用户  $i$  实施局部动态电价前后各时段的负荷;  $L_{pfi0}^{av}$  和  $L_{tvi0}^{av}$  分别为用户  $i$  实施局部动态电价前在峰时段和平时段的平均负荷;  $T_p$ 、 $T_f$  和  $T_v$  分别表示划分的峰谷平时段。

在需求响应时段, 采用固定峰谷比和平时段电价扩大峰谷电价差的电价制定方法, 为避免出现峰谷倒置的现象, 应满足式(4)。

$$\frac{Q_v}{Q_p} \leq 1 \quad (4)$$

式中,  $Q_v$  和  $Q_p$  分别为谷时段和峰时段的用电总量。

3) 进行实时调度计划。考虑用户参与电网需求响应的不确定性, 在 2) 动态分时电价的基础上增加动态的可中断负荷补偿。根据用户实际削减的用电功率与 DRE 要求产生功率偏差, 调整激励水平。

目前普遍采用只考虑响应不足的激励型需求响应不确定模型, 本文在此基础上进一步补充完善了该模型关于响应过度的部分。响应不足时会影响电网运行的稳定性, 但也要考虑到响应过度的情况, 响应过度会直接大幅降低用户的舒适度, 甚至有可能打击响应的积极性。如图 2 所示, 图中右半部分描绘的是针对用户响应不足, 增加激励后的可调度负荷响应特性曲线。左半部分描绘的是针对用户响应过度时减少激励后的可调度负荷响应特性曲线。负的电价激励可视作用户响应过度时的惩罚机制, 为了便于后续的讨论和研究, 假设惩罚机制的参数绝对值和正电价激励的参数相同, 即将图 2 的右半部分图逆时针旋转 180°, 得到左半部分图。

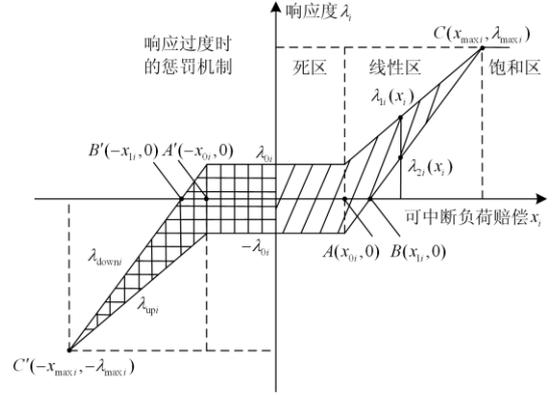


图 2 闪电激励型需求响应不确定机理

Fig. 2 Uncertainty mechanism of lightning stimulated-based demand response

图 2 为用户  $i$  受到激励时的负荷响应情况, 图中:  $\lambda_{0i}$  为处于响应死区的响应度;  $x_{0i}$  为启动电价; 即处于线性区的最低激励水平;  $x_{li}$  为响应度不低于零的临界电价激励值;  $x_{maxi}$  为使用户响应度达到上限的饱和激励;  $\lambda_{upi}$  和  $\lambda_{downi}$  表示用户  $i$  受到电价激励后曲线积极响应斜率和消极响应斜率。

在激励水平  $x$  下, 用户  $i$  的积极响应斜率和消极响应斜率可分别表示为

$$\lambda_{upi} = \begin{cases} \lambda_{0i} & 0 \leq x < x_{0i} \\ \lambda_{maxi} \frac{x - x_{0i}}{x_{maxi} - x_{0i}} + \lambda_{0i} & x_{0i} \leq x < x_{maxi} \\ \lambda_{maxi} & x \geq x_{maxi} \end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda_{downi} = \begin{cases} -\lambda_{0i} & 0 \leq x < x_{li} \\ (x - x_{li}) \frac{\lambda_{maxi}}{x_{maxi} - x_{li}} & x_{li} \leq x < x_{maxi} \\ \lambda_{maxi} & x \geq x_{maxi} \end{cases} \quad (6)$$

如图 2 所示, 在电价激励  $x$  下, 用户响应度  $\lambda_i$  的波动范围是  $[\lambda_{li}(x), \lambda_{ui}(x)]$ , 用均匀分布描述用户响应不确定行为, 如式(7)所示。

$$\lambda_i(x) : U[\lambda_{ui}(x), \lambda_{li}(x)] \quad (7)$$

不同类型用户的  $x_{0i}$ 、 $x_{li}$  和  $x_{maxi}$  取不同的值, 对于  $n$  个用户, 总体的响应度  $\lambda(x)$  可表示为

$$\lambda(x) = \frac{\sum_{i=1}^n P_{Ri} \lambda_i(x)}{\sum_{i=1}^n P_{Ri}} \quad (8)$$

式中,  $P_{Ri}$  为用户  $i$  的可调度负荷的容量。

## 1.2 基于可调度设备的多用户满意度及收益模型

家庭用户中的设备可分为不可调整负荷(如电

视、电脑等)、可转移或中断负荷、温控负荷。可转移或中断负荷与温控负荷合称为家庭用户的可调整负荷,能够参与优化调度<sup>[24]</sup>。本文对这两类设备进行满意度建模,用户的实际收益为效用减去支付。

### 1) 效用函数

效用函数的值用于衡量用户使用从电力公司获得的电能的满意度。

#### (1) 可转移、可中断设备

用户  $i(i \in [1, N_i])$  的设备  $e$  在时段  $t \in T$  上的满意度为

$$u_{i,e}^t(x_{i,e}^t) = w_{i,e}(t)(\omega_{i,e}^t x_{i,e}^t + \alpha_{i,e}) \quad (9)$$

式中:  $\omega_{i,e}^t$  表示满意度与用电量之间的数量关系;

$x_{i,e}^t$  表示用户  $i$  的一个设备  $e$  在时段  $t \in T$  上的用电量,  $i \in N_i$ ;  $\alpha_{i,e}$  表示工作时间内的固定满意度;为了根据用户期望用电时间区分用户类别,定义  $w_{i,e}(t)$  为期望因子,设定有效工作时间,在有效工作时间内设定用户期望用电时间,通过描述期望用电时间的改变来反映用户用电习惯的不同。

$$w_{i,e}(t) = \exp\left(\frac{\left|t_{i,e}^{w-st} - t_{i,e}^{w-end}\right| - \left|t_{i,e}^{w-st} - t\right| - \left|t - t_{i,e}^{w-end}\right|}{\sigma}\right) \quad (10)$$

式中:  $t_{i,e}^{w-st}$  表示用户  $i$  期望设备  $e$  运行的第一个工作时段;  $t_{i,e}^{w-end}$  表示用户  $i$  期望设备  $e$  的最后一个工作时段,并且满足  $t_{i,e}^{w-st} \geq t_{i,e}^{st}$  和  $t_{i,e}^{w-end} \leq t_{i,e}^{end}$ ;  $\sigma$  是一个事先确定的参数,用于调节期望因子。

#### (2) 温控设备

本节温控负荷以热水器和空调为例,并对其满意度进行建模。

##### ① 热水器

热水器在  $t+1$  时刻各个工作状态的水温  $T_{W,t+1}$  如式(11)~式(14)所示,假设热水器水箱内各处的水温相同,且不考虑热水器的具体模型。

$$T_{W,t+1} = T_{W,t} - T_{dis}(0), \quad S_{use,t} = 0, \quad S_{H,t} = 0 \quad (11)$$

$$T_{W,t+1} = T_{W,t} - T_{dis}(1), \quad S_{use,t} = 1, \quad S_{H,t} = 0 \quad (12)$$

$$T_{W,t+1} = T_{W,t} - T_{dis}(0) + kP_H, \quad S_{use,t} = 0, \quad S_{H,t} = 1 \quad (13)$$

$$T_{W,t+1} = T_{W,t} - T_{dis}(1) + kP_H, \quad S_{use,t} = 1, \quad S_{H,t} = 1 \quad (14)$$

式中:在  $[t, t+1]$  时段,  $S_{use,t}$  表示用户的用水状态,  $S_{use,t} = 0$  表示用户未使用热水,  $S_{use,t} = 1$  时表示用户使用热水;  $S_{H,t}$  表示热水器的运行状态,  $S_{H,t} = 0$  表示热水器不工作,  $S_{H,t} = 1$  表示热水器正在运行;当未使用热水和正使用热水时,水温每分钟分别降低  $T_{dis}(0)$ ,  $T_{dis}(1)$ ;  $k$  为热水器开启时单位时间功率水

温升高的温度,  $^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1} \text{kW}^{-1}$ ;  $P_H$  为热水器额定功率。

热水器的温度偏差指数越大,表示水温越偏离最高水温,则应当优先开启热水器使水升温,其温度偏差指数  $K_{WH,t}$  如式(15)所示。

$$K_{WH,t} = \frac{T_{Wmax} - T_{W,t}}{T_{Wmax} - T_{Wmin}} \quad (15)$$

式中:  $T_{Wmax}$ ,  $T_{Wmin}$  为满足用户要求的最高水温和最低水温。

热水器的满意度模型为

$$WH_i^t(x_i^t) = u_i^t(x_i^t) - K_{WH,t} \quad (16)$$

##### ② 空调

当空调处于开启、关闭状态时,  $t+1$  时刻的室温  $T_{AC,t+1}$  如式(17)、式(18)所示,运行约束条件如式(19)所示。

$$T_{AC,t+1} = T_{out} - Q_a \cdot R_a - (T_{out} - Q_a \cdot R_a - T_{AC,t}) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{R_a \cdot C_a}\right) \quad (17)$$

$$T_{AC,t+1} = T_{out} - (T_{out} - T_{AC,t}) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{R_a \cdot C_a}\right) \quad (18)$$

$$T \in [T_{ACmin}, T_{ACmax}] \quad (19)$$

式中:  $R_a$  为空调热阻系数;  $C_a$  为空调热容;  $Q_a$  为空调功率;  $T_{out}$  为室外温度;  $T_{ACmin}$ ,  $T_{ACmax}$  为满足用户要求的最低和最高室温。

空调的温度偏差指数越大,表示室温越偏离最低室温,则应当优先开启空调降低室温,其温度偏差指数  $K_{AC,t}$  的计算公式如式(20)所示。

$$K_{AC,t} = \frac{T_{AC,t} - T_{ACmin}}{T_{ACmax} - T_{ACmin}} \quad (20)$$

空调的满意度模型为

$$AC_i^t(x_i^t) = u_i^t(x_i^t) - K_{AC,t} \quad (21)$$

##### 2) 用户支付

用户向电力公司支付电费,同时参与需求响应机制时,将获得电价折扣补贴。采用线性定价策略,每个时隙的支付之和  $p_i$  表示为

$$p_i = \sum_{t \in T} (\pi_t Q_{i,t}) \cdot b_i \quad (22)$$

式中:  $\pi_t$  表示  $t$  时刻的电价,  $t = 1, 2, 3, \dots, T$ ;  $Q_{i,t}$  为用户  $i$  在时段  $t$  上的负荷;  $b_i$  为  $t$  时刻的电价折扣系数。

$Q_t$  为  $t$  时刻多用户组的总负荷,如式(23)所示。

$$Q_t = \sum_{i=1}^N Q_{i,t} \quad (23)$$

$T$  个时段的总负荷曲线为  $Q = [Q_1, Q_2, \dots, Q_T]$ 。

### 3) 用户收益

用  $w_i$  表示用户的实际收益, 其表达式为

$$w_i = u_i - p_i \quad (24)$$

## 1.3 电力公司模型

$L = (L^1, L^2, \dots, L^T)$  表示电力公司在一个月周期  $T$  内向用户提供电量(式(25)), 同时满足约束条件式(26), 即

$$L \geq Q \quad (25)$$

$$L \leq L_{\max} \quad (26)$$

式中,  $L_{\max} = (L_{\max}^1, L_{\max}^2, \dots, L_{\max}^T)$  表示各时段上的发电量上限值。

### 1) 电力公司收入

电力公司收入是由所有用户支付的电费组成的, 其表达式为

$$P_0 = \sum_{i \in N_1} p_i \quad (27)$$

### 2) 运营成本

电力公司出售电能时存在一个运营成本, 比如购买资源、设备投入及公司管理等。运营成本的表达式为

$$c'(L) = a'(L)^2 + b'L + c' \quad (28)$$

式中:  $a' > 0$ ;  $b' \geq 0$ ;  $c' \geq 0$ 。

$c_0$  表示电力公司在一个月周期  $T$  内的运营总成本, 其表达式为

$$c_0 = \sum_{i \in T} c'(L) \quad (29)$$

### 3) 电力公司收益

电力公司的实际收益  $w_0$  是收入与运营成本之差, 其表达式为

$$w_0 = p_0 - c_0 \quad (30)$$

## 2 多时间尺度电力套餐及家庭能量管理

为减小 DRE 信息、用户用电安排和用户参与电网需求响应的不确定性对家庭能量优化的影响, 本文采用日前-日内-实时三阶段优化调度模型对家庭能量管理进行优化。面向多用户参与需求响应的电力套餐设计和家庭能量优化调度整体流程图如图 3 所示。

### 2.1 基于多用户和电网博弈的日前优化模型

非合作博弈模型获得的个体最优决策作为合作博弈谈判的威胁点, 也称作威胁谈判破裂的临界点。日前优化模型采用非合作与合作博弈相结合的方式, 得到最优的电价方案和日前优化计划作为多时间尺度优化模型的基准值。日前用电优化对用电量

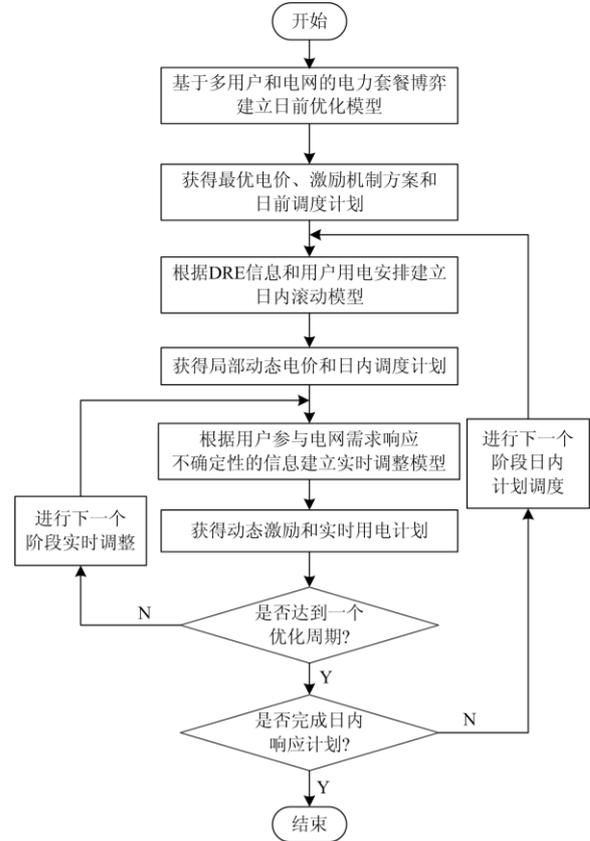


图 3 面向多用户参与需求响应的电力套餐设计和家庭能量优化调度流程图

Fig. 3 Power package design and home energy optimization scheduling flow chart for multi-user participation demand response

划进行预测, 包括是否调整可转移或中断设备的运行时间。

#### 2.1.1 多用户和电网非合作博弈

在非合作博弈中, 所有参与者都是个体理性。本节分别从用户和电力公司的角度出发, 描述非合作博弈模型下的需求响应和定价策略。用户通过  $\max_{x_i} w_i$  选择用电需求。

式(24)达到最优时的解是由电价确定的, 用  $Q_i^*(\pi)$  表示在价格  $\pi$  和电价折扣  $b_i$  时, 用户需求最优解的表达式如式(31)所示。

$$Q_i^*(\pi, b_i) = \arg \max_{x_i} w_i(Q_i, \pi, b_i) \quad (31)$$

当电力公司作为非合作博弈的主导者, 根据用户对其自身利益最优化得到的需求调度  $Q_i^*(\pi, b_i)$ , 设定价格  $\pi$  和电价折扣  $b_i$ , 通过  $\max_{\pi} w_0$  最优化电力公司自身收益。

用  $(\pi^*, b_i^*)$  表示电力公司获得的最优解, 则其数学表达式为

$$(\pi^*, b_i^*) = \arg \max_{\pi} w_0(Q^*(\pi, b_i), \pi, b_i) \quad (32)$$

上述非合作博弈在达到稳定状态时, 其均衡点为最优价格  $\pi^*$ 、最优折扣  $b_i^*$  及最优价格下的最优需求  $Q_i^*(\pi^*, b_i^*)$ 。

### 2.1.2 多用户和电网合作博弈

本文假设用户之间不存在合作或冲突, 仅考虑电网和多用户间的博弈, 即不考虑参与者集中进行合作的联盟博弈问题, 则电力公司和多用户合作博弈模型的数学表达式为  $\max_{x_i, p_i, i \in N} \Pi(w_i - w_i^{d_i})^{\alpha_i} \cdot (w_0 - w_0^{d_0})^{\alpha_0}$ , 其中:  $d_0$  和  $d_i (i \in N)$  为谈判威胁点;  $\alpha_0$  和  $\alpha_i (i \in N)$  为各参与者的谈判力量, 且满足  $\alpha_0 + \sum_{i \in N} \alpha_i = 1$ 。

## 2.2 基于模型预测控制的多时间尺度优化模型

基于多用户和电网博弈的家庭能量优化管理模型无法有效处理由于 DRE 信息、用户用电安排和用户参与电网需求响应等不确定性因素带来的影响, 因此引入模型预测控制(Model Predictive Control, MPC) 办法进行家庭能量优化管理, 相比传统电力套餐制定和能量管理策略具有更强的鲁棒性与适应性。

### 2.2.1 考虑 DRE 信息和用户用电安排的日内滚动优化模型

日内滚动优化的输入量包括日前负荷预测、DRE 信息、用户用电安排和室外温度预测, 得到最优的总削减负荷量  $y$  和计划外用电量  $y_u$ , 输出量为局部动态分时电价、设备运行时刻和用户响应电网的用电计划,  $y_i^t$  是用户  $i$  在  $t$  时刻的负荷转移率。滚动优化时, 在预测时域内对 DRE 信息、用户用电和室外温度信息进行更新, 为使日内计划能够较好地遵循日前调度计划。按照用户意愿及其收益情况, 在规定时间内完成一定时长的功率响应。

根据最新预测信息, 以整个优化区间用户的用电成本最小为优化目标, 调整电价和设备用电情况, 用户的总用电成本包括用户电费支出和响应 DRE 获得的效益, 引入舒适度折算系数  $h$  将用户舒适度折算成等效收益, 得出最优的局部动态电价。日内用电优化的目标函数为

$$\min C_{in} = p_i - c_p \cdot r_e - h(\xi^{HVAC} + \xi^S) \quad (33)$$

式中:  $c_p$  为参与电网需求响应的补偿价格;  $r_e$  为用户实际的响应量;  $\xi^{HVAC}$  为温度舒适度,  $\xi^S$  为设备运行时间舒适度。

用户温度舒适度体现在用户设定的适宜温度与实际温度的偏差, 表达式为

$$\xi^{HVAC} = -\sum_{t=1}^T \gamma_t^{HVAC} (T_t^{in} - T_{set})^2 \quad (34)$$

式中:  $\gamma_t^{HVAC}$  为  $t$  时刻温度舒适度的相对重要程度,  $T_t^{in}$  为室内温度;  $T_{set}$  为设定温度。

可转移或可中断负荷改变日前计划用电时, 将对设备运行时间舒适度  $\xi^S$  造成影响,  $\xi^S$  可描述为

$$\xi^S = \sum_{e \in S} \gamma_e \omega_e \quad (35)$$

式中:  $S$  为可转移或可中断负荷集合;  $\gamma_e$  表示设备  $e$  对用户用电舒适度的影响程度;  $\omega_e$  为 0-1 变量, 1 表示设备工作, 0 表示设备不工作。

在用户完成 DRE 后, 用户可能同时大幅度恢复因参与 DR 而削减的负荷, 因此, 需要考虑这种负荷反弹性质, 避免出现新的用电高峰引起负荷波动, 避免出现负荷新高峰, 设定负荷波动最小的目标函数为  $\min \sum_{k=1}^K (P_k^{10} - \bar{P}^{10})^2$ , 并设定 15 min 平均功率

$P_k^{10}$  满足最大平均功率  $P_{const}$  约束, 即  $P_k^{10} \leq P_{const}$ 。

### 2.2.2 考虑用户参与需求响应不确定性的实时调整模型

尽管日内滚动优化时已经对响应计划进行安排, 但是尚未考虑用户实际响应的程度。针对响应不足或过度的情况, 构建闪电型激励型需求响应不确定模型。由此, 用户参与电网需求响应的计划值与实际值引起的用电功率偏差可表示为

$$\Delta y = y - \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T y_i^t \quad (36)$$

实时用电调整主要在日内用电优化值的基础上对用户参与需求响应的程度进行调节。输入量包括日内负荷预测、DRE 信息、用户实际用电情况和室外温度预测, 输出量为局部电价激励、设备运行时刻和用户响应电网的用电计划。以多用户综合效应收益最大为优化目标, 综合效应收益包括用户支付和响应功率偏差带来的惩罚, 得出满足需求响应机制的最优动态激励。

实时用电调整优化函数如下所述。

#### 1) 惩罚效应建模

在超出最优动态激励对应的响应度范围, 则给予惩罚。

#### 2) 总目标函数建模

$$\min C_{at} = p_i - c_p \cdot r_e + h(\lambda^{HVAC} + \lambda^S) + k \cdot |\Delta y_i| \quad (37)$$

式中,  $k$  为功率偏差系数。

### 3 算例分析

算例结合华东地区某地夏季的24 h原始居民日负荷数据, 求解多时间尺度的可变电力套餐方案, 制定家庭能量优化调度策略。本文模型允许用户实时参与到DR项目中, 在接收到DRE请求时, 居民用户降低用电需求缓解负荷高峰期的压力。分时电价如附表1所示。

对日负荷曲线进行聚类分析得到图4的结果。

其中4类用户数量分别占总用户数量的24.3%、29.5%、14.8%和33.3%, 根据设定用户期望的工作时间, 不改变设备的可运行时间, 通过描述期望用电时间的改变来反映这4类用户用电习惯的不同。

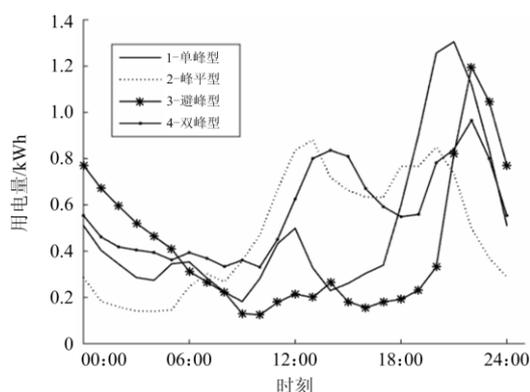


图4 基于模糊c聚类算法的日负荷曲线聚类结果

Fig. 4 Clustering results of daily load curve based on FCM algorithm

#### 3.1 基于多用户和电网博弈的日前优化调度

##### 3.1.1 多用户和电网非合作博弈

设定用户的期望用电时间, 合理的仿真分析会根据用户期望, 尽可能将用电时间安排在期望用电的时段内。仿真分析仅考虑家庭中的可调度设备的运行情况, 各类用户的可调度设备的用电信息及用户期望的用电时间如附表2所示。参数 $\sigma=2$ , 选取共1000个用户进行仿真分析。

1) 以多用户作为非合作博弈的主导者, 根据用户实际期望的用电时间, 得到用户的日前优化调度后最优的用电时间。4类典型用户优化前后电费及满意度如表1所示, 按各类用户占总用户的比例, 计算出多用户群体平均节约电费支出百分比及满意度。

由表1可知, 经多用户为主导者的非合作博弈优化后, 多用户调度组的平均日电费支出降低3.7441%, 平均满意度提高12.7545%。

2) 以电网作为非合作博弈的主导者, 根据日前

调度计划的最优用电时间, 得到最优的分时电价和电价折扣系数, 如表2所示。在 $t \in T$ 上有 $a' = 0.05$ 、 $b' = 0$ 、 $c' = 0$ 。

表1 各类典型用户优化前后电费及满意度

Table 1 Electricity charges and satisfaction of various typical users before and after optimization

	优化前/后	电费/元	满意度/%
类型1	优化前	47.366 8	75.151 8
	优化后	44.995 6	90.123 1
类型2	优化前	43.045 6	90.213 8
	优化后	42.952 0	94.351 5
类型3	优化前	31.158 4	86.033 9
	优化后	29.411 2	88.347 8
类型4	优化前	46.789 6	80.953 6
	优化后	46.758 4	82.011 5
多用户调度组平均	优化前	44.401 0	84.565 5
	优化后	42.738 6	95.351 4

表2 最优分时电价和电价折扣系数

Table 2 Optimal TOU price and price discount coefficient

峰时电价/ (元/kWh)	谷时电价/ (元/kWh)	平时电价/ (元/kWh)	电价折扣系数
0.843 7	0.204 0	0.511 2	0.998 1

优化后, 电网公司收入增加0.113%, 因生产成本与电价无关, 因此电网公司利益增加0.113%。

##### 3.1.2 多用户和电网合作博弈

表3为非合作博弈和合作博弈情况下, 用户与电力公司利益。可见合作博弈模型下的用户和电力公司利益有所增长。

表3 非合作博弈和合作博弈情况下用户和电力公司的利益

Table 3 Benefits of users and power companies in non-cooperative and cooperative games

	非合作博弈/ 元	合作博弈/ 元	利益 增加/元	增加 百分比/%
电力公司	30 667.35	38 811.42	81 44.07	26.556 2
类型1用户	18.090 6	21.634 9	3.544 3	19.591 9
类型2用户	23.094 1	28.717 7	5.623 6	24.350 8
类型3用户	32.432 3	35.819 2	3.386 9	10.443 0
类型4用户	10.647 9	13.564 4	2.916 5	27.390 4

此时4类典型用户的日负荷曲线如图5所示, 非合作博弈和合作博弈的多用户调度组平均日负荷曲线对比如图6所示, 分时电价的峰时电价为0.804 8元/kWh, 谷时电价为0.205 9元/kWh, 平时电价为0.500 2元/kWh, 电价折扣系数为0.997 3。

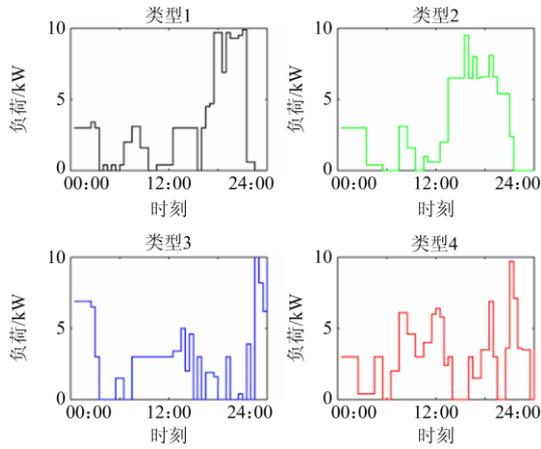


图5 合作博弈模型下典型用户的日负荷曲线  
Fig. 5 Daily load curve of typical users under cooperative game model

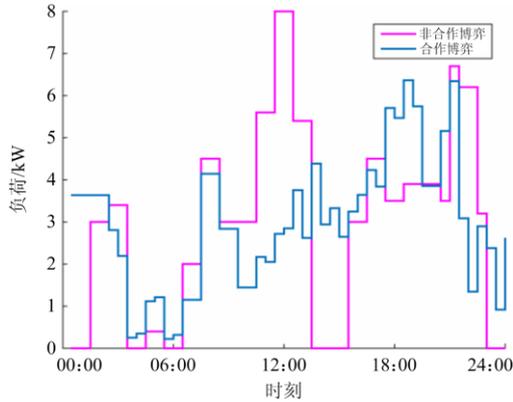


图6 非合作博弈和合作博弈模型下多用户调度组平均日负荷曲线

Fig. 6 Average daily load curves of multi-user scheduling groups under non-cooperative game and cooperative game models

### 3.2 基于 MPC 的多时间尺度优化

#### 3.2.1 考虑 DRE 信息和用户用电安排的日内滚动优化

以合作博弈优化后的居民多用户调度组当日当前  $t$  时刻的日负荷曲线作为负荷基线，峰谷电量系数为 1.983 8。接收到 DRE 信息后，可在接下来的 24 h 进行响应，持续时间为 0.5~1.5 h，补偿价格为 0.45 元/kWh，非避峰型用户在某单位时段内最少响应 0.2 kW，各时段平均最大功率为 10 kW。

参考文献[25]，价格型需求响应模型的参数设定为： $\lambda_{pv0i}^{\max} = 0.5\%$ ， $\lambda_{pv0i}^{\min} = -0.5\%$ ； $a_{pvi} = 0.1$  元； $b_{pvi} = 0.8$  元； $\lambda_{pvi}^{\max} = 5\%$ ， $\gamma_t^{\text{HVAC}} = 0.05$ ， $h = 1$ ， $\gamma_e$  为负荷运行总耗电量的 0.9 倍。

由多用户调度组平均日负荷曲线可知，18:00—21:00 为该多用户组可调度设备的用电高峰

期，负荷峰值为 6.363 9 kW。利用峰谷价格型需求响应机理对算例进行仿真求解，得到最优的峰谷电价差和负荷转移率为 0.765 462 元和 4.778%，峰时电价为 1.028 6 元/kWh，谷时电价为 0.263 154 元/kWh，此时的峰谷电价成为局部动态电价，仅对高峰时期转移的负荷有效。由仿真结果可知，局部动态电价相较于考虑价格型需求响应机理前的电价升高，峰时电价的提高有利于用户转移高峰负荷，谷时电价的提高可以避免用户向低谷转移大量负荷形成新的用电高峰。优化前后的电价变化如图 7 所示，优化后的 4 类典型用户的日负荷曲线、多用户调度组平均日负荷曲线如图 8、图 9 所示。

此时多用户调度组日负荷峰谷电量系数为 1.622 9，降低 18.192 4%，负荷峰值为 5.704 6 kW，降低 10.360 0%。在响应 DRE 信息后，用户转移峰

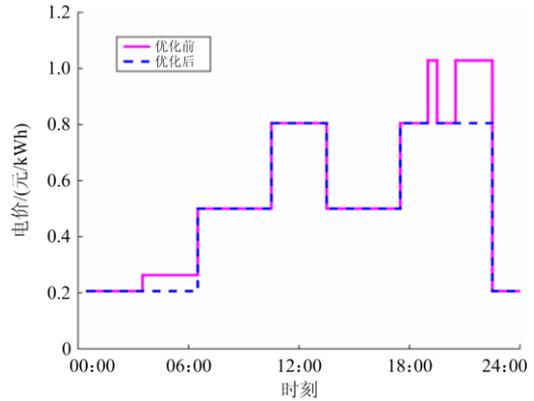


图7 考虑价格型需求响应机理后的电价变化图  
Fig. 7 Price change diagram considering the price-based demand response mechanism

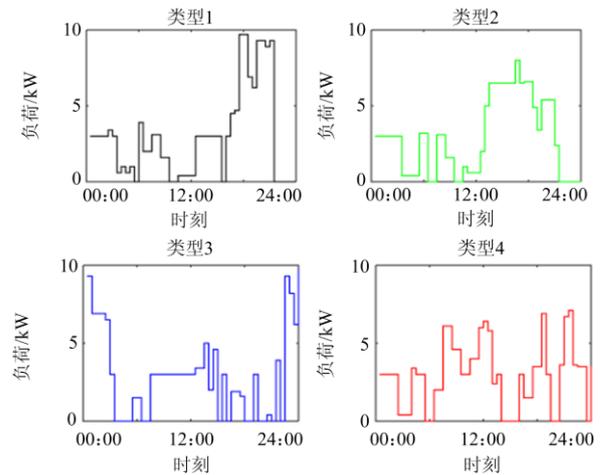


图8 考虑价格型需求响应机理后的典型用户的日负荷曲线  
Fig. 8 Daily load curve of typical users considering the price-based demand response mechanism

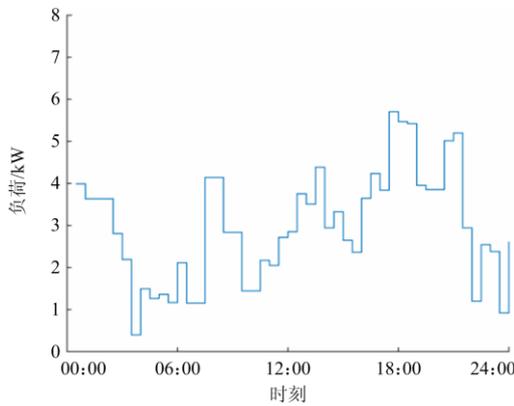


图9 考虑价格型需求响应机理后的多用户调度组  
平均日负荷曲线

Fig. 9 Average daily load curve of multi-user scheduling group considering the price-based demand response mechanism

时负荷, 用户电费减少 3.234 3%, 舒适度降低 1.806 0%, 用户实际响应时转移负荷率为 11.832 0%。

### 3.2.2 考虑用户参与需求响应不确定性的实时调整

最优负荷转移率为 4.778%, 而用户实际响应时转移负荷率为 11.832 0%, 因此考虑激励型需求响应不确定机理进行实时调整, 降低电价激励, 减少电量转移。

参考文献[16], 基于消费者心理学的激励型需求响应机理模型, 其参数设定为: 启动电价  $x_{0i} = 0.2/\text{kWh}$ , 临界激励电价  $x_{1i} = 0.25 \text{ 元/kWh}$ , 饱和和激励电价  $x_{\max i} = 1 \text{ 元/kWh}$ , 无电价差或电价差较小的负荷转移量  $\lambda_{0i} = 0.2 \text{ kWh}$ , 最大峰谷负荷转移量  $\lambda_{\max i} = 3 \text{ kWh}$ , 受到电价激励后削负荷曲线斜率的上限  $\lambda_{\text{upi}} = 3.5$ , 受到电价激励后削负荷曲线斜率的下限  $\lambda_{\text{downi}} = 4$ 。功率偏差系数  $k = 1$ 。

以考虑价格型需求响应机理后的居民多用户调度组当日当前  $t$  时刻的日负荷曲线作为负荷基线, 表 4 给出了考虑用户参与需求响应不确定性前、后居民日平均电量曲线指标。

由表 5 可知, 当电价激励为  $-0.711 68 \text{ 元/kWh}$  时, 削负荷量下降 1.990 9 kWh, 达到最优状态, 基本满足 DRE 要求。若仍坚持超出削减负荷的调度计划, 超出部分以  $0.711 68 \text{ 元/kWh}$  对用户进行惩罚。

### 3.3 多时间尺度可变电力套餐的效果分析

本节设计了 3 种优化模型进行对比。

优化模型 1: 日前优化模型。仅基于多用户和电网的博弈模型, 获得最优的电价方案和日前调度计划。

表 4 考虑用户参与需求响应不确定性前、后居民日平均电量曲线指标

Table 4 Curve index of average daily electric quantity of residents before and after considering the uncertainty of demand response involving users

可中断负荷 补偿/ (元/kWh)	积极平均 响应度/ kWh	消极平均 响应度/ kWh	积极峰 谷差率/ %	消极峰 谷差率/ %
-1	-3	-3	1.860 1	1.860 1
-0.8	-2.3	-2.2	1.801 0	1.763 3
-0.5	-1.25	-1	1.716 8	1.697 5
-0.25	-0.375	0	1.650 4	1.622 9
-0.2	-0.2	0.2	1.637 5	1.608 5
0.2	0.2	-0.2	1.608 5	1.637 5
0.25	0.375	0	1.596 0	1.622 9
0.5	1.25	1	1.535 3	1.552 3
0.8	2.3	2.2	1.466 1	1.472 5
1	3	3	1.422 0	1.422 0

表 5 不同模型下的优化结果

Table 5 Optimization results under different models

模型	电费/元	DR收益/元	舒适度等效 收益/元	等效 净支出/元
模型 1	40.410 0	0	6.391 0	34.019 0
模型 2	39.103 1	4.297 5	6.254 1	28.551 5
模型 3	39.488 6	2.452 5	6.269 0	30.767 1

优化模型 2: 日前-日内优化模型。根据 DRE 信息和用户用电安排建立日内滚动优化模型, 获得局部动态分时电价的电力套餐方案和日内调度计划。

优化模型 3: 日前-日内-实时优化模型。根据用户参与电网需求响应不确定性的信息建立实时调整模型, 获得局部动态分时电价和动态激励的电力套餐和实时用电计划。

表 5 为不同模型下优化结果的比较, 电费、DR 收益、舒适度等效收益和等效净支出均为多用户调度组的平均值。模型 1 仅进行日前优化, 不考虑 DR。模型 2 进一步考虑了 DR, 获得 DR 收益且等效支出明显减少。模型 3 用于调整用户参与需求响应存在的不足或过度的情况, 本算例中存在需求响应过度的情况, 相较于模型 2, 改善了用户响应过度的情况, 校正了响应偏差, DR 收益虽然略微有所减少, 但舒适度和等效收益有所增加, 等效净支出增加。

## 4 结论

本文在居民负荷响应不确定性分析的基础上, 将可转移负荷、温控负荷和 DRE 信息在多时间尺度上协调优化, 提出一种计及用户参与不确定性的多

时间尺度可变电力套餐和面向 DR 的家庭能量管理调度策略。本文主要的贡献在于：

- 1) 建立需求响应不确定性模型，针对需求响应不足或过度的情况，给出正激励鼓励居民转移高峰负荷，或者给出负激励减少居民转移高峰负荷的情况；
- 2) 通过采用日前-日内-实时多时间尺度优化调度模型，满足 DRE 要求和居民用电要求的变化，开发用户自主参与需求响应的潜力。

## 附录

附表 1 分时电价

Attached Table 1 Time of use

峰谷平	时段划分	电价/(元/kWh)
峰时	10:00—13:00、17:00—22:00	0.832
谷时	00:00—06:00、22:00—24:00	0.208
平时	06:00—10:00、13:00—17:00	0.520

附表 2 可调度设备的用电信息及用户期望用电时间

Attached Table 2 Power consumption information of dispatchable equipment and expected power consumption time of users

可调度设备	可运行时间	功率/kW	最小运行时长/h	可否中断	用户期望用电时间(一 单峰)	用户期望用电时间(二 峰平)	用户期望用电时间(三 避峰)	用户期望用电时间(四 双峰)
洗衣机	00:00—24:00	0.6	2	N	20:00—22:00	10:00—12:00	22:00—24:00	10:00—12:00
洗碗机	06:00—24:00	2.4	2	N	19:00—21:00	19:00—21:00	22:00—24:00	11:00—13:00
熨斗	00:00—24:00	2	1	N	06:00—07:00	12:00—13:00	22:00—23:00	06:00—07:00
吸尘器	07:00—22:00	1.6	2	Y	07:00—09:00	07:00—09:00	13:00—15:00	07:00—09:00
加湿器 1	00:00—06:00	0.4	2	Y	02:00—04:00	03:00—5:00	00:00—02:00	02:00—04:00
加湿器 2	08:00—14:00	0.4	2	Y	10:00—12:00	10:00—12:00	12:00—14:00	10:00—12:00
加湿器 3	16:00—22:00	0.4	2	Y	18:00—20:00	17:00—19:00	16:00—18:00	18:00—20:00
饮水机 1	05:00—8:00	1.5	1	Y	07:00—08:00	07:00—08:00	05:00—06:00	07:00—08:00
饮水机 2	16:00—21:00	1.5	1	Y	16:00—17:00	16:00—17:00	16:00—17:00	16:00—17:00
热水器	00:00—24:00	3.5	4	Y	17:00—21:00	13:00—17:00	22:00—次日 02:00	17:00—21:00
空调 1	07:00—21:00	3	8	Y	13:00—21:00	13:00—21:00	07:00—15:00	07:00—15:00
空调 2	21:00—次日 07:00	3	3	Y	00:00—03:00	00:00—03:00	00:00—03:00	00:00—03:00
电烤箱	07:00—24:00	3.2	2	N	17:00—19:00	17:00—19:00	22:00—24:00	20:00—22:00

## 参考文献

- [1] 黄剑平, 陈皓勇, 林镇佳, 等. 需求侧响应背景下分时电价研究与实践综述[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 178-187.  
HUANG Jianping, CHEN Haoyong, LIN Zhenjia, et al. A summary of time-of-use research and practice in a demand response environment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 178-187.
- [2] 张杰, 高广玲, 张智晟. 需求响应参与电力系统调频的模糊控制策略[J]. 广东电力, 2020, 33(3): 64-71.  
ZHANG Jie, GAO Guangling, ZHANG Zhisheng. Fuzzy control strategy of demand response participating in power system frequency modulation[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(3): 64-71.
- [3] CHAI Yanxin, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Incentive-based demand response model for maximizing benefits of electricity retailers[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(6): 1644-1650.
- [4] 王建军, 李莉, 年田甜, 等. 面向居民智慧用电的智能电器控制策略优化研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(3): 83-88.  
WANG Jianjun, LI Li, NIAN Tiantian, et al. Optimization of intelligent electrical apparatus control strategy oriented smart electricity consumption of resident[J]. Smart Power, 2020, 48(3): 83-88.
- [5] 黄悦华, 王艺洁, 杨楠, 等. 基于演化博弈的用户综合用能行为决策方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 21-29.  
HUANG Yuehua, WANG Yijie, YANG Nan, et al. Research on a decision method of a user comprehensive energy use behavior based on an evolutionary game[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 21-29.
- [6] YANG Qiang, FANG Xinli. Demand response under real-time pricing for domestic households with renewable DGs and storage[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(8): 1910-1918.
- [7] 杨冰. 基于需求响应的家用设备调度策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.  
YANG Bing. Research on household appliances scheduling strategies based on demand response[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [8] 侯佳萱, 林振智, 杨莉, 等. 面向需求侧主动响应的工商业用户电力套餐优化设计[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 11-19.  
HOU Jiaxuan, LIN Zhenzhi, YANG Li, et al. Design of electricity plans for industrial and commercial customers oriented to active demand response on power demand side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,

- 42(24): 11-19.
- [9] 史俊祎, 文福拴, 崔鹏程, 等. 参与需求响应的工业用户智能用电管理[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(14): 45-53. SHI Junyi, WEN Fushuan, CUI Pengcheng, et al. Intelligent energy management of industrial loads considering participation in demand response program[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 45-53.
- [10] 王蓓蓓. 面向智能电网的用户需求响应特性和能力研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3654-3663. WANG Beibei. Research on consumers' response characteristics and ability under smart grid: a literatures survey[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3654-3663.
- [11] 刘浩田, 陈锦, 朱熹, 等. 一种基于价格弹性矩阵的居民峰谷分时电价激励策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 116-123. LIU Haotian, CHEN Jin, ZHU Xi, et al. An incentive strategy of residential peak-valley price based on price elasticity matrix of demand[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(5): 116-123.
- [12] MHANNA S, CHAPMAN A C, VERBIĆ G. A faithful and tractable distributed mechanism for residential electricity pricing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4238-4252.
- [13] 孙毅, 刘迪, 崔晓昱, 等. 面向居民用户精细化需求响应的等梯度迭代学习激励策略[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3597-3605. SUN Yi, LIU Di, CUI Xiaoyu, et al. Equal gradient iterative learning incentive strategy for accurate demand response of resident users[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3597-3605.
- [14] 涂京. 智能电网环境下居民需求响应建模及优化运行研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020. TU Jing. Research on modeling and optimal operation of residential demand response in smart grid[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [15] 艾欣, 徐立敏, 刘汇川, 等. 面向主动需求响应的需求侧荷源二重性建模方法[J]. 中国电力, 2021, 54(6): 183-190. AI Xin, XU Limin, LIU Huichuan, et al. Demand side load source duality modeling method for active demand response[J]. Electric Power, 2021, 54(6): 183-190.
- [16] SHAFIE-KHAH M, SIANO P. A stochastic home energy management system considering satisfaction cost and response fatigue[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(2): 629-638.
- [17] 张禹森, 孔祥玉, 孙博伟, 等. 基于电力需求响应的多时间尺度家庭能量管理优化策略[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1811-1819. ZHANG Yusen, KONG Xiangyu, SUN Bowei, et al. Multi-time scale home energy management strategy based on electricity demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1811-1819.
- [18] 南思博, 李庚银, 周明, 等. 智能小区可削减柔性负荷实时需求响应策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 42-50. NAN Sibbo, LI Gengyin, ZHOU Ming, et al. Real-time demand response of curtailable load in smart residential community[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 42-50.
- [19] WU Z, ZHOU S, LI J, et al. Real-time scheduling of residential appliances via conditional risk-at-value[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1282-1291.
- [20] IQBAL M M, ZIA M F, BEDDIAR K, et al. Optimal scheduling of grid transactive home demand responsive appliances using polar bear optimization algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8: 22285-22296.
- [21] SIOSHANSI R. Retail electricity tariff and mechanism design to incentivize distributed renewable generation[J]. Energy Policy, 2016, 95: 498-508.
- [22] SHI H, MA Q, SMITH N, et al. Data-driven uncertainty quantification and characterization for household energy demand across multiple time-scales[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3092-3102.
- [23] ELLMAN D, XIAO Y. Incentives to manipulate demand response baselines with uncertain event schedules[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1358-1369.
- [24] 陈长青, 阳同光. 计及柔性负荷的电网储能和光伏协调规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 169-177. CHEN Changqing, YANG Tongguang. Research on grid energy storage and photovoltaic coordination planning with flexible load[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 169-177.
- [25] 于道林. 智能电网下需求响应机理及其短期负荷预测模型研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2017. YU Daolin. Research on demand response mechanism and short-term load forecasting model under smart grid[D]. Qingdao: Qingdao University, 2017.

收稿日期: 2021-07-27; 修回日期: 2021-08-19

作者简介:

傅质馨(1983—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为可再生能源发电技术、物联网技术; E-mail: zhixinfu@hhu.edu.cn

李紫嫣(1997—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为面向需求侧响应的能量管理策略; E-mail: 704315319@qq.com

朱俊澎(1990—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为主动配电网规划、运行与控制。

(编辑 姜新丽)