

萧威,殷志祥,叶子,等.基于博弈论方法的多约束多目标家庭能源管理[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(3):68-76. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.010

XIAO W, YIN Z X, YE Z, et al. On Multiple Constraint and Multiple Objective Household Energy Management Method Based on Game Theory[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology ( Natural Science Edition ), 2022, 37(3):68-76. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.03.010

# 基于博弈论方法的多约束多目标家庭能源管理

萧威<sup>1,2\*</sup>, 殷志祥<sup>3</sup>, 叶子<sup>4</sup>, 杨静<sup>5</sup>

(1.安徽理工大学 电气与信息工程学院,安徽 淮南 232001;2.国华能源投资有限公司,北京 100007;  
3.上海工程技术大学 数理与统计学院,上海 201620;  
4.国网通用航空有限公司,北京 102209;5.安徽理工大学 数学与大数据学院,安徽 淮南 232001)

**摘要:**针对单目标家庭能源管理无法实现最优的系统负荷高峰需求削减,提出一种基于博弈论方法的多约束多目标家庭能源管理方案.该方法考虑了各种类型的家用电器约束,如不可变电器(NSA)、时间可变电器(TSA)等.在合作博弈过程中,将每个家庭能源管理目标作为 1 名参与者,且每名参与者均尝试最大化其自身收益,所有参与者都可以通过集体协商实现双赢.同时,方法还考虑了智能电池储能系统,以最大化可再生能源利用率,并进一步改善多目标优化的性能.各种场景下的不同案例分析证明所提出模型的有效性,能够得到最优折衷解.与加权和方法相比,所提方法更具优势.

**关键词:**家庭能源管理;博弈论方法;多目标;储能系统;可再生能源

中图分类号:TM615;TP391 文献标志码:A 文章编号:1672-9102(2022)03-0068-09

## On Multiple Constraint and Multiple Objective Household Energy Management Method Based on Game Theory

XIAO Wei<sup>1,2</sup>, YIN Zhixiang<sup>3</sup>, YE Zi<sup>4</sup>, YANG Jing<sup>5</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;  
2. Guohua Energy Investment Co., Ltd., Beijing 100007, China;  
3. School of Mathematics and Statistics, Shanghai University of Engineering and Technology, Shanghai 201620, China;  
4. State Grid General Aviation Co., Ltd., Beijing 102209, China;  
5. College of Mathematics and Big Data, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that single objective household energy management (HEM) can not achieve optimal peak load reduction, a multi-objective and multi-objective hem scheme based on game theory is proposed. This method considers various types of household appliances constraints, such as NSA and TSA. In the process of cooperative game, each hem goal is regarded as a participant, and each participant tries to maximize its own benefits. All participants can achieve win-win through collective negotiation. At the same time, smart battery energy storage system is also considered to maximize renewable energy utilization and further improve the performance of multi-objective optimization. The effectiveness of the proposed model is proved by case studies in various scenarios, and the optimal compromise solution can be obtained. Compared with the weighted sum method, the proposed method has more advantages.

收稿日期:2020-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61702008)

\*通信作者,E-mail:timdun2008@163.com

**Keywords:** household energy management; game theory; multiple objective; energy storage system; renewable energy

为实现智能家庭中的负荷转移方案,家庭能源管理<sup>[1]</sup>(Household Energy Management, HEM)方法至关重要.快节奏的生活方式和不断增加的电器数量,使得当前住宅能源需求量大幅提高.为解决住宅的用电紧张,并尽量减少环境污染,需采用家庭内可再生能源发电与相应的 HEM 方法.

在电力产业中,需求侧管理(Demand Side management, DSM)方法在提高能源效率中是不可或缺的. HEM 系统属于 DSM 范畴,被定义为管理和监督智能家庭中电力使用和流动的系统<sup>[2]</sup>.一般来说,太阳能和风能等可再生能源本质上具有间歇性,给电力系统的运营带来额外难题<sup>[3]</sup>,通过 HEM 方案及智能储能系统,有望解决该问题,最大限度地提升可再生能源利用率.因此,研究人员提出各种 HEM 优化方法与家庭内可再生能源整合方案,HEM 模型按照目标的数量,一般可以分为单目标 HEM 模型和多目标 HEM 模型.

单目标 HEM 一般考虑单个目标,文献[4]提出了基于贪婪迭代算法的 HEM 模型,以最小化用户的用电成本;文献[5]提出一种操作依赖的启发式动态规划方法,对集成了电池储能系统和太阳能发电设备的住宅建筑进行负荷调度.此外,还有线性规划<sup>[6]</sup>的 HEM 模型、边缘计算算法<sup>[7]</sup>,以及一些基于启发式的负荷调度算法<sup>[8]</sup>的 HEM 模型等,这些方法主要是优化不同的 HEM 目标函数,如用户电费最小化、峰均比最小化、电企成本最小化、峰值负荷最小化、用户舒适度最大化等.

以上大部分 HEM 模型考虑的目标较为单一,可能无法实现最优的系统负荷高峰需求削减.从实践角度出发,在 HEM 方案中须考虑到多个目标,以满足用户和电力企业的需求.为此,研究人员提出了一些多目标 HEM 模型,文献[9]利用混合整数线性规划,最大限度降低用户用电成本和高峰负荷需求,以求解住宅 DSM 问题;文献[10]提出一种度量用户温度舒适度的指标,建立一种同时考虑用户舒适度和用电费用的多目标优化调度模型.多目标算法为用户在舒适度和经济性之间的灵活控制提供了一种有效手段,文献[11]考虑了配网运行的灵活性、经济性与安全性,以系统有功功率损耗最低与电压偏压量最小为双目标函数,建立无功优化模型,并将启发式算法-鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)运用到多目标电网无功优化调度中.

博弈论是一门研究和解决冲突的学科,在博弈决策的过程中,决策者通过博弈的理性法则,引导各方竞争和合作达到均衡点,获得利益最大化,保证结果的稳定性和合理性<sup>[12]</sup>.在多目标 HEM 中,各模型的目标函数和各元素组成有约束合作的关系,如何完成 HEM 系统的最优化与博弈论中合作决策模型很相似.在众多博弈模型(如合作博弈、非合作博弈、零和博弈、变和博弈等)中,合作博弈与 HEM 系统最为相似,都是寻求整体利益最大化,以集体理性为指导思想,同时兼顾个人理性.基于此,采用合作博弈论的思想解决多目标 HEM,主要创新总结如下:(1)利用合作博弈论方法,开发 1 个多目标 HEM(MOHEM)模型,得到 2 个不同目标的最优折衷解;(2)考虑智能电池储能系统,使可再生能源利用率最大化,并进一步改善多目标优化的性能.最后实验结果验证了所提方法的优越性和可行性.

## 1 HEM 架构和运行策略

提出的 HEM 模型的系统架构如图 1 所示.该模型中,假设每个智能家庭均配备了 1 个嵌入了能耗调度器(Energy Consuming Scheduler, ECS)单元的智能电表、1 个屋顶太阳能 PV 设备、1 个小型风力涡轮机、各种可控设备以及 1 个电池储能系统.对于提出的 HEM 方案来说,通信网络基础设施是至关重要的.利用家庭内通信链路,ECS 单元可以与所有家用电器、电池系统和可再生能源进行交互,以计算最终负荷需求和可再生能源发电量.用户和电力企业之间可通过智能电表进行信息交换.在该过程中,用户将其电器的运行时间偏好发送至电力企业,电力企业则向用户发送价格信号,ECS 单元根据用户指定的时间偏好和电力企业价格信号,生成所有家用电器的最优负荷调度.在每次最优负荷调度过程中,ECS 单元决定每个电器的开关状态.在可再生能源发电量超出用户负荷需求的情况下,可利用电池储能系统来管理额外电力.

若额外电力超出了电池容量,则通过甩负荷或可再生能源利用率(Rate of Energy Renewable, RER)提取控制器进行调节.中央 DSM 控制器则对整个过程进行监测和控制.

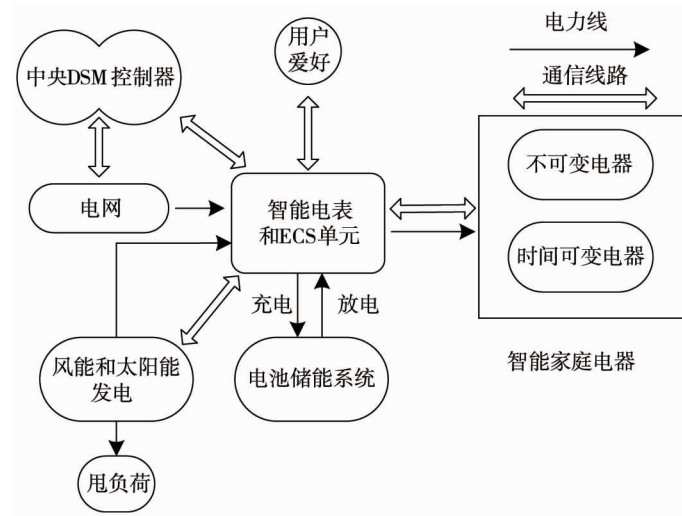


图 1 集成了可再生能源的 HEM 系统架构

根据固有的操作特性,将家用电器分为 2 类,即不可变电器(NSA)和时间可变电容器(TSA).NSA(如电视、风扇、电灯、电冰箱等)根据用户需求,有着固定的时间和能耗模式,因此,在最优负荷调度中不考虑 NSA.TSA(如洗碗机、洗衣机等)有着连续的功耗模式,但可以转移到更合适的时隙中运行,因此,TSA 的负荷适用于 HEM.

## 2 模型的问题定义

本节将简单描述集成了可再生能源和电池储能系统的 HEM 模型的数学建模和约束.所用的参数及其符号说明如表 1 所示.

表 1 参数符号及其说明

符号	含义	符号	含义
$F_1$	用户电费账单的目标函数	$\delta_a$	NSA $a$ 的固定负荷需求值
$F_2$	用电高峰负荷需求的目标函数	$t_a^s, t_a^e$	分别为电器 $a$ 的启动和终止运行的时隙
$P_{grid}^t$	电网在时刻 $t$ 处需要提供的功率	$U_{a, TSA}$	TSA $a$ 的二进制整数向量
$P_L^t$	时刻 $t$ 处的家庭总负荷需求	$P_{a, TSA}^{total}$	TSA $a$ 的转移模式矩阵
$P_{PV}^t, P_W^t$	时刻 $t$ 处的太阳能和风能发电的输出功率	$P_{a, t}^{min}, P_{a, t}^{max}$	PSA $a$ 的最小和最大功率
$P_{dump}^t$	在时刻 $t$ 处甩负荷的耗散功率	$P_{bc}^t, P_{bd}^t$	在时刻 $t$ 处的电池充电和放电功率
$\rho(t)$	时刻 $t$ 处的每 kWh 电价	$P_{bc}^{min}, P_{bc}^{max}$	电池充电功率限制
$\tau$	每时隙长度( $\tau = 0.5$ , 单位小时)	$P_{bd}^{min}, P_{bd}^{max}$	电池放电功率限制
$L_a^t$	电器 $a$ 在时刻 $t$ 处的负荷需求	$\eta_c, \eta_d$	电池充电和放电效率
$L_{NSA}^t$	在时刻 $t$ 处的不可变电器(NSA)的总负荷	$E_B^t$	时刻 $t$ 处的电池电量
$L_{TSA}^t$	在时刻 $t$ 处的时间可变电容器(TSA)的总负荷	SOC <sup>t</sup>	时刻 $t$ 处的电池荷电状态水平
$DR_a$	电器 $a$ 的每日电能需求	$B_{cap}$	电池容量
$T$	一天中的总时隙数( $T = 48$ )	$E^0$	初始电池电量水平
$N$	每个用户的总电器数量		

### 2.1 MOHEM 模型的数学表达式

根据用户电费账单最小化和高峰负荷削减这 2 个目标建立 HEM 模型.一般来说,住宅用户的主要目的是电费支出最小化,而电力企业则旨在削减其系统的高峰需求.利用提出的 MOHEM 模型,可以同时对这 2 个目标函数进行优化.

设  $N$  为每个智能家庭中的家用电器数量,  $\mathbf{A} = \{ a_1, a_2, \dots, a_N \}$  为所有电器集合.由于复杂度和其他

约束,将提出的 MOHEM 模型表示为 1 个混合整数问题(Mixed Integer Problem, MIP).目标函数及其约束的数学表达式列举为<sup>[13]</sup>

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T P_{\text{grid}}^t \tau \rho(t); \quad (1)$$

$$\min F_2 = \text{EPL}. \quad (2)$$

遵循以下约束:

$$P_{\text{grid}}^t = P_{\text{L}}^t + P_{\text{bc}}^t - P_{\text{bd}}^t - P_{\text{pv}}^t - P_{\text{W}}^t + P_{\text{dump}}^t; \quad (3)$$

$$P_{\text{L}}^t = \sum_{a=1}^N L_a^t = L_{\text{NSA}}^t + L_{\text{TSA}}^t, \forall t \in T; \quad (4)$$

$$P_{\text{L}}^t \leq \text{EPL}, \forall t \in T; \quad (5)$$

$$\sum_{t=1}^T L_a^t = \text{DR}_a, \forall a \in \text{N}; \quad (6)$$

$$L_{\text{NSA}}^t = \delta_a, \forall a \in \text{NSA}, \forall t [t_a^s, t_a^{s+1}, \dots, t_a^e]; \quad (7)$$

$$P_{a,\text{TSA}}^{\text{total}} = \begin{bmatrix} P_a^1 & P_a^T & \dots & P_a^3 & P_a^2 \\ P_a^2 & P_a^1 & \dots & P_a^4 & P_a^3 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ P_a^T & P_a^{T-1} & \dots & P_a^2 & P_a^1 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

$$L_a^t = U_{a,\text{TSA}} P_{a,\text{TSA}}^{\text{total}}, \forall a \in \text{TSA}. \quad (9)$$

式中:

$$U_{a,\text{TSA}} = [u_a^1, u_a^2, \dots, u_a^T];$$

$$\sum_{t=1}^T u_a^t = 1, 0 \leq u_a^t \leq 1, \forall t \in T;$$

$$P_{\text{grid}}^t \geq 0. \quad (10)$$

式(1)和式(2)为目标函数,EPL表示电气设备保护级别,式(3)~式(10)定义了各种智能家用电器的约束.本文研究中,提出的HEM在每时隙30 min实施,即1 d总计48个时隙.式(3)描述了时刻 $t$ 处的智能家庭功率平衡公式.如式(5)所示,在负荷调度后的高峰负荷需求应该低于或等于初始峰值.式(6)给出了每个电器 $a$ 的每日电能需求.如式(7)所示,每个NSA在其运行周期内的能耗始终保持不变.式(8)和式(9)给出了TSA的约束.通过使用二进制整数向量,可以从转移模式矩阵 $P_{a,\text{TSA}}^{\text{total}}$ 中选择TSA的电力消耗模式.本文研究中未考虑从智能家庭到主电网的功率流,如式(10)所示.

## 2.2 电池模型和约束

在建立家庭储能系统时,通常选择铅酸电池组,具有投入成本低、性能良好、可用性高和工作寿命长的特点.一般来说,铅酸电池组可用于住宅中<sup>[14]</sup>.为最大化能源利用率,可再生能源的整合中必须使用电池储能系统,假定所有住宅家庭均使用相同的2.4 kWh的电池储能容量.储能系统参数的约束,例如充电功率限制( $P_{\text{bc}}^{\min}, P_{\text{bc}}^{\max}$ ),放电功率限制( $P_{\text{bd}}^{\min}, P_{\text{bd}}^{\max}$ ),以及荷电状态(SOC)限制的数学表达式为<sup>[8]</sup>

$$P_{\text{bc}}^{\min} \leq P_{\text{bc}}^t \leq P_{\text{bc}}^{\max}; \quad (11)$$

$$P_{\text{bd}}^{\min} \leq P_{\text{bd}}^t \leq P_{\text{bd}}^{\max}; \quad (12)$$

$$P_{\text{bc}}^t P_{\text{bd}}^t = 0; \quad (13)$$

$$P_{\text{bd}}^t P_{\text{dump}}^t = 0; \quad (14)$$

$$\text{SOC}^{\min} \leq \text{SOC}^t \leq \text{SOC}^{\max}; \quad (15)$$

$$\text{SOC}^t = \text{SOC}^{t-1} + \frac{E_{\text{B}}^t}{B_{\text{cap}}}; \quad (16)$$

$$E_{\text{B}}^t = (\eta_c P_{\text{bc}}^t - P_{\text{bd}}^t / \eta_d) \tau; \quad (17)$$

$$E^0 + \sum_{t=1}^T \eta_c P_{bc}^t \geq \sum_{t=1}^T \frac{P_{bd}^t}{\eta_d}. \quad (18)$$

式(11)和式(12)给出了电池充电和放电功率水平约束.如式(13)所示,电池在时刻 $t$ 处的操作具有排他性,即电池在每个时隙中仅可处于的充电模式或放电模式中的一种.如式(14)所定义,当时刻 $t$ 正在进行放电操作时,该时刻不会发生甩负荷功耗.式(15)给出了电池SOC限制在时刻 $t$ 的约束.使用式(16)和式(17),计算出每个时刻 $t$ 处的电池SOC水平.如式(18)所示,电池的总放电量应低于或等于初始电量水平( $E^0$ )和总充电量之和.

### 2.3 太阳能和风能的发电模型

为缓解当前的能源危机和环境污染问题,需要在住宅区域内集成可再生能源.如太阳能和风能等可再生能源取之不尽,且易于获取.本文中假定每个家庭都配备了太阳能和风能发电设备.太阳能辐射和风力是这些可再生能源的主要资源.风力涡轮机的输出功率主要由风速决定,可通过风电机组风功率曲线得出.其中设计参数为切入风速( $V_{ci}$ ),切出风速( $V_{co}$ )和额定风速( $V_r$ ).式(19)和式(20)给出了太阳能PV装置和风力涡轮机输出功率的数学模型.

$$P_{PV}^t = \eta_{PV} A_{PV} I_r^t [1 - 0.005(\text{Temp}_{out}^t - 25)]. \quad (19)$$

式中: $\eta_{PV}$ 和 $A_{PV}$ 为太阳能PV装置的能量转换效率和模组面积; $I_r^t$ 和 $\text{Temp}_{out}^t$ 为在时刻 $t$ 的太阳能辐射和外界气温.

$$P_W^t(V_w^t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq V_w^t \leq V_{ci}; \\ (A + BV_w^t + C(V_w^t)^2)P_R, & V_{ci} \leq V_w^t \leq V_r; \\ P_R, & V_r \leq V_w^t \leq V_{co}; \\ 0, & V_{co} \leq V_w^t. \end{cases} \quad (20)$$

式中: $V_w^t$ 为时刻 $t$ 处的风速; $P_R$ 为风力发电机额定输出功率, $A, B, C$ 为风力发电常量<sup>[13]</sup>.本文中考虑了以下风力涡轮机设计参数值: $V_{ci} = 3 \text{ m/s}$ ,  $V_{co} = 25 \text{ m/s}$ ,  $V_r = 12 \text{ m/s}$ .

## 3 多目标博弈论方法的计算程序

使用合作博弈论方法<sup>[15-16]</sup>来求解MOHEM模型.根据已有理论,博弈论的基本模型一般记为: $G = \{P, A, S, I, U\}$ .其中, $P$ 为博弈过程的参与者; $A$ 为参与者决策行为的集合; $S$ 为次序; $I$ 为博弈过程的信息; $U$ 为参与者的利益.本文模型中主要关注参与者 $P$ 、参与者的行为决策集合 $A$ 和参与者的利益 $U$ .

参与者:每个目标函数式(1)和式(2)指定为1名参与者,每个参与者均试图最大化其自身收益,即等效于每个目标函数最小化.本文将2个目标函数假定为2名不同的参与者,分别针对用户电费账单和电力企业的系统高峰负荷需求.

决策集合:上述参与者根据控制和约束式(3)~式(10)所作的决策集合.

参与者的利益:通过参与者之间的共同努力来确定的最优解集合.最终,通过谈判模型或以超准则为形式的协商,来得到最优折衷解.

合作博弈论的计算程序:首先,将 $k$ 个目标函数指定为数量为 $k$ 的参与者;其次,在博弈过程开始前,所有参与者应知道其自身的目标极值,这有助于参与者确定其最差数值.设 $X_i$ 为一个初始可行设计向量.选择常数乘数 $b_1, b_2, \dots, b_k$ ,以归一化 $k$ 个目标函数值:

$$b_1 f_1(X_i) = b_2 f_2(X_i) = \dots = b_k f_k(X_i) = M. \quad (21)$$

式中: $M$ 为归一化常数.现在,将目标函数表示为

$$F_j(X) = b_j f_j(X), j = 1, 2, \dots, k. \quad (22)$$

式中: $F_j(X)$ 为第 $j$ 个目标函数,其在博弈中被指定为第 $j$ 名参与者.此外,对每个目标函数 $F_j(X)$ 进行单独优化.将每个函数的最优数值和其他函数值构建为矩阵 $[P]$ :

$$[P] = \begin{bmatrix} F_1(\mathbf{X}_1^*) & F_2(\mathbf{X}_1^*) & \cdots & F_k(\mathbf{X}_1^*) \\ F_1(\mathbf{X}_2^*) & F_2(\mathbf{X}_2^*) & \cdots & F_k(\mathbf{X}_2^*) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ F_1(\mathbf{X}_k^*) & F_2(\mathbf{X}_k^*) & \cdots & F_k(\mathbf{X}_k^*) \end{bmatrix}. \quad (23)$$

在矩阵 $[P]$ 中,对角线数值表示每个目标函数的最优值.每个目标函数的最差数值 $F_{in}$ 定义为

$$F_{in} = \max_{j=1,2,\dots,k} \{F_i(\mathbf{X}_j^*)\}, i = 1, 2, \dots, k. \quad (24)$$

由于合作博弈论方法给出的是一组最优解,因此需要通过谈判模型或以超准则为形式的协商,来得到最优折衷解.根据该模型,所有参与者均通过各自的参考值进行谈判,并通过相互合作实现超准则数值的最大化.在本文中,所有参与者均取最差数值作为其参考值.假定参与者在超准则( $S$ )过程中以这些参考值为基础开始进行协商.超准则( $S$ )表示为

$$S = \prod_{i=1}^k \{F_{in} - F_i(\mathbf{X}_{opt}^*)\}; i = 1, 2, \dots, k. \quad (25)$$

式中: $\mathbf{X}_{opt}^*$ 为 $k$ 个目标函数的帕累托(pareto)最优解(最优折衷解).可通过任何合适的优化技术来求解超准则.由于提出的HEM模型被表示为一个混合整数问题,因此,使用MINLP对合作博弈论的超准则进行最大化.

## 4 仿真与分析

### 4.1 实验准备

实验通过3个不同案例(案例1:不集成RER和电池储能系统的HEM模型;案例2:集成RER但不集成电池储能系统的HEM模型;案例3:集成了RER和电池储能系统的HEM模型),以及每个案例中的6种不同场景,对提出的HEM模型进行性能评估.为证明提出模型的有效性,在6个不同场景中分别对每个案例进行分析.场景1~场景3单独对每个用户进行HEM优化,场景4~场景6则对所有用户同时进行HEM优化.在所有场景中,场景3和场景6为使用博弈论方法求解MOHEM优化问题.将所有案例和场景中的HEM模型均表示为混合整数问题<sup>[17]</sup>(MIP),通过优化求解器SCIP来求解MIP,SCIP为速度最快的非商业性MIP求解器,MATLAB接口OPTI工具箱提供了SCIP.

假定每个家庭均配备了2.4 kW屋顶太阳能PV设备,2 kW小型风力涡轮机装置,2.4 kWh电池系统,以及一些NSA,TSA等各种类型的家用电器<sup>[18]</sup>.电池储能系统的规格如表2所示.

表2 电池储能系统规格

场景	参数	额定值
场景1	电池容量	2.4 kWh
场景2	充电效率( $\eta_c$ )	85%
场景3	放电效率( $\eta_d$ )	95%
场景4	SOC限制	30%~90%
场景5	充电功率限制	额定容量的0%~20%
场景6	放电功率限制	额定容量的0%~20%

### 4.2 结果分析

场景1旨在单独对每个用户的电费账单进行成本管理,场景2则对每个智能家庭单独进行高峰负荷管理,场景3针对每个家庭同时进行成本管理和高峰负荷管理.前3个场景中,未直接对总累积电费账单和总系统负荷需求量进行优化,这些数值被计算为单个家庭的优化数值之和.表3给出了所有案例在前3个场景中的仿真结果.其中,粗体表示最显著值,从表3中可明显看出:场景1中每个用户的电费账单均得到了最小化,而场景2中每个家庭的峰值需求均得到削减,场景3代表基于博弈的MOHEM模型,给出了同时对每个家庭的个体电费账单和高峰负荷需求同时进行优化的结果.案例2与案例3的结果比较,证明了在每个家庭中集成电池储能系统的有效性.如案例3在场景3中的仿真结果所示,用户1~用户5每月

分别节约了 68.1%, 54.0%, 48.2%, 44.7% 和 72.1% 的电费支出, 得益于其家庭中集成了可再生能源和电池储能系统, 个体高峰需求也得到了显著降低。

表 3 提出的 HEM 模型对每个用户单独进行优化的仿真结果

模型	场景	每用户电费账单/(元/月)					用户个体峰值/kW					总电费账单/(元/月)	系统峰值负荷/kW
		C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5		
案例 1	S1	125.45	131.83	213.11	138.01	105.03	3.1	3.5	6.1	4.1	3.7	713.43	14.4
	S2	126.87	144.74	224.85	149.26	105.57	2.7	3.3	3.5	1.7	3.7	751.29	11.9
	S3	<b>125.45</b>	<b>131.83</b>	<b>213.11</b>	<b>146.57</b>	<b>105.03</b>	<b>2.7</b>	<b>3.3</b>	<b>3.5</b>	<b>1.7</b>	<b>3.7</b>	721.99	13.3
案例 2	S1	47.53	74.16	122.95	85.83	39.32	3.0	4.2	6.0	4.1	2.8	369.79	16.3
	S2	96.06	110.19	177.72	112.02	83.15	1.8	3.3	3.5	1.7	2.8	579.14	9.9
	S3	<b>47.55</b>	<b>74.16</b>	<b>123.01</b>	<b>91.32</b>	<b>39.33</b>	<b>1.9</b>	<b>3.3</b>	<b>3.5</b>	<b>1.7</b>	<b>2.8</b>	375.37	11.5
案例 3	S1	39.27	60.43	110.20	70.21	29.25	2.7	4.3	6.0	4.5	2.8	309.36	16.1
	S2	58.79	79.26	137.10	105.99	42.15	1.4	2.8	2.9	1.6	2.3	423.29	8.9
	S3	<b>40.05</b>	<b>60.58</b>	<b>110.44</b>	<b>80.99</b>	<b>29.28</b>	<b>1.4</b>	<b>2.8</b>	<b>3.0</b>	<b>1.6</b>	<b>2.3</b>	321.34	9.8

场景 4~场景 6 分别是场景 1~场景 3 的扩展。后 3 个场景中, 直接对总累积电费账单和总系统高峰负荷需求进行优化。表 4 给出了 3 个不同案例在场景 4~场景 6 中的仿真结果。从案例 3 和案例 1 在场景 6 中的仿真结果可知: 得益于集成了 RER 和电池储能系统, 与案例 1 相比, 案例 3 的用户总累积月度电费账单和系统高峰负荷分别降低了 57.1% 和 5.7%。

在整体分析中, 场景 1 和场景 4 主要被考虑为成本管理(即用户电费支出最小化), 其会造成系统负荷曲线中出现新的高峰。场景 2 和场景 5 被设计为高峰负荷管理(即高峰负荷削减), 但其会造成用户月度电费账单的额外增长。最后, 场景 3 和场景 6 被表示为多目标问题, 同时对用户电费账单和高峰负荷进行最小化。这 2 个场景中, 用户和电力企业都将获得收益。在多用户环境中, 从实践角度出发, 提出的 HEM 模型在场景 6 中的性能优于场景 3。在案例 3 的多目标场景(即 S3 和 S6)中, 得益于每个家庭中集成的 RER 和电池储能系统, 所有用户的月度电费账单均降低了超过 50%, 且电力企业的高峰负荷值也显著降低。

表 4 提出的 HEM 模型对所有用户同时进行优化的仿真结果

模型	场景	每用户电费账单/(元/月)					用户个体峰值/kW					总电费账单/(元/月)	系统峰值负荷/kW
		C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5		
案例 1	S4	125.45	131.83	213.11	138.01	105.03	3.1	3.6	6.1	4.1	3.7	713.43	16.24
	S5	137.72	141.61	238.96	148.21	111.49	3.4	3.4	4.1	3.7	3.9	777.99	7.4
	S6	133.57	134.84	221.58	141.83	109.50	3.3	4.0	6.0	4.0	4.5	741.32	7.4
案例 2	S4	47.53	74.15	122.95	85.83	39.33	3.0	4.0	5.5	4.1	2.8	369.79	16.1
	S5	87.51	92.68	158.14	104.51	73.62	3.5	3.6	4.6	3.9	4.5	516.46	7.2
	S6	48.41	75.71	124.30	89.16	40.36	2.5	3.4	5.2	4.0	3.1	377.94	7.2
案例 3	S4	39.27	60.43	110.20	70.21	29.25	2.4	4.3	5.7	4.5	2.8	309.36	15.6
	S5	66.18	84.82	161.59	91.76	43.60	3.2	3.3	3.4	3.2	3	447.95	4.7
	S6	42.03	61.96	111.16	72.06	31.09	2.8	3.3	4.6	4.2	4.0	318.30	7.0

为进行比较, 使用加权和方法(WSM)求解提出的 MOHEM 模型。WSM 通过加权因子, 将多目标问题转换为单目标问题, 向 2 个目标分配相等权重(即  $w_1 = 0.5, w_2 = 0.5$ ), 使用 MIP 求解器来求解单目标问题。表 5 为分别使用 WSM 与提出的多目标博弈论(MOAT)方法时的相应仿真结果。从结果比较中可知: 提出的 HEM 模型结合 MOAT 方法, 能够给出优于 WSM 的折衷解。

### 4.3 讨论

为了研究参数间的约束情况, 以储能系统参数的约束为研究对象, 研究充电功率限制( $P_{bc}^{\min}, P_{bc}^{\max}$ ), 放电功率限制( $P_{bd}^{\min}, P_{bd}^{\max}$ ), 以及荷电状态(SOC), 以案例 3 的场景 3 为例, 用户 2 和用户 5 的电池充/放电和 SOC 曲线如图 2 所示。从图 2 可以看出: 从整体时隙看, 两用户的储能系统参数有着相似的变化情况, 由于案例 3 中集成了 RER 和电池储能系统, 其电池荷电状态水平较高。

表 5 提出的多目标博弈论方法(MOGT)与加权和方法(WSM)的比较

模型	场景	方法	每用户电费账单/(元/月)					用户个体峰值/kW					总电费账单/ (元/月)	系统峰值 负荷/kW
			C1	C2	C3	C4	C5	C1	C2	C3	C4	C5		
案例 1	S3	MOGT	125.45	131.83	213.11	146.57	105.03	2.7	3.3	3.5	1.7	3.7	721.99	13.3
		WSM	125.45	131.88	217.13	147.31	105.03	2.7	3.3	3.5	1.8	3.7	726.80	12.4
	S6	MOGT	133.57	134.84	221.58	141.83	109.50	3.3	4.0	6.0	4.0	4.5	741.32	7.4
		WSM	136.95	135.23	229.16	144.78	109.11	3.6	3.3	4.6	3.9	3.9	755.23	7.4
案例 2	S3	MOGT	47.55	74.16	123.01	91.32	39.33	1.9	3.3	3.5	1.7	2.8	375.37	11.5
		WSM	47.79	74.20	123.09	92.68	39.33	1.9	3.3	3.5	1.7	2.8	377.09	10.3
	S6	MOGT	48.41	75.71	124.30	89.16	40.36	2.5	3.4	5.2	4.0	3.1	377.94	7.2
		WSM	49.67	75.59	126.94	90.48	40.64	3.0	3.3	4.3	4.1	3.3	383.32	7.2
案例 3	S3	MOGT	40.05	60.58	110.44	80.99	29.28	1.4	2.8	3.0	1.6	2.3	321.34	9.8
		WSM	41.28	61.01	112.61	78.07	29.27	1.6	2.8	3.0	1.7	2.3	322.24	10.1
	S6	MOGT	42.03	61.96	111.16	72.06	31.09	2.8	3.3	4.6	4.2	4.0	318.30	7.0
		WSM	44.45	62.26	114.73	75.06	31.63	3.9	2.8	4.6	4.0	3.5	328.13	7.3

图 3 给出了本文合作博弈论方法的收敛性能,可以看出:以案例 2 为例,计算机 C1~C5 的账单成本在大约 200 次迭代之后,账单成本区域平缓,达到了均衡状态.

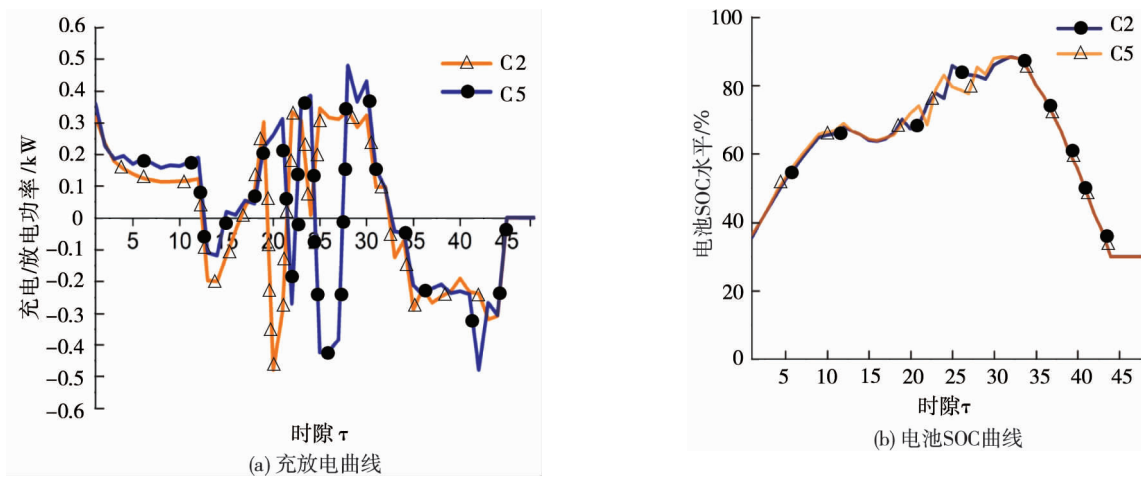


图 2 不同时隙下约束参数曲线

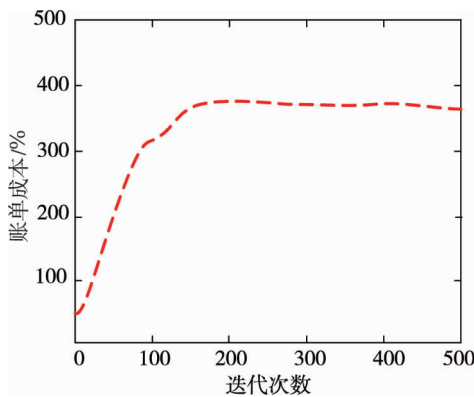


图 3 案例 2 的 C1~C5 账单成本变化

## 5 结论

1) 3 个不同案例的仿真结果证明了提出的 HEM 模型与 RER 和电池储能系统相结合的有效性.与单



目标方法相比,提出的基于博弈论的 HOHEM 模型能够生成更优的解。

2)通过经济学分析,确认了每个用户的投资收益,几乎所有住宅用户均可在项目生命周期不过半的情况下收回投资,且电力企业的高峰需求得到了显著削减。仿真结果证明:提出的模型与 RER 和电池储能系统相结合,能够实现最短的现金回收期,使用户和电力企业获得更多收益。

#### 参考文献:

- [1] 牛丽肖.面向家庭能源管理平台的用电策略研究[D].北京:中国科学院大学,2014.
- [2] 张延宇,曾鹏,臧传治.智能电网环境下家庭能源管理系统研究综述[J].电力系统保护与控制,2014,42(18):144-154.
- [3] 马吉明,张楚汉,朱守真,等.水电对风能太阳能间歇性电力的支持与协调运行[J].中国科学,2015,45(10):1089-1097.
- [4] Chavali P, Yang P, Nehorai A. A distributed algorithm of appliance scheduling for home energy management system[J]. IEEE Trans. Smart Grid, 2014, 5(1): 282-290.
- [5] Liu D, Xu Y, Wei Q, et al. Residential energy scheduling for variable weather solar energy based on adaptive dynamic programming[J]. IEEE/CAA Journal Automatica. Sinica, 2018, 5(1): 36-46
- [6] 徐箭,金承旭,廖思阳.考虑空调参数识别的家居设备建模与优化[J].电测与仪表,2019,56(7):50-54.
- [7] 祁兵,夏琰,李彬,等.基于边缘计算的家庭能源管理系统:架构、关键技术及实现方式[J].电力建设,2018,39(3):33-41.
- [8] 杨坤豪.基于 PV 发电量及负荷预测的家庭能源管理调度算法研究[D].成都:电子科技大学,2019.
- [9] Shakouri H, Kazemi A. Multi-objective cost-load optimization for demand side management of a residential area in smart grids [J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 32: 171-180.
- [10] 张延宇.智能电网环境下家庭能源管理系统调度算法研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(18):144-154.
- [11] 滕德云,滕欢,刘鑫,等.考虑多个分布式电源接入配电网的多目标无功优化调度[J].电测与仪表,2019,56(13):39-44.
- [12] 陈亮,黄亚庆,刘丹.基于博弈分析的产品多目标设计问题的求解方法[J].中国工程机械学报,2015,13(3):212-216.
- [13] Setlhaolo D, Xia X. Combined residential demand side management strategies with coordination and economic analysis[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 79(3): 150-160.
- [14] 王珑,王进,龚晓琴,等.基于用户满意度的家庭能量管理系统协调优化调度[J].电力学报,2019,34(2):101-108.
- [15] 朱怀念,张成科.基于博弈论方法的线性马尔可夫跳变系统  $H_{\infty}$  控制[J].信息与控制,2013,42(4):423-429.
- [16] Hu Y, Rao S S. Game-theory approach for multi-objective optimal design of stationary flat-plate solar collectors [J]. Engineering Optimization, 2009, 41(11): 1017-1035.
- [17] 郭清元,吴杰康,莫超,等.基于混合整数二阶锥规划的新能源配电网电压无功协同优化模型[J].中国电机工程学报,2018,38(5):1385-1396.
- [18] Arun S, Selvan M. Intelligent residential energy management system for dynamic demand response in smart buildings[J]. IEEE Systems Journal, 2018, 12(2):1329-1340.