

考虑用户缴费满意度与用电舒适度的用电优化策略

赫卫国¹,夏俊荣¹,刘志明²,袁晓玲²

(1. 中国电力科学研究院,南京 210003;2. 河海大学 能源与电气学院,南京 211100)

Power optimal strategy considering user-charging satisfaction and user comfort

HE Weiguo¹, XIA Junrong¹, LIU Zhiming², YUAN Xiaoling²

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

摘要:随着智能家电的广泛应用以及负荷监测技术的发展,家庭可控负荷的优化调度已经成为虚拟电厂技术的重要研究内容。考虑家庭用户用电经济性和舒适度,提出一种综合考虑家庭用户电力负荷关联度和用电舒适度与缴纳电费满意度的多目标用电模型。根据用户的负荷特性,建立刚性负荷和柔性负荷的数学模型及其约束条件。引入负荷使用关联矩阵调整负荷运行时段参数,建立考虑用户用电舒适度与电费支出满意度的多目标用电模型,采用遗传算法对模型进行求解。算例分析结果表明所建立的优化策略能有效满足用户用电舒适度,实现用电经济性,为虚拟电厂中可控负荷的优化调度提供帮助。

关键词:虚拟电厂;用户舒适度;负荷关联度;多目标优化;遗传算法

Abstract: With the wide application of intelligent home appliances and the development of load monitoring technology, the optimal scheduling of household controllable load has become an important research content of virtual power plant. Considering the economy and comfort of household electricity consumption, a multi-objective electricity consumption model is proposed, which comprehensively considers the correlation of household electricity load, comfort of electricity consumption and satisfaction with the payment of electricity. According to the load characteristics, the mathematical models of rigid load and flexible load and their constraint conditions are established. The load usage correlation matrix is introduced to adjust the parameters of load running time, and a multi-objective power consumption model is established, which considers the user's comfort level and the satisfaction degree of electricity expense, and the genetic algorithm is used to solve the model. The results show that the optimization strategy can effectively meet the customer's electricity comfort and reduce the electricity economy.

Key words: virtual power plant; customer satisfaction; load correlation; multi-objective optimization; genetic algorithm

0 引言

随着国民生活水平提高,居民生活用电在社会用电中占有的比重呈逐年上升的趋势。用电负荷不断增长带来的峰谷差变大的问题,极大地影响了电网的可靠运行^[1]。虚拟电厂作为电力行业最具创新性的领域,打破了传统意义上发电侧和用电侧的界限,通过聚合分布式发电、储能、可控负荷等不同类型的分布式资源,使其参与到电力市场的运营,从而优化资源利用,提高供电可靠性^[2]。用户侧可控负荷作为虚拟电厂重要的组成部分,通过灵活的电价和激励政策引导用户用电行为,有助于维持电

力供需平衡、实现能源利用最大化^[3]。

近年来智能负荷监测设备的大范围使用以及先进计量技术的发展,促进了负荷控制技术的发展,国内外对于居民用电智能化的相关研究也慢慢重视起来。文献[4]和文献[5]将聚类算法应用到智能用电领域,对聚类后用户的用电行为进行分析,但没有针对分类后的用户进行用电行为的优化。文献[6]提出了能量消耗模型(ECG)以及相应的算法,实现了降低用户用电费用和削峰填谷的目的,但没有考虑用电舒适度以及设备约束条件的问题。文献[7]提出了用电舒适度指数的概念,对家电调控优先级进行排序,建模优化。文献[8]提出智能电网环境下空调系统的多目标优化模型,同时考虑用户的舒适度指标和用电费用指标,但没有考虑负荷之间的关联性。文献[9]和文献[10]通过建立家电设备的运行模型,采用分布式优化算法求解,达到减少电费支出的目的。

综上所述,在居民智能用电的研究中,大都着眼于利用电价机制,电网通过提供灵活的电价政

收稿日期:2019-07-31;修回日期:2019-09-06

基金项目:国网公司科技项目“能源互联网环境下的多源互联配电网及多样化用电方式的需求策略系统研究”

This work is supported by Science and Technology Project “Research on the Demand Strategy System of Multi-source Inter-connection Power Distribution Network and Diversified Power Consumption Modes in the Energy Internet” of State Grid

策,激励用户参与智能用电,实现负荷转移^[11]。鲜有文献考虑居民用电方式的舒适度对居民用电行为的影响。本文在分时电价的基础上,针对单个居民用户的用电行为,分析家庭负荷的工作特性,建立用户缴纳电费模型。定义用电方式舒适度,根据负荷配合使用情况建立负荷关联矩阵,调整负荷的开启时间参数,建立用户用电方式满意度模型。最后,建立考虑用户用电舒适度与电费支出满意度的多目标优化模型,算例仿真验证了该模型的有效性,为家庭可控负荷参与虚拟电厂能量调度提供了理论支撑。

1 居民家庭负荷用电特性分析

不同类型负荷的重要性和用电特性是不同的,具有的价格弹性也不同。根据负荷的价格弹性的大小,可以把用户侧负荷分为两大类:刚性负荷和柔性负荷。刚性负荷是指当用户有需要时就会立即被使用,若这些用电设备的用电方式发生改变将会严重影响用户的用电舒适度。例如电脑、电视和基本的照明等。柔性负荷对电价比较敏感,可在电价比较高时减少用电设备使用或者将其转移到低电价时使用,这类负荷又可分为2类:可中断负荷和可转移负荷。由于刚性负荷对用电任务不产生影响,因此,在进行用电行为优化时,主要考虑柔性负荷的优化。

1.1 刚性负荷

对于刚性负荷,用户会按照自身的用电习惯决定这些负荷的工作时间,一旦用户有需求,则这些负荷就需要立即工作,所以这些负荷具有不可转移、不可中断的特性。这类负荷设备的用电量模型可表示为

$$\begin{cases} P_{BL}^{\max} = P_{BL}^{\min} = P_{BL}^N \\ L_{BL}(t) = P_{BL}^N S_{BL}(t) \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{BL}^{\max}$ 和 $P_{BL}^{\min}$ 为刚性负荷的最大功率和最小功率, kW; P_{BL}^N 为基本负荷的额定功率, kW; $L_{BL}(t)$ 为刚性负荷 t 时刻用电量, kW; $S_{BL}(t)$ 为 t 时刻负荷的启动状态变量,取0和1分别代表负荷在 t 时刻没有启动状态和启动状态; Δt 为负荷 t 时刻内的持续工作时间。第一个式子表示此类负荷的功率不可调,第二个式子表示 t 时刻负荷的用电量。

1.2 柔性负荷

柔性负荷不需要持续供电,可以在允许工作的时间范围内任意启、停,只要在规定的时问之内完成用户规定的任务即可。柔性负荷又可分为两类:可中断负荷和可转移负荷。

(1) 可中断负荷

可中断负荷的用电量模型可以表示为

$$L_{IL}(t) = P_{IL}(t) S_{IL}(t) \Delta t \quad (2)$$

式中: $L_{IL}(t)$ 为可中断负荷 t 时刻用电量, kW; $P_{IL}(t)$ 为 t 时刻可中断负荷的功率, kW; $S_{IL}(t)$ 为 t 时刻可中断负荷的启动状态变量。

由于可中断负荷的工作时段必须在限制范围内,所以约束条件为

$$\begin{cases} t_{IL}^{\text{early}} \leq t_{IL}^{\text{start}} \leq t_{IL}^{\text{late}} \\ S_{IL}(t) = \begin{cases} \{0, 1\} & t \in [t_{IL}^{\text{start}}, t_{IL}^{\text{end}}] \\ 0 & t \notin [t_{IL}^{\text{start}}, t_{IL}^{\text{end}}] \end{cases} \\ \sum_{t=t_{IL}^{\text{start}}}^{t_{IL}^{\text{end}}} S_{IL}(t) \Delta t = \tau \end{cases} \quad (3)$$

式中: t_{IL}^{early} 和 t_{IL}^{late} 分别为可中断负荷最早和最晚开启时间; t_{IL}^{start} 和 t_{IL}^{end} 分别为可中断负荷开始工作时间和结束工作时间。

(2) 可转移负荷

可转移负荷可以在所设置完成任务的时间内挑选电价相对低的时间进行工作,一旦开始工作后不可以暂停工作。这类负荷的用电量模型可以表示为

$$L_{TL}(t) = P_{TL}(t) S_{TL}(t) \Delta t \quad (4)$$

式中: $L_{TL}(t)$ 为可转移负荷 t 时刻用电量, kW; $P_{TL}(t)$ 是可转移负荷 t 时刻的功率, kW; $S_{TL}(t)$ 为 t 时刻可转移负荷的启动状态变量。

可转移负荷需要满足的约束条件为

$$\begin{cases} t_{TL}^{\text{early}} \leq t_{TL}^{\text{start}} \leq t_{TL}^{\text{late}} \\ S_{TL}(t) = \begin{cases} 1 & t \in [t_{TL}^{\text{start}}, t_{TL}^{\text{end}}] \\ 0 & t \notin [t_{TL}^{\text{start}}, t_{TL}^{\text{end}}] \end{cases} \\ \sum_{t=t_{TL}^{\text{start}}}^{t_{TL}^{\text{end}}} S_{TL}(t) \Delta t = T \end{cases} \quad (5)$$

式中: t_{TL}^{early} 和 t_{TL}^{late} 分别为可转移负荷最早开启时间和最晚开启时间; t_{TL}^{start} 和 t_{TL}^{end} 分别为可转移负荷开始工作时间和结束工作时间。其中,第二个式子表示在工作区间内 t 时刻可转移负荷有无启动状态,有启动状态时为1,没有启动状态时为0;第三个式子中的 T 表示从 t_{TL}^{start} 时刻起,可转移负荷的最小连续工作的时间。

2 智能用电多目标优化模型

实际生活中,用户用电主要考虑2个方面:一是用电舒适、方便;二是电费支出尽可能少。基于这两个目标,建立用户多目标用电模型。

2.1 缴纳电费满意度分析及建模

缴纳电费满意度即为用户缴纳电费的多少,在同等总用电量的情况下,缴纳电费越少,用户缴纳电费满意度也就越好。根据这个原则,用户缴纳电

费满意度模型为

$$\min C_{\text{cost}} = \sum_{t=1}^{24} C(t) [L_{\text{BL}}(t) + L_{\text{IL}}(t) + L_{\text{TL}}(t)] \quad (8)$$

式中: C_{cost} 为用户每天的电费,元; $C(t)$ 为分时电价,元/kWh; 由于在优化前后,刚性负荷的用电计划不改变,其缴纳的电费也不变,为了简化分析,仅考虑柔性负荷缴纳的电费,对(8)式进行简化,得到缴纳电费满意度模型为

$$\min C_{\text{cost}} = \sum_{t=1}^{24} C(t) [L_{\text{IL}}(t) + L_{\text{TL}}(t)] \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{24} [P_{\text{IL}}(t)S_{\text{IL}}(t) + P_{\text{TL}}(t)S_{\text{TL}}(t)] \leq P_{\text{max}} - P_{\text{BL}}(t) \quad (10)$$

式中: P_{max} 为用户家庭线路最大容量; $P_{\text{BL}}(t)$ 为 t 时刻刚性负荷的功率。式(10)表示各时刻所有柔性负荷的总用电功率上限。

用户在使用某一电器的时候,还需要考虑与其配合使用的电器。例如,用户在使用电磁炉的时候,往往会配合使用吸油烟机等。本文引入电器使用关联矩阵来描述电器之间配合使用关系。定义电器使用关联矩阵为

$$R = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1i} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2i} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{i1} & c_{i2} & \cdots & c_{i3} \end{pmatrix} \quad (11)$$

式中: c_{ii} 为电器的自关联系数; c_{ij} 为电器的互关联系数。 $c_{ij} \in [0, 1]$, 关联度越接近 1, 则说明两个电器配合使用度越高。

关联矩阵的系数根据电器的起始时间确定,如

$$c_{ij} = \begin{cases} \frac{\min(t_i^{\text{end}}, t_j^{\text{end}}) - \max(t_i^{\text{start}}, t_j^{\text{start}})}{\max(t_i^{\text{end}} - t_j^{\text{end}}) - \min(t_i^{\text{start}} - t_j^{\text{start}})} & \min(t_i^{\text{end}}, t_j^{\text{end}}) \geq \max(t_i^{\text{start}}, t_j^{\text{start}}) \\ 0 & \min(t_i^{\text{end}}, t_j^{\text{end}}) < \max(t_i^{\text{start}}, t_j^{\text{start}}) \end{cases} \quad (12)$$

不同电器的可转移时间段各不相同。因此,在调整待优化电器可转移时段参数时,考虑电器配合使用关系,利用式(13)、式(14)对其参数进行修正

$$t_i^{\text{early}} = f(c_{ij}t_j^{\text{early}}) = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}^6 t_j^{\text{early}}}{\sum_{j=1}^n c_{ij}^6} \quad (13)$$

$$t_i^{\text{late}} = f(c_{ij}t_j^{\text{late}}) = \frac{\sum_{j=1}^n c_{ij}^6 t_j^{\text{late}}}{\sum_{j=1}^n c_{ij}^6} \quad (14)$$

式中: t_i^{early} 和 t_i^{late} 分别为待优化电器最早和最晚允许开启时间; t_j^{early} 和 t_j^{late} 分别为在运电器最早和最晚允许开启时间; c_{ij} 为电器 i 和 j 的关联度系数。

2.2 用电舒适度建模

用电舒适度指用电计划改变对用户产生的影响。在不进行用电优化时,电器按照用户用电习惯进行工作时用电舒适度最高。在同等条件下,电器用电时间改变的越多,则用户的用电舒适度越低。因为刚性负荷不参与用电优化,因此,只针对柔性负荷建立用电舒适度模型为

$$\max d_{\text{com}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{m+n} \sum_{t=1}^{24} |S_i^0(t) - S_i(t)|}{\sum_{i=1}^{m+n} \sum_{t=1}^{24} S_i^0(t)} \quad (15)$$

式中: d_{com} 为用户舒适度; m 和 n 分别为可中断负荷和可转移负荷的数量; $S_i^0(t)$ 和 $S_i(t)$ 分别为负荷 i 在 t 时刻优化前和优化后的工作状态,工作时为 1,不工作时为 0,当优化前后电器的工作状态不改变时, $S_i^0(t)$ 与 $S_i(t)$ 相等,此时 d_{com} 达到最大值 1。

因为优化前后,负荷的用电任务不会改变,则有

$$\sum_{t=1}^{24} S_i(t) = \sum_{t=1}^{24} S_i^0(t) \quad (16)$$

3 用电行为多目标优化模型及其求解算法

3.1 用电行为多目标优化模型

根据 2.1、2.2 节的分析,综合考虑用户缴纳电费满意度和用电舒适度这两个目标,建立用电优化模型为

$$\begin{cases} \min c_{\text{cost}} = \sum_{t=1}^{24} C(t) [L_{\text{BL}}(t) + L_{\text{IL}}(t) + L_{\text{TL}}(t)] \\ \max d_{\text{com}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{m+n} \sum_{t=1}^{24} |S_i^0(t) - S_i(t)|}{\sum_{i=1}^{m+n} \sum_{t=1}^{24} S_i^0(t)} \end{cases} \quad (17)$$

约束条件为

$$\begin{cases} t_{\text{IL}}^{\text{early}} \leq t_{\text{IL}}^{\text{start}} \leq t_{\text{IL}}^{\text{late}} \\ S_{\text{IL}}(t) = \begin{cases} \{0, 1\} & t \in [t_{\text{IL}}^{\text{start}}, t_{\text{IL}}^{\text{end}}] \\ 0 & t \notin [t_{\text{IL}}^{\text{start}}, t_{\text{IL}}^{\text{end}}] \end{cases} \\ \sum_{t=t_{\text{IL}}^{\text{start}}}^{t_{\text{IL}}^{\text{end}}} S_{\text{IL}}(t) \Delta t = \tau \\ t_{\text{TL}}^{\text{early}} \leq t_{\text{TL}}^{\text{start}} \leq t_{\text{TL}}^{\text{late}} \\ S_{\text{TL}}(t) = \begin{cases} 1 & t \in [t_{\text{TL}}^{\text{start}}, t_{\text{TL}}^{\text{end}}] \\ 0 & t \notin [t_{\text{TL}}^{\text{start}}, t_{\text{TL}}^{\text{end}}] \end{cases} \\ \sum_{t=t_{\text{TL}}^{\text{start}}}^{t_{\text{TL}}^{\text{end}}} S_{\text{TL}}(t) \Delta t = T \\ \sum_{t=1}^{24} S_i(t) = \sum_{t=1}^{24} S_i^0(t) \end{cases} \quad (18)$$

3.2 遗传算法

本文采用遗传算法对多目标用电优化模型求解。遗传算法(genetic algorithm, GA)是一类借鉴生物界的进化规律演化而来的随机优化搜索方法^[12]。它是由美国的J.Holland教授于1975年首先提出,其主要特点是直接对结构对象进行操作,不存在求导和函数连续性的限定;具有内在的隐并行性和更好的全局寻优能力。遗传算法的这些性质,已被广泛地应用于组合优化、机器学习、信号处理等领域^[13-14]。遗传算法的流程图如图1。

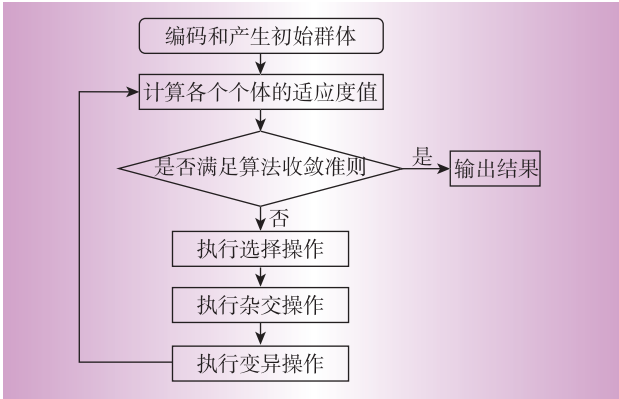


图1 遗传算法流程图

Fig. 1 Flow chart of genetic algorithm

4 算例分析

4.1 仿真系统及参数设置

本文算例仿真对象为拥有多种电器的单个家庭用户,调度周期为夏天的某一天,将一天分为24个时段,每个时段60 min。表1为各柔性负荷参数。

表1 柔性负荷参数

Table 1 Flexible load parameter

用电设备	开始工作时间	工作时长/h	额定功率/kW
电饭煲	7:00	1	0.8
洗衣机	19:00	2	0.4
微波炉	18:00	1	0.8
吸油烟机	7:00	1	0.35
	11:00	1	
	18:00	2	
	7:00	1	
	11:00	1	
电磁炉	18:00	2	1.3
热水器	18:00	4	1.5
空调	11:00	3	2
	18:00	3	
电动汽车	20:00	4	2.4

目前国内的电价机制以分时电价和阶梯电价为主,本文的用电优化都是在分时电价的基础上进行负荷优化,参考文献[15],本文所采用的分时电价如表2所示。

表2 分时电价信息

Table 2 Time-sharing electricity price information

时段	时段跨度	电价/(元·kWh ⁻¹)
峰时段	10:00~15:00, 18:00~22:00	0.9
平时段	07:00~10:00, 15:00~18:00, 22:00~24:00	0.5
谷时段	00:00~7:00	0.3

4.2 仿真结果分析

按照有无采用本文所建立的优化模型,设计了3种场景下的用电计划进行对比:

(1) 用电舒适度最大

以用户的用电舒适度为目标进行用电优化时,用户往往不会考虑缴纳电费多少。根据上述分析,用电舒适度最好为用户不改变用电计划,柔性负荷按照用户原先的用电习惯进行工作,此时电器的用电计划如图2所示。

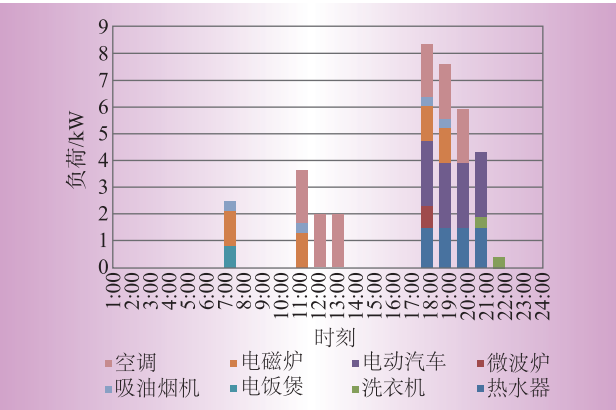


图2 用电舒适度最大的用电计划

Fig. 2 Electricity consumption plan for maximum comfort

由图2可以看出,当用户用电只考虑舒适度时,负荷的使用时间比较集中,在高电价时段(18:00~21:00)出现用电高峰,这种情况下用户需缴纳的电费为31.48元。

(2) 用电费用最小

用户可以为了获得更多的经济利益而改变用电习惯以达到电费最小。此外,在改变某些用电计划对生活没有影响的时候,用户也会考虑缴纳电费最小的方案。根据最小电费支出模型,此时电器的用电计划如图3所示。

对比图3和图2可见,电器的使用时间都被调整到电价比较低的平谷段和低谷段,此时用电费用为18.96元,比舒适度最大的用电计划减少了39.77%。此时,用户的柔性负荷工作时间改变很大,比如将热水器的使用推迟到22:00之后,吸油烟机和电磁炉的使用提前到17:00之前。此时,尽管缴纳电费最少,并且未出现明显的用电高峰,但用电舒适度却最低。

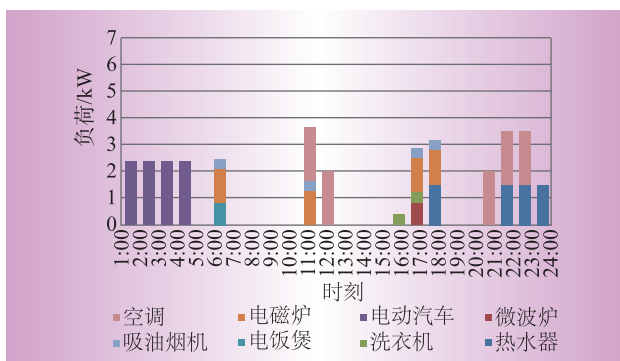


图3 缴纳电费最小的用电计划

Fig. 3 Electricity consumption plan for minimum payment

(3) 综合考虑用电费用与用电舒适度

实际生活中,用户在制定用电计划时会同时考虑用电费用与用电舒适度。根据式(17)建立用电行为多目标优化模型,利用遗传算法求解模型,得到帕累托最优解集空间分布如图4所示。

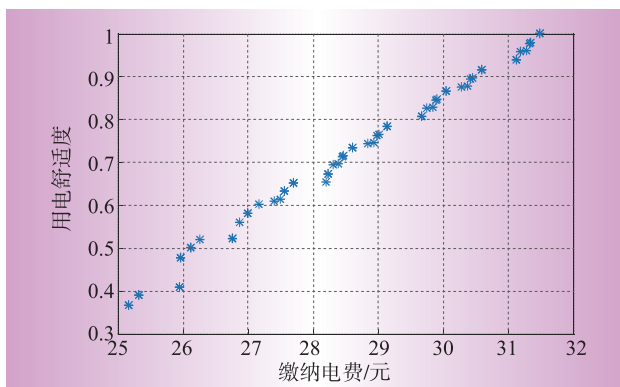


图4 帕累托最优解集空间分布

Fig. 4 Pareto optimal solution set distribution

由图4可见,以缴纳电费最小为目标的最优解集中在帕累托最优解集空间分布的左下部分,以用电舒适度最大为目标的最优解集中在帕累托最优解集空间分布的右上部分。根据帕累托前沿可以得到综合考虑用电经济性和舒适度的最优解。舒适度为0.52、缴纳电费为26.26元的用电计划如图5所示。

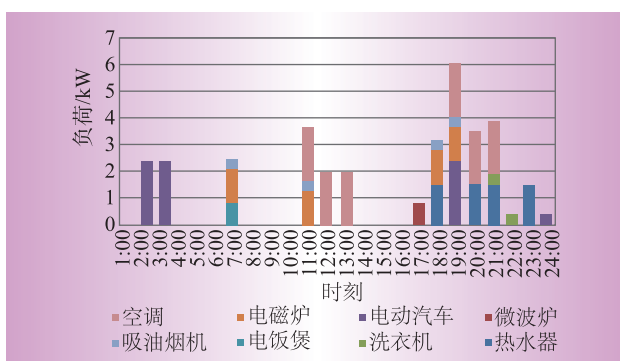


图5 考虑用电舒适度和缴纳电费满意度的多目标用电计划

Fig. 5 Multi-objective power plan considering comfort and payment

对比图5与图2可见,综合考虑用电经济性和舒适度时,洗衣机的工作时段没有发生变化,热水器的时段只有一个发生了变化。此种情况下,在18:00~21:00的高电价时段出现的用电高峰,转移到1:00~3:00的低电价时段,用户电费为26.26元,比用户自主选择的用电计划减少了16.58%。

综合上述分析,分别对这3种用电计划的舒适度、电费支出进行对比。表3为不同用电目标下的优化结果。

表3 不同用电计划下的优化调度结果

Table 3 Optimal scheduling results under different power consumption plans

用电方案	舒适度	电费支出/元	用电峰谷差/kW
舒适度最高	1	31.48	8.35
缴纳电费最小	0.14	18.96	3.65
多目标用电1	0.37	25.16	6.05
多目标用电2	0.52	26.26	7.13
多目标用电3	0.78	29.14	7.99

根据表3可以得出:① 用户舒适度最高的用电计划电费支出最多、经济性最差、用电峰谷差最大;② 只考虑缴纳电费最小的用电计划虽然电费支出最小、经济度最好,但用户的用电舒适度最低;③ 采用用电多目标模型时,能够有效平衡用电经济性和舒适性,降低用电峰谷差。

综上所述,如果以用电舒适度最大或者缴纳电费最小为目标进行用电优化时,只能达到舒适度最大或者缴纳电费最小。利用多目标优化模型对用户用电行为进行优化时,在减少用电费用的同时可以满足用户的用电舒适度。

5 结束语

本文基于家用电器的运行限制和运行相关性等约束,考虑居民用户用电习惯与经济性,建立了一种适用于居民家庭的、同时考虑用电经济性和舒适度的多目标用电模型,并采用遗传算法对模型进行求解。算例对比分析了3种用电场景下的优化结果,结果表明本文所建立的用电多目标优化模型能有效缓解高峰时段电网压力,实现电网和用户的双赢,为虚拟电厂中可控负荷的优化调度提供参考。

参考文献:

- [1] 党东升,韩松,周珏,等.需求响应参与系统调峰研究综述[J].电力需求侧管理,2017,19(5):13-17.

- DANG Dongsheng, HAN Song, ZHOU Jue, et al. Review of demand response participating in power system peak-shifting[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(5):13-17.
- [2] 许珊,李扬. 含电动汽车负荷的分布式风电源优化配置[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(1):17-21, 27.
- XU Shan, LI Yang. Optimal allocation of distributed wind generation including loads of electric vehicles[J]. Power Demand Side Management, 2019, 21(1):17-21, 27.
- [3] 王帅,赵兴勇,贺天云,等. 考虑电动汽车的微电网复合储能容量优化配置[J]. 中国电力, 2017, 50(3):161-167.
- WANG Shuai, ZHAO Xingyong, HE Tianyun, et al. Hybrid energy storage capacity configuration optimization in micro grids considering electric vehicles[J]. Electric Power, 2017, 50(3):161-167.
- [4] 魏小曼,余昆,陈星莺,等. 基于 Affinity propagation 和 K-means 算法的电力大用户细分方法分析[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(1):15-19, 35.
- WEI Xiaoman, YU Kun, CHEN Xingying, et al. Analysis of power large user segmentation based on affinity propagation and K-means algorithm[J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(1):15-19, 35.
- [5] 赵莉,候兴哲,胡君,等. 基于改进 K-means 算法的海量智能用电数据分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10):2 715-2 720.
- ZHAO Li, HOU Xingzhe, HU Jun, et al. Improved K-means algorithm based analysis on massive data of intelligent power utilization[J]. Power System Technology, 2014, 38(10):2 715-2 720.
- [6] IQBAL Z, JAVAID N, KHAN M R, et al. A smart home energy management strategy based on demand side management [C]// IEEE, International Conference on Advanced Information NETWORKING and Applications. IEEE, 2016:858-862.
- [7] 付蔚,敬章浩,罗志勇,等. 基于分时电价的智能家电控制方案[J]. 电网技术, 2015, 39(3):717-723.
- FU Wei, JING Zhanghao, LUO Zhiyong, et al. A time-of-use pricing based control scheme for intelligent household appliances[J]. Power System Technology, 2015, 39(3):717-723.
- [8] 张延宇,曾鹏,李忠文,等. 智能电网环境下空调系统多目标优化控制算法[J]. 电网技术, 2014, 38(7):1 819-1 826.
- ZHANG Yanyu, ZENG Peng, LI Zhongwen, et al. A multi-objective optimal control algorithm for air conditioning system in smart grid[J]. Power System Technology, 2014, 38(7):1 819-1 826.
- [9] 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.
- [10] CHAVALI P, YANG P, NEHORAI A. A distributed algorithm of appliance scheduling for home energy management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1):282-290.
- [11] 杨明,王元超,向东,等. 智能电网中的家庭用电系统建模与优化分析[J]. 电力需求侧管理, 2017, 19(4):6-10.
- YANG Ming, WANG Yuanchao, XIANG Dong, et al. Model and optimization analysis for household electricity consumption system in smart grid [J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(4):6-10.
- [12] HONG Y Y, CHEN Y Y. Placement of power quality monitors using enhanced genetic algorithm and wavelet transform[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2011, 5(4):461-466.
- [13] 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):1 825-1 829.
- 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):1 825-1 829.
- [14] 牛涛,钱康,孙纯军,等. 基于遗传算法的微电网容量配置方法及软件开发[J]. 中国电力, 2016, 49(9):160-164.
- NIU Tao, QIAN Kang, SUN Chunjun, et al. Method and software development of microgrid capacity configuration based on genetic algorithm [J]. Electric Power, 2016, 49(9):160-164.
- [15] 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.

作者简介:

赫卫国(1978),男,河南商丘人,硕士,高级工程师,研究方向新能源发电;

夏俊荣(1985),男,江苏南京人,博士,研究方向为新能源发电并网技术;

刘志明(1994),男,山东青岛人,硕士研究生,研究方向数据挖掘、需求响应技术;

袁晓玲(1971),女,安徽巢湖人,博士,副教授,研究方向为新能源发电、需求响应。

(责任编辑 水 鹤)