

DOI: 10.7667/PSPC171763

基于分时电价的家庭智能用电设备的运行优化

史林军¹, 史江峰¹, 杨启航², 张勇³, 陈少哺³, 吴峰¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏兴力建设集团有限公司, 江苏 南京 211100;
3. 国网江苏省电力有限公司泰州供电分公司, 江苏 泰州 225300)

摘要: 未来家庭用电作为智能电网的一部分, 研究家庭智能用电设备的优化运行具有重要的意义。首先建立了未来典型家庭智能用电设备的数学模型。然后基于分时电价, 提出一种以经济性和用户舒适度为目标的未来家庭中智能用电设备的优化运行模型, 便于用户制定出满足自身需要的用电计划。最后以某典型家庭用户为例, 通过建立典型日仿真场景, 采用遗传算法对家庭智能用电设备的运行进行优化, 仿真结果表明建立的优化模型的有效性。

关键词: 分时电价; 智能用电设备; 优化运行; 遗传算法

Optimal scheduling of intelligent household electrical appliances based on time-of-use power price

SHI Linjun¹, SHI Jiangfeng¹, YANG Qihang², ZHANG Yong³, CHEN Shaobu³, WU Feng¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Jiangsu Xingli Construction Group Co., Ltd, Nanjing 211100, China; 3. Taizhou Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Company, Taizhou 225300, China)

Abstract: As a part of the smart grid, it is of great significance to study the optimal scheduling of intelligent household electrical appliances in future household. Firstly, intelligent household electrical appliances mathematical models are established for the future typical household. Then, based on Time-Of-Use (TOU) power price, an optimal scheduling model of intelligent household electrical appliances is proposed, which aims are economy and user comfort. It is convenient for users to make their plans of electricity to meet their own needs. Finally, a typical home user is taken as an example. Through establishing the typical day of simulation scene, the genetic algorithm is used to optimize the scheduling of the intelligent household electrical appliances, and the simulation results show the effectiveness of the established optimal scheduling model.

This work is supported by the Natural Science Foundation for the Excellent Youth Scholar of China (No. 51422701).

Key words: time-of-use (TOU) power price; intelligent household electrical appliances; optimal scheduling; genetic algorithm (GA)

0 引言

智能电网技术正在高速发展^[1], 电网公司和用户之间也从原有简单的电能单向传输逐渐转变为电能双向传输以及信息互动^[2]。作为发、输、配、用电的一部分, 用户不再是原来被动的接收端, 而应成为积极的电网互动参与者^[3]。家庭用户作为智能电网参与者之一, 在舒适度和经济性的制约下, 根据电网和实际用电情况, 积极参与电网的需求侧响应, 对电网安全稳定运行具有重要的意义。

家庭用户参与电网互动的关键是根据电网情况, 如实时电价以及用户的偏好等, 合理安排参与电网的互动, 对家庭用电设备的运行进行优化^[4-6]。

针对家庭智能用电设备的研究已有不少成果。文献[6]在考虑了家居能量管理系统的基础上, 建立了分时电价环境下以最小化用户电能成本与最小化峰谷差为目标的家居设备优化运行决策模型, 并综合考虑多类设备以及分布式新能源的协调, 验证了控制用户电能成本及减小峰谷差方面的作用, 但没有考虑用户满意度问题。文献[7-8]在考虑分布式新能源与电池的基础上分别建立了线性规划模型及混合整数线性规划模型对家居负荷进行优化, 以达到

最小化用户电能成本的目标。文献[9]将家居可控设备描述成具有灵活启动时间和固定电能消耗的模型。文献[10-11]分别考虑了分时电价和实时电价环境下的家居设备优化。文献[12]采用具有时段限制和能量限制的负荷模型来描述设备。文献[13]根据是否有功率调节弹性和是否可中断将设备分成四类,研究了分时电价下各类设备模型的表现,但未细化到具体设备。文献[14]开发了一种适用于家庭智能用电的智能控制器,还搭建了一套演示系统模拟家庭智能用电,并测试了智能控制器的性能。文献[15-17]在满足不同的条件下,建立不同的优化模型,实现对负荷的优化调度。文献[18]对多种电价机制下含光伏发电装置和固定电价机制下无光伏发电装置的家庭负荷调度问题的经济性进行了比较和分析,表明了实时电价更具优势。

上述研究或涉及设备不全,或模型比较简化,还有许多待研究之处,本文针对家庭智能用电设备的优化运行展开研究。首先,在进行家用电器分类的基础上,建立了典型家庭用电设备的数学模型;然后基于分时电价,提出一种以经济性和用户舒适度为目标的未来家庭中智能用电设备的优化运行模型,目标是制定出一种满足家庭用户自身需要的用电计划。最后以某典型家庭用户为例,通过建立典型日仿真场景,采用遗传算法对家庭智能用电设备的运行进行优化,仿真结果表明本文所建立的优化模型的有效性。

1 家庭智能用电设备负荷特性分析

为方便描述,本文以一天 24 h 作为一个周期 T ,一个周期内划分为 48 个时段,每个时段 30 min,各家庭用电设备在这 30 min 内运行状态不改变。为了方便后续工作特性的描述和模型的搭建,引入 0-1 辅助变量 S_a^t 作为开关量,值为 1 表示用电设备 a 在 t 时段处于工作状态,值为 0 表示用电设备 a 在 t 时段未工作。

1.1 基本属性

定义变量 q^t 为所有设备在子时段 t 中消耗的电能, q_a^t 为设备 a 在子时段 t 中消耗的电能,于是有^[7-9]

$$q^t = \sum_{a \in A} q_a^t \quad (1)$$

一般家用电器都有其功率范围,转化为数学语言可用式(2)表示^[8]。

$$q_a^{\min} \cdot s_a^t \leq q_a^t \leq q_a^{\max} \cdot s_a^t \quad (2)$$

有些设备的工作任务可以用时间来衡量,即工作一定时间就可以表示工作已完成。若设备 a 需要

H_a 个时段完成工作, H_a 表示不可中断设备最小连续运行时段数。引入两个定量 t_a^{start} 和 t_a^{end} 表示设备的起停时刻,设备 a 在时刻 t_a^{start} 开始运行,在时刻 t_a^{end} 停止运行。

假设所有设备在优化周期内都必须完成任务,所以有以下约束,如式(3)所示^[9]。

$$\sum_{t=t_a^{\text{start}}}^{t_a^{\text{end}}} s_a^t = H_a \quad (3)$$

另外有些设备工作时间不能确定,工作时间的长短会受一些内外在因素影响,但是其消耗的总能量变化不大,例如取暖器、热水器等,可使用最小电能消耗 Q_a^{\min} 来表征其运行特点。当该设备 a 的电能消耗达到此阈值时,即可认为设备工作完成,表达式如式(4)所示^[9]。

$$\sum_{t=t_a^{\text{start}}}^{t_a^{\text{end}}} q_a^t \geq Q_a^{\min} \quad (4)$$

定义 E_a^t 为储能设备 a 在 t 时段能量储存大小,在每个周期开始之前,必须保证储能设备具有一定量的储能,记为 E_a^{start} ,以免影响本周期的优化使用,于是有^[9]

$$E_a^{\text{start}} > E_a^{\text{target}} \quad (5)$$

式(1)一式(5)用数学语言对家庭用电设备的基本属性进行了描述。但是对于大部分家庭用电设备来说,这还不能完整描述出它们属性,需根据它们的运行特点,补充用电设备的特性属性,如下文对用电设备属性的补充描述。

1.2 功率可调与不可调属性

有些设备一旦启动,在工作期间将始终按照其额定功率进行工作,例如电灯、电视机、洗衣机等。而有些设备却可以进行功率调节,例如电风扇、空调以及电热水器等,其特性的描述如式(6)所示^[13]。

$$q_a^{\min} \leq q_a^N \leq q_a^{\max} \quad (6)$$

式中: q_a^N 为设备额定能耗; q_a^{\max} 、 q_a^{\min} 分别表示运行功率的上限和下限。对于功率不可调设备,则有 $q_a^{\min} = q_a^{\max}$ 。

1.3 直接储能与间接储能属性

储能设备可以分为直接储能和间接储能,直接储能设备有蓄电池等,间接储能设备有热水器等。

直接储能设备一般是以直接转化为电能的化学能形式储存,记设备 a 在 t 时段的化学能为 E_a^t ,以电池为例,其特性可用式(7)^[14]所示的函数来描述。

$$E_a^t = f(q_a^t, E_a^t) \quad (7)$$

对于这种设备还需考虑其寿命,既不能过分放电也不能过分充电,否则将会大大折损其寿命,其

约束如式(8)所示。

$$E_a^{\min} \leq E_a^t \leq E_a^{\max} \quad (8)$$

间接储能一般是指将电能以非化学能的形式储存,如热能。该类的用电设备有电热水器、暖通空调系统(HVAC)、冰柜等。它们将电能以其他能量的形式储存,必要的时候可以作为能源直接使用。与直接储能设备类似,可用式(9)描述其储能特性,其约束量如式(10)所示^[14]。

$$E_a^t = f(q_a^t, \theta_a^t) \quad (9)$$

$$\theta_a^{\min} \leq \theta_a^t \leq \theta_a^{\max} \quad (10)$$

式中, θ_a^t 表示非电能量储存状态。

1.4 可转移与不可转移属性

可转移负荷是指用电设备并不是必须要在某个特定时段开启,如洗衣机、洗碗机等。而不可转移负荷是指设备在某时间段内必须开启,否则将影响用户正常生活,如电灯、电视机等。

对于可转移负荷,可在其可工作时段内合理安排其工作时间,以此来达到最优的目的。式(11)^[13]描述了可转移与不可转移属性。

$$\sum_{t=t_a^{\text{start}}}^{t_a^{\text{start}}+\lambda_a} s_a^{\tau} \geq 1, 0 \leq \lambda_a \leq t_a^{\text{end}} - t_a^{\text{start}} - H_a \quad (11)$$

式中, λ_a 为用户提前设置的最大延迟时间,当 $\lambda_a = 0$ 时表示此用电设备不可转移。

1.5 可中断与不可中断属性

有些设备一旦启动就必须完整的运行下去,直到完成任务,否则将严重地降低其服务质量,例如洗衣机,这样的用电设备称为不可中断设备。而有些设备对此则并无大碍,它们可以在停止一段时间后再次启动,直接可以循环反复,直到任务完成,如加湿器、空调等,称之为可中断负荷。

对于不可中断设备,其属性如式(12)^[13]所示。

$$\sum_{t=\tau+1}^{\tau+H_a} s_a^t \geq H_a \cdot (s_a^{\tau+1} - s_a^{\tau}), \tau \in [t_a^{\text{start}} - 1, t_a^{\text{end}} - H_a] \quad (12)$$

式(12)保证了设备如果在 $t+1$ 时刻启动,那么至少持续运行 H_a 个时段才能够停止,而对于可中断设备则不需要加此约束。

2 典型家庭智能用电设备数学模型

根据家用智能设备工作属性,按照照明及娱乐设备、清洗类设备、电池类设备、供暖、通风和空调系统(HAVC)设备等分别建立其数学模型。

2.1 照明及娱乐类设备

照明以及娱乐类设备,由于对它们的需求具有即时性,且在需求时间段,一般需要保持稳定运行,否则将会影响服务质量。所以这一类设备具有功率

不可调、不可转移和不可中断的特性,可以用式(13)对其工作特性进行描述^[9,13]。

$$\begin{cases} q_a^{\min} \cdot s_a^t \leq q_a^t \leq q_a^{\max} \cdot s_a^t \\ q_a^{\min} = q_a^N = q_a^{\max} \\ s_a^t = 0, \forall t \notin [t_a^{\text{start}}, t_a^{\text{end}}] \\ \sum_{t=\tau+1}^{\tau+H_a} q_a^t \geq Q_a^{\min}, \tau \in [t_a^{\text{start}} - 1, t_a^{\text{end}} - H_a] \\ \sum_{t=t_a^{\text{start}}}^{t_a^{\text{start}}+\lambda_a} s_a^{\tau} \geq 1, \lambda_a = 0 \end{cases} \quad (13)$$

2.2 清洗类设备

洗衣机和洗碗机这类清洗类设备,人们对它们的需求不一定是即时的,一般只需在某一个时间点之前完成任务即可,但是它们一旦启动就必须至工作结束才可以停止。但它们可以根据工作量的需求,调节运行档次。这一类设备具有功率可调性、可转移性和不可中断性,可以用式(14)对其工作特性进行描述^[9,13]。

$$\begin{cases} q_a^{\min} \cdot s_a^t \leq q_a^t \leq q_a^{\max} \cdot s_a^t \\ s_a^t = 0, \forall t \notin [t_a^{\text{start}}, t_a^{\text{end}}] \\ \sum_{t=\tau+1}^{\tau+H_a} s_a^t \geq H_a \cdot (s_a^{\tau+1} - s_a^{\tau}), \tau \in [t_a^{\text{start}} - 1, t_a^{\text{end}} - H_a] \\ \sum_{t=t_a^{\text{start}}}^{t_a^{\text{start}}+\lambda_a} s_a^{\tau} \geq 1, 0 \leq \lambda_a \leq t_a^{\text{end}} - t_a^{\text{start}} - H_a \end{cases} \quad (14)$$

2.3 电池类设备

电池类设备既有负荷性质,也有储能性质。若蓄电池装有自动控制装置,在充放电过程中根据需要可以调节功率大小,甚至可以直接中断。因此电池设备具有功率可调性、直接储能性、可转移性、可中断性,用式(15)对其工作特性进行描述^[14,19]。

$$\begin{cases} b_a^{t+1} = K_{\text{CWDS}}^1 q_a^t + (1 - K_{\text{CWDS}}^2) b_a^t, \\ \forall t \in [t_a^{\text{start}}, t_a^{\text{end}} - 1] \\ K_a^{\min} B_{\text{capacity}} = E_a^{\min} \leq b_a^t \leq E_a^{\max} = K_a^{\max} B_{\text{capacity}}, \\ \forall t \in [t_a^{\text{start}}, t_a^{\text{end}}] \\ q_a^{\min} \cdot s_a^t \leq q_a^t \leq q_a^{\max} \cdot s_a^t, q_a^{\min} \leq q_a^{\max} \\ s_a^t = 0, \forall t \notin [t_a^{\text{start}}, t_a^{\text{end}}] \\ E_a^{\text{end}} \geq E_a^{\text{target}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: B_{capacity} 为电池容量; b_a^t 为蓄电池 a 在时段 t 电池的电能储存量; K_{CWDS}^1 为蓄电池充电效率; K_{CWDS}^2 为电池漏电系数; E_a^{end} 为蓄电池充电时电量; E_a^{target} 为蓄电池最小保存电量。

2.4 暖通空调和热水系统设备

暖通空调(HVAC)和热水系统设备具有间接储能属性。定义 θ_{in}^t 为室内温度、 θ_{out}^t 为室外的温度、 R_{eq} 为室内等效热阻,用电设备功耗 q_a^t 与室温 θ_{in}^t 之间有以下关系,如式(16)所示^[19]。

$$\theta_{in}^{t+1} = \theta_{in}^t \cdot e^{-\Delta/\xi} + R_{eq} \cdot q_a^t \cdot K_{HVAC} \cdot (1 - e^{-\Delta/\xi}) + \theta_{out}^t \cdot (1 - e^{-\Delta/\xi}) \quad (16)$$

式中: K_{HVAC} 为电能转化系数; Δ 表示间隔时段数,取1;系数 $\xi = M_{air} \cdot C \cdot R_{eq}$ 为常数, M_{air} 是室内的空气质量指数; C 表示标准大气压下的空气热容量,取0.525 kWh/°C。

这类设备可以将电能转化为热能等形式进行储存,然后被用户所利用。这类设备在使用过程中,改变启用时间以及中途中断是可以被用户所接受的,所以具有可中断性、可转移性,用式(17)对其工作特性进行描述^[19]。

$$\begin{cases} \theta_{in}^{t+1} = \theta_{in}^t \cdot e^{-\Delta/\xi} + R_{eq} \cdot q_a^t \cdot K_{HVAC} \cdot (1 - e^{-\Delta/\xi}) + \theta_{out}^t \cdot (1 - e^{-\Delta/\xi}), \forall t \in [t_a^{start}, t_a^{end} - 1] \\ \theta_a^{min} \leq \theta_{in}^t \leq \theta_a^{max}, [t_a^{start}, t_a^{end}] \\ q_a^{min} \cdot s_a^t \leq q_a^t \leq q_a^{max} \cdot s_a^t, q_a^{min} < q_a^{max} \\ s_a^t = 0, \forall t \notin [t_a^{start}, t_a^{end}] \\ \sum_{\tau=t+1}^{\tau+H_a} s_a^\tau \geq H_a \cdot (s_a^{\tau+1} - s_a^\tau), \tau \in [t_a^{start} - 1, t_a^{end} - H_a] \\ \sum_{t=t_a^{start}}^{t_a^{start} + \lambda_a} s_a^t \geq 1, 0 \leq \lambda_a \leq t_a^{end} - t_a^{start} - H_a \end{cases} \quad (17)$$

3 家庭智能用电设备优化运行模型

大部分家庭中都是以电费最小为目标来调整各个用电设备的使用时间,以达到经济最优的目的,其目标函数如式(18)所示。

$$\text{Min Cost} = \sum_{a=1}^n \sum_{t=1}^{24} (q_a^t \cdot r^t) \quad (18)$$

式中, r^t 为 t 时段电价。

但有时改变用电设备使用时间会给生活带来一定的影响,严重的还会降低生活品质。随着经济的发展,人们生活水平的日益提高,越来越多的人追求生活的品质。当用电费用在可接受的范围内时,家用设备使用是否舒适成为了第一位。

因此,本文提出一种可描述家庭用电设备舒适度的模型,并在此基础上进行优化。舒适度模型具

体如下:各用电设备有其最舒适的使用时间,设舒适度在最大舒适度时刻为1,距离越远,舒适度越低,且以反比例函数形式衰减,即 t 时刻舒适度如式(19)所示。

$$C^t = \frac{b_c}{b_c + |\Delta t|} \quad (19)$$

式中: Δt 为时刻 t 与最大舒适度时刻 t_{max} 的最小时间间隔; b_c 为常数,与家庭用电设备运行时长有关。运行时长越长,则 b_c 越大。文中 b_c 取值为1~5。

在一个家庭中,人们对全部用电设备舒适度的满意度可以用平均舒适度水平表示,如式(20)所示。

$$\text{Comfort} = \frac{\sum_{a=1}^n \sum_{t=1}^{24} (C_a^t \cdot s_a^t)}{\sum_{a=1}^n \sum_{t=1}^{24} s_a^t} \quad (20)$$

式中: C_a^t 表示设备 a 在 t 时段运行的舒适度; s_a^t 表示设备 a 在 t 时段的运行状态。

当用户以最舒适为目标对用电设备进行优化时,其目标函数如式(21)所示。

$$\text{Max (Comfort)} \quad (21)$$

基于为用户选择性多样化的考虑,引入惩罚函数,将舒适度转化为成本加入到式(18)中。用户可根据自身的需要,合理地设定惩罚函数参数,得到最满意的用电优化方案。设用户期望舒适度为 C_{exp} ,惩罚费用如式(22)所示。

$$e_a^t = (C_{exp} - C_a^t) \cdot s_a^t \cdot k \quad (22)$$

式中: e_a^t 表示设备 a 在 t 时段的惩罚费用; k 为比例系数。

为了同时兼顾经济性和舒适度,将式(22)所示的舒适度惩罚函数放入以经济性为目标的目标函数式(18)中,即目标函数如式(23)所示。

$$\text{Min Cost} = \sum_{a=1}^n \sum_{t=1}^{24} (q_a^t \cdot r^t) + (C_{exp} - C_a^t) \cdot s_a^t \cdot k \quad (23)$$

在家庭智能用电设备的优化运行模型中,根据各家用电器具体的性质,采用典型设备的数学模型作为约束条件,对设备的运行优化进行部分合理的限制。

4 算例分析

本文中洗衣机、洗碗机、吸尘器、热水器等作为可调度智能用电设备进行优化运行仿真实验。为方便仿真,对家庭用电设备进行较为理想化的假设和简化,设备运行时均已额定功率运行且每个时段保持连续运行,饮水机、热水器等忽略其散热损耗,家庭用电设备运行时间、功率等信息来自文献[20],如表1所示。

表 1 可调度设备基本信息

Table 1 Information of dispatchable household appliances

可调度设备	可运行时间	功率/kW	最小运行时长/h	可否中断
洗衣机	0:00~24:00	0.6	2	N
洗碗机	0:00~24:00	2.4	2	N
吸尘器	7:00~22:00	1.6	2	Y
加湿器 1	0:00~6:00	0.4	2	Y
加湿器 2	8:00~14:00	0.4	2	Y
加湿器 3	16:00~22:00	0.4	2	Y
饮水机 1	5:00~8:00	1.5	1	Y
饮水机 2	16:00~21:00	1.5	1	Y
熨斗	17:00~24:00	2	1	N
热水器	0:00~24:00	3.5	4	Y
空调 A	7:00~21:00	3	8	Y
空调 B	21:00~次日 7:00	1.5	5	Y
电烤箱	7:00~23:00	3.2	2	Y

注：加湿器 1、2、3，饮水机 1、2 均表示同一台设备不同的运行时间段。

4.1 以经济性为目标的运行优化

仿真分析采用国内大城市已经广泛实施的分时电价，具体价格信息如表 2 所示^[5-6]。

从表 2 中可见，电价在晚上 19:00 至 22:00 用电高峰期间之间达到了尖峰值，在 0:00 至 6:00 用电低谷期间只有平时的 33%。从电价上看，对家用电器进行优化来节省电费是有较大空间的。

表 2 分时电价信息

Table 2 Information of TOU power price

	时段划分	电价 P_t /元
尖时段	19:00~21:59	0.9
峰时段	9:00~11:59 15:00~18:59	0.7
平时段	6:00~8:59 12:00~14:59 22:00~23:59	0.5
谷时段	00:00~5:59	0.3

据调查，平时一个普通家庭可调度的用电设备使用时间大致如图 1 所示^[5-6,10-11]。

从图 1 中可知，大部分家用电器使用时间都集中在 17:00 至 21:00 的用电高峰时期，经式(20)计算，虽然舒适度为 0.84，但是这段时间内电价相对较高，经计算总的电费为 47.71 元，可通过优化降低用电量。

以式(18)为目标函数，即以经济性为目标，采用遗传算法对家庭用电设备逐一进行优化。以用电设备启动时间为决策变量，将每天分为 48 个时段，以用电费用函数的倒数为适应度函数。选择过程根据个体适应度函数值的大小，采用轮盘赌选择方式，越大的被选中的概率越大。若个体不符合运行时间约束条件将直接被淘汰，然后重新进行补充挑选，交叉和变异过程分别采用单点交叉和单点变异法，经过一定概率的单点交叉和变异，逐步找到最佳个体。

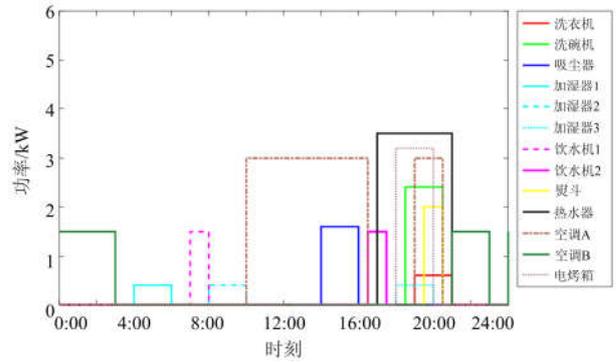


图 1 未优化前家庭用电设备运行图

Fig. 1 Scheme of household appliances before optimization

遗传算法相关参数如表 3 所示。选取种群规模为 150，交叉率为 0.8，变异率为 0.03，在迭代 250 次后终止迭代。

表 3 遗传算法相关参数

Table 3 Parameters of genetic algorithm (GA)

参数名称	参数值
种群 N	150
交叉率 P_c	0.8
变异率 P_m	0.03
最大迭代次数 N_{max}	250

经过遗传算法优化后的用电设备运行时段如图 2 所示。各可调度设备在自身可调整时段使用时间被安排到相对电价较低的时段。经过优化，总电费为 30.55 元，节省了 17.16 元，费用节省达到了 36%。

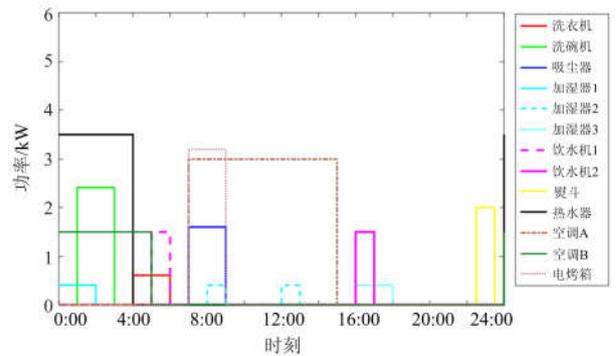


图 2 经过优化后家庭用电设备运行图

Fig. 2 Scheme of household appliances after optimization

4.2 以舒适度为目标的运行优化

由图 2 可见，在经济最优的目标之下，虽然将用电费用降到了最低，但是大部分用电设备工作时间都在半夜或者工作时间，给生活带来了一定的影响，降低了生活品质。利用式(20)计算得到的舒适度仅为 0.56。

随着经济水平的发展, 人们生活水平的日益提高, 越来越多的人追求生活的质量, 家用设备使用是否舒适成为了第一位。

因此, 在本文所提出的舒适度模型的基础上, 结合实际案例, 以式(21)为目标函数, 进行仿真分析。用户可以根据自身的习惯, 设定各用电设备的最大舒适度时刻, 如表 4 所示。

表 4 各家用电器最大舒适度时刻

Table 4 Time of the best comfort of household appliances

可调度设备	可运行时间	最大舒适度时刻
洗衣机	0:00~24:00	20:00
洗碗机	0:00~24:00	19:00
吸尘器	7:00~22:00	14:00
加湿器 1	0:00~6:00	5:00
加湿器 2	8:00~14:00	12:00
加湿器 3	16:00~22:00	17:00
饮水机 1	5:00~8:00	7:00
饮水机 2	16:00~21:00	17:00
熨斗	17:00~24:00	20:00
热水器	0:00~24:00	18:00
空调 A	7:00~21:00	13:00
空调 B	21:00~次日 7:00	21:00
电烤箱	7:00~23:00	20:00

经过优化后各用电设备运行时段图如图 3 所示。虽然利用式(20)计算后, 舒适度达到了 0.89, 但是用电费用却达到了 46.65 元, 这与未优化之前相比未有明显的变化, 远远不能满足人们的期望。随着对家庭能源优化要求的提高, 优化时不能仅仅考虑电价或者舒适度单方面需求, 更多的时候需要从多方面综合考虑。

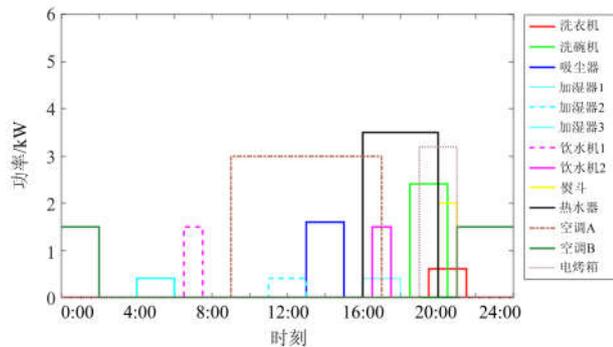


图 3 按舒适度优化后家庭用电设备优化运行图

Fig. 3 Scheme of household appliances based on comfort

4.3 考虑经济性以及舒适度的多目标优化

以经济性和舒适性为目标, 即以式(23)为目标函数, 选择合适的舒适度 C_{exp} 和比例系数 k 值, 运用遗传算法进行优化仿真。为进行对比分析, 选取

以下三组数据并进行逐一仿真, 具体数据如表 5 所示。

表 5 用户期望舒适度及比例系数

Table 5 Comfort of user expectation and proportional coefficient

方案	C_{exp}	k
①	1	2
②	1	5
③	0.8	5

方案①, 即当舒适度 C_{exp} 设定为 1、比例系数 k 值为 2 时, 运用遗传算法进行优化。优化后电费为 32.08 元, 利用式(20)计算得到的舒适度为 0.73, 优化后的家庭用电设备运行图如图 4 所示。

方案②, 即当舒适度 C_{exp} 设定为 1、比例系数 k 值为 5 时, 运用遗传算法进行优化。优化后电费为 40.24 元, 利用式(20)计算得到的舒适度为 0.85, 优化后的家庭用电设备运行图如图 5 所示。

方案③, 即当舒适度 C_{exp} 设定为 0.8、比例系数 k 值为 5 时, 运用遗传算法进行优化。优化后的电费为 36.32 元, 利用式(20)计算得到的舒适度为 0.76, 优化后的家庭用电设备优化运行图如图 6 所示。

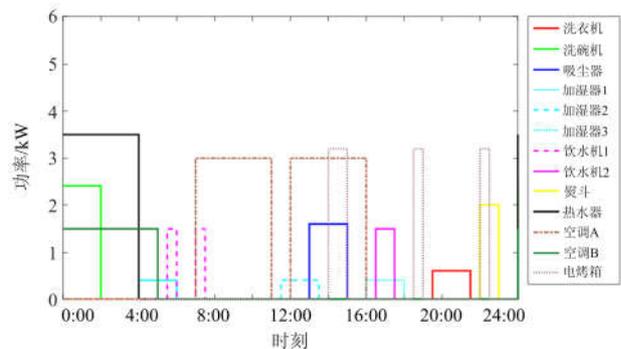


图 4 方案①家庭用电设备优化运行图

Fig. 4 Optimal scheme of ①

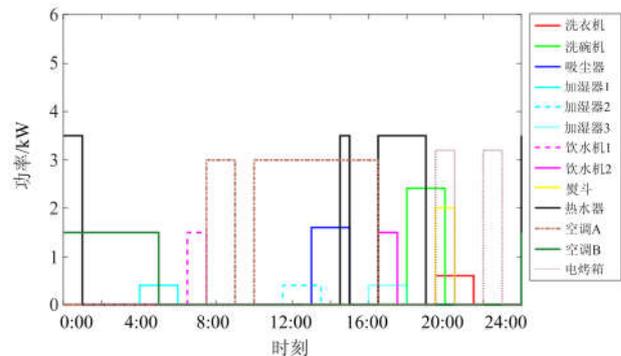


图 5 方案②家庭用电设备优化运行图

Fig. 5 Optimal scheme of ②

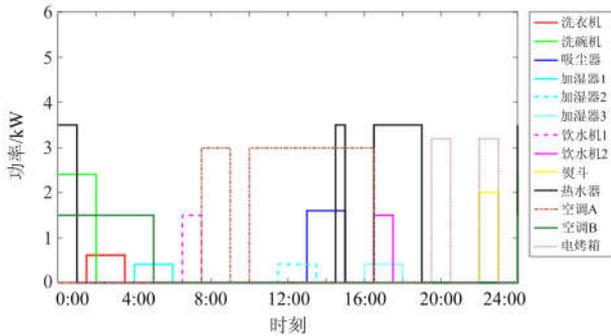


图 6 方案③家庭用电设备优化运行图

Fig. 6 Optimal scheme of ③

经优化后，各种目标下的电费和舒适度如表 6 所示。

表 6 优化后电费及舒适度

Table 6 Optimal energy charge and comfort

优化目标	电费/元	舒适度
优化前	47.71	0.84
经济最优	30.55	0.56
舒适度最优	46.65	0.89
①	32.08	0.73
②	40.24	0.85
③	36.32	0.76

三个方案的仿真结果表明，以带舒适度惩罚函数的经济最优为目标进行的优化效果明显高于单一目标的优化。当用户对舒适度要求不是太高时，选取期望舒适度为 1，比例系数为 2，此时优化后的电费降幅达 32.8%，而舒适度仅降了 13%；选取期望舒适度为 0.8，比例系数为 5，此时优化后的电费降幅达 23.9%，而舒适度仅降了 9%；当用户对舒适度要求较高时，选取期望舒适度为 1，比例系数为 5，此时优化后的舒适度可以几乎保持不变，同时还可以节约 15.7%的电费。

从结果分析来看，带舒适度惩罚函数的目标函数具有良好的优化特性，能够更好地满足用户的需求，用户只需要调节期望舒适度和比例系数，就能够得到满意的优化结果。

5 结论

针对智能家庭用电设备的优化运行策略进行研究。建立典型家庭用电设备数学模型，基于分时电价，提出了用户家庭中可调度设备的优化模型。依据各用户对运行时间要求的不同，分别以用电费用最省、舒适度最大，以及同时考虑经济性和舒适性为目标对各家用电器进行优化仿真，结果表明在不同模型下，都具有良好的效果。特别是同时考虑经

济性和舒适性模型，很好地适应用户的需求，在不损害其他利益的情况下，减少电费开销，提高舒适度。

本文是基于目前实行的分时电价进行优化仿真的。在未来，可在模型中考虑实时电价的家用电器进行运行优化。

致谢

本文得到了国家电网公司总部科技项目《客户侧分布式储能柔性协调控制与联合运行关键技术研究》的资助。

参考文献

- [1] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 殷树刚, 张宇, 拜克明. 基于实时电价的智能用电系统[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 11-16.
YIN Shugang, ZHANG Yu, BAI Keming. A smart power utilization system based on real-time electricity prices[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 11-16.
- [3] 张延宇, 曾鹏, 臧传治. 智能电网环境下家庭能源管理系统优化调度算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 18-26.
ZHANG Yanyu, ZENG Peng, ZANG Chuazhi. A scheduling algorithm for home energy management system in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 18-26.
- [4] BARBATO A, CAPONE A. Optimization models and methods for demand-side management of residential users: a survey[J]. Energies, 2014, 7(9): 5787-5824.
- [5] 唐学军, 韩佶, 苗世洪, 等. 基于需求侧响应的多类型负荷协调控制模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 116-123.
TANG Xuejun, HAN Jie, MIAO Shihong, et al. Coordinated control model of multi-type load based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 116-123.
- [6] 周磊, 李扬. 分时电价环境下基于家居能量管理系统的家居负荷建模与优化运行[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 367-374.
ZHOU Lei, LI Yang. Modeling and optimal dispatch for residential load based on home energy management system under time-of-use pricing[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 367-374.
- [7] HUBERT T, GRIJALVA S. Modeling for residential electricity optimization in dynamic pricing environments[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2224-2231.
- [8] YOZA A, HOWLADER A M, UCHIDA K, et al. Optimal scheduling method of controllable loads in smart house

- considering forecast error[C] // IEEE 10th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS), April 22-25, 2013, Kitakyushu, Japan: 84-89.
- [9] CARON S, KESIDIS G. Incentive-based energy consumption scheduling algorithms for the smart grid[C] // 1st IEEE International Conference on Smart Grid Communications, October 4-6, 2010, Gaithersburg: 391-396.
- [10] XIONG G, CHEN C, KISHORE S, et al. Smart (in-home) power scheduling for demand response on the smart grid[C] // IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), January 17-19, 2011, Hilton Anaheim, USA: 1-7.
- [11] MOHSENIAN-Rad A H, LEON-Garcia A. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 120-133.
- [12] EROL-KANTARCI M, MOUFTAH H T. Wireless sensor networks for cost-efficient residential energy management in the smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 314-325.
- [13] LEE J W, LEE D H. Residential electricity load scheduling for multi-class appliances with time-of-use pricing[C] // IEEE GLOBE.COM/Workshops (GC Wkshps), December 5-9, 2011, Houston, USA: 1194-1198.
- [14] 李东东, 崔龙龙, 林顺富, 等. 家庭智能用电系统研究及智能控制器开发[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 123-129.
LI Dongdong, CUI Longlong, LIN Shunfu, et al. Study of smart power utilization system and development of smart controller for homes[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 123-129.
- [15] 孙毅, 刘迪, 李彬, 等. 基于家庭用电负荷关联度的实时优化策略[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1825-1829.
SUN Yi, LIU Di, LI Bin, et al. Research on real-time optimization strategy based on correlation of household electrical load[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1825-1829.
- [16] 汤奕, 鲁针针, 宁佳, 等. 基于电力需求响应的智能家电管理控制方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 93-99.
TANG Yi, LU Zhenzhen, NING Jia, et al. Management and control scheme for intelligent home appliances based on electricity demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 93-99.
- [17] 郭思琪, 袁越, 张新松, 等. 多时间尺度协调控制的独立微网能量管理策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 122-129.
GUO Siqi, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Energy management strategy of isolated microgrid based on multi-time scale coordinated control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 122-129.
- [18] 郝文斌, 李银奇. 不同电价机制下含光伏发电的家庭负荷调度经济性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 34-42.
HAO Wenbin, LI Yinqi. Economic study of household load scheduling of a smart home with photovoltaic system under different pricing mechanisms[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 34-42.
- [19] ZHAO Z, LEE W C, SHIN Y, et al. An optimal power scheduling method for demand response in home energy management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1391-1400.
- [20] Natural Resources Canada's Office of Energy Efficiency. Energy consumption of major household appliances shipped in Canada 2009[EB/OL]. [2014-06-06]. <http://oee.nrcan.gc.ca/Publications/statistics/cama07/pdf/cama07.pdf>.

收稿日期: 2017-12-04; 修回日期: 2018-02-28

作者简介:

史林军(1976—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为新能源、储能及电力系统分析与控制等方面的研究工作。E-mail: eec@hhu.edu.cn

(编辑 姜新丽)