

DOI: 10.7667/PSPC180006

基于需求侧响应的家庭电热水器优化调度

郝文斌^{1,2}, 李银奇², 张毓格², 王继东³, 孔祥玉³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041;
3. 天津大学, 天津 300072)

摘要: 电热水器是家庭中极为重要的负荷, 对实时电价机制下家庭电热水器的优化调度问题进行分析是非常有意义的。首先, 将电热水器热力学模型归纳为一阶显式方程, 并以此为基础, 利用线性整数规划对电热水器的优化调度问题进行求解。然后, 对不同程度的舒适区间无选择性调整方案的经济性进行了讨论。最后, 探讨了基于多维度信息的综合权重排序法在有选择性舒适区间调整方案中的应用, 并对两者进行了比较。仿真结果表明, 调整舒适区间上下限能够明显降低调度计划的用电费用。而且, 基于多维度信息的综合权重排序法能够有效选择舒适区间调整节点, 在很短的调整时长内获得较好的经济效益。

关键词: 家庭电热水器调度; 线性整数规划; 舒适区间调整; 综合权重排序法

Household electric water heater load scheduling based on demand response

HAO Wenbin^{1,2}, LI Yinqi², ZHANG Yuge², WANG Jidong³, KONG Xiangyu³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China; 2. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610041, China; 3. Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Household Electric Water Heater (HEWH) is one of the most important services in a home. It is significant to study the household electric water heater load scheduling based on demand response in real time pricing tariffs. At first, a type of first-order explicit equation is utilized to describe the thermal dynamic modes of the HEWH. Under such a background, the HEWH load scheduling is addressed using linear integer programming. Then, the energy costs of different indistinctive adjusting schemes of comfort zone are discussed. For comparison's sake, the selective adjusting schemes with synthetic weight ranking method based on multi-dimensional information are also analyzed. Simulation results indicate that adjusting the upper and lower bounds of comfort zone is useful to reduce the energy cost. Moreover, the proposed synthetic weight ranking method based on multi-dimensional information is able to obtain well economic benefit through adjusting just a small part of comfort zone.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902902).

Key words: household electric water heater load scheduling; linear integer programming; comfort zone adjustment; synthetic weight ranking method

0 引言

随着智能家居概念的提出和家庭智能设备的逐步普及, 家庭负荷调度的研究变得越来越重要, 其代表需求侧管理在用户侧的具体应用^[1-2]。利用家庭负荷调度算法, 只需要用户设置好基本参数, 便能根据负荷特性、历史信息及电价等因素自动调度家庭智能设备使家庭日用电计划达到全局最优。由于用户往往并不在意或者说不能及时响应电价或其他

信息。因此提出了此自动调度算法, 不需要用户参与便能使用户的用电经济性达到最优。一方面, 家庭负荷调度能够减少家庭的用电成本, 提高用电效率; 另一方面, 家庭负荷调度能够有效减少用电负荷与电网负荷率^[3]。由于家庭中的智能电器多种多样, 并且各个电器之间的运行特性都不尽相同, 所以, 对全体智能电器统一进行调度过于复杂。为了减少复杂度, 以往文献将智能电器根据响应方式进行了分类, 在不同的负荷类型中, 家居温控负荷是以往文献中被频繁研究的一种^[4-6], 这是由于家居温控负荷不仅是家庭智能电器中的主要能源消耗部

基金项目: 国家重点研发计划项目课题 (2017YFB0902902)

分, 而且具有很好的可调节特性^[7-9]。

考虑到家居温控负荷良好的热储能力和可调度特性, 研究家居温控负荷在时变电价下的运行和经济特性具有十分重要的现实意义。为了处理家居温控负荷能量管理模型中存在的问题, 以往文献提出了多种解决方案。文献[10]对实时电价环境下空调系统的优化调度问题进行了研究, 提出了一种综合考虑经济性和用户舒适度的多目标优化模型; 文献[11]综合考虑了可再生能源出力和空调系统运行的联合调度问题, 以家庭用电的经济性为目标函数, 利用遗传算法进行了求解。上述两篇文章都对基于需求侧响应的家居温控负荷调度问题进行了有效求解, 但是两者都是用智能算法作为家庭能量管理系统的求解器。智能算法一般适用于处理高阶非线性规划问题, 而家居温控负荷调度问题的模型一般是线性的, 考虑到智能算法计算时间长、对初始值要求很高且难以得到最优解, 在家居温控负荷调度问题的求解中使用智能算法并不是很好的选择。

文献[12]提出了一种线性优先排序算法, 考虑电价信息和舒适度, 对电热水器调度问题进行迭代求解。该方法简单易行, 但是只能得出较优解, 并不能得出最优解, 牺牲了经济性。针对这个问题, 文献[13]对家庭电热水器的优化调度问题提出了一种基于二叉树的遍历剪枝算法, 能够在有限时间内得到经济性更好的解。但是该方法的成功很大程度上取决于对优先剪枝起始层数的选择, 对用户的熟练程度有一定要求。

本文以电热水器作为家居温控负荷的代表, 分析了基于需求侧响应的家庭电热水器优化调度问题。首先归纳了电热水器热力学模型的显式方程, 并以此为基础, 将电热水器的优化调度处理为线性整数规划问题, 使其能够在很短时间内得出最优调度方案。另外, 以往文献很少考虑时变舒适区间对于调度经济性的影响, 文献[12]虽然讨论了某段时间内下调舒适区间的经济性问题, 但是由于没有对舒适区间下调时间进行合理选择, 所以并没有对调度经济性有显著改善。因此, 本文提出了一种同时考虑电价、用水量和环境温度等多维度信息的综合权重排序方法, 对时变舒适区间的变化时间进行指导。

1 电热水器热力学模型

电热水器是家居温控负荷中极为重要的设备, 在居民用电负荷中所占的比例能够高达20%~30%^[14]。电热水器的热力学模型中涉及到热水使用量和散热对于水温的影响, 而空调系统仅需要考虑散热对于室内温度的影响。因此, 适用于电

热水器的调度优化算法对于空调系统的调度有很好的借鉴作用。

当仅考虑散热对于水温的影响时, 电热水器的热力学模型如式(1)所示^[15-17]。

$$\theta_h = \theta_{e,h-1} + x_{h-1}QR - (\theta_{e,h-1} + x_{h-1}QR - \theta_{h-1}) \exp[-(t_h - t_{h-1})/(RC)] \quad (1)$$

式中: θ_h 为第 h 个时间节点的热热水温度; $\theta_{e,h-1}$ 为第 $h-1$ 个时间节点的环境温度; θ_{h-1} 为在 $h-1$ 时刻的热热水温度; Q 、 R 、 C 分别为电热水器的等效功率、热阻和热容。

仅考虑热交换时所带来的热量损失时, 电热水器的热力学模型更新为式(2)所示。

$$\theta_h = [\theta_c(M - d_{h-1}) + \theta_{e,h-1}d_{h-1}]/V \quad (2)$$

式中: d_{h-1} 为在 $h-1$ 时刻的热热水使用量; V 为电热水器的水箱容量。

综合考虑式(1)和式(2), 推导归纳出电热水器显式方程如式(3)~式(6)所示。

$$\theta_h = \left(\prod_{j=1}^{h-1} \partial f_j \right) \theta_0 + \sum_{i=1}^{h-1} \partial^{h-1-i} \left(\prod_{j=i+1}^{h-1} f_j \right) (1 - \partial f_i) \theta_{e,i} + \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^{h-1} \partial^{h-1-i} \left(\prod_{j=i}^{h-1} f_j \right) (1 - \partial) U_{\text{heat},i}$$

$$U_{\text{heat},h-1} = X_{h-1}QR \quad (4)$$

$$\partial = \exp[-(t_h - t_{h-1})/(RC)] \quad (5)$$

$$f_{h-1} = 1 - d_{h-1}/V \quad (6)$$

用户设定的电热水器舒适区间如式(7)所示。

$$\theta^l = [\theta_0^{\text{low}} + \lambda^{\text{low}} \Delta \theta^{\text{low}}, \theta_0^{\text{high}} + \lambda^{\text{high}} \Delta \theta^{\text{high}}] \quad (7)$$

式中: θ_0^{high} 和 θ_0^{low} 为基准舒适区间的上下限; $\Delta \theta^{\text{high}}$ 和 $\Delta \theta^{\text{low}}$ 为舒适区间上下限的标准调整值; λ^{high} 和 λ^{low} 为舒适区间上下限的调整等级。电热水器调度需要满足水温约束如式(8)所示。

$$\theta_0^{\text{low}} + \lambda^{\text{low}} \Delta \theta^{\text{low}} \leq \theta_h \leq \theta_0^{\text{high}} + \lambda^{\text{high}} \Delta \theta^{\text{high}} \quad (8)$$

为方便建模求解, 将式(7)代入式(8), 并进行变换, 如式(9)、式(10)所示。

$$\sum_{i=1}^{h-1} \partial^{h-1-i} \left(\prod_{j=i}^{h-1} f_j \right) (1 - \partial) U_{\text{heat},i} \leq \left(\theta_0^{\text{high}} + \lambda^{\text{high}} \Delta \theta^{\text{high}} - \left(\prod_{j=1}^{h-1} \partial f_j \right) \theta_1 - \sum_{i=1}^{h-1} \partial^{h-1-i} \left(\prod_{j=i+1}^{h-1} f_j \right) (1 - \partial f_i) \theta_{e,i} \right) \quad (9)$$

$$-\sum_{i=1}^{h-1} \partial^{h-1-i} \left(\prod_{j=i}^{h-1} f_j \right) (1 - \partial) U_{\text{heat},i} \leq \left(\left(\prod_{j=1}^{h-1} \partial f_j \right) \theta_1 - \theta_0^{\text{low}} - \lambda^{\text{low}} \Delta \theta^{\text{low}} + \sum_{i=1}^{h-1} \partial^{h-1-i} \left(\prod_{j=i+1}^{h-1} f_j \right) (1 - \partial f_i) \theta_{e,i} \right) \quad (10)$$

基于需求侧响应的家庭电热水器优化调度问题的目标函数是求调度方案的电价最小值。故电热水器的优化调度模型如式(11)、式(12)所示。

目标函数:

$$\min Cost = \min \sum_{h=1}^H p_h X_h P_{\text{step}} \quad (11)$$

约束:

$$\begin{cases} \text{式(5)—式(6)} \\ X_h \in \{0,1\} \end{cases} \quad (12)$$

2 舒适区间无选择性调整方案

2.1 参数

本文中涉及电价为实时电价, 实时电价目前在很多电力公司都得到了采用, 参考文献[18], 实时电价曲线如图1所示, 热水使用量如图2所示。

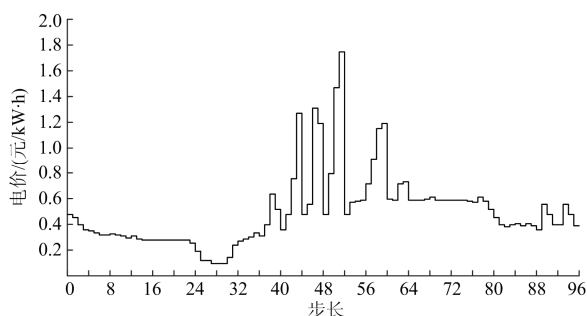


图1 实时电价曲线

Fig. 1 Real time price curve

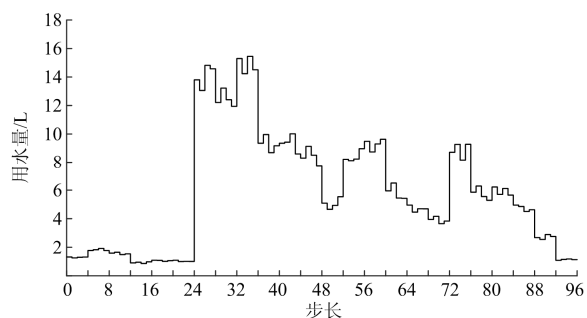


图2 水量曲线

Fig. 2 Hot water demand curve

除用水量外, 环境温度也会从两个方面影响调度的结果: 一是水箱中的热水与周围环境的热交换; 二是进水的温度。环境温度曲线如图3所示。

本文的调度时间区间是从0:00—24:00, 步长设定为15 min, 因此步数 $H=96$ 。电热水器的额定功率为4.5 kW^[19]。因此, 与之对应的单位步长内所消耗的能量 $P_{\text{step}} = 1.125 \text{ kW}$ 。电热水器的等效热力学参数为

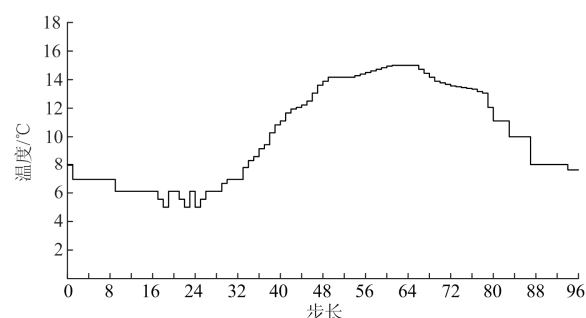


图3 环境温度曲线

Fig. 3 Ambient temperature curve

等效功率 $Q = 150 \text{ kW}$, 热阻 $R = 0.7623 \text{ }^\circ\text{C/kW}$, 热容 $C = 431.7012 \text{ kW } ^\circ\text{C}^{[20]}$ 。电热水器水箱容量 $V = 50 \text{ gallon}$, 基准舒适区间 $\theta'_0 = [55 \text{ }^\circ\text{C}, 60 \text{ }^\circ\text{C}]$, 初始水温为 $\theta_0 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.2 无选择性调整方案的经济性讨论

首先讨论在基准舒适区间下的电热水器调度方案及所产生的电费, 此时 $\lambda^{\text{high}} = \lambda^{\text{low}} = 0$ 。实时电价、热水使用量、环境温度如图1—图3所示。目标函数如式(8)所示, 约束如式(9)所示, 利用CPLEX对此线性整数规划问题进行求解。

在基准舒适区间下, 电热水器的热水温度曲线如图4所示。

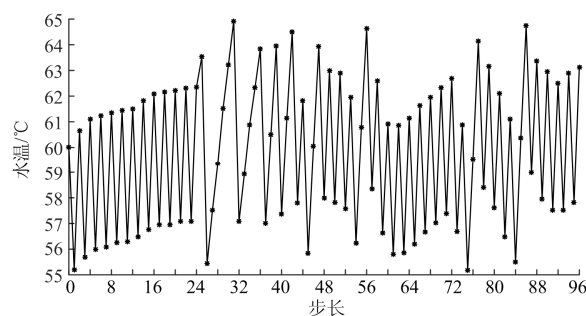


图4 基准舒适区间下的水温曲线

Fig. 4 Hot water temperature under original comfort zone

此时 $Cost = 26.4738$ 元, 水温始终在基准舒适区间之内。

为探讨改变舒适区间上下限对调度方案经济性的影响, 设定 $\Delta\theta^{\text{high}} = \Delta\theta^{\text{low}} = 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $\lambda^{\text{low}} = [-3, -2, -1]$, $\lambda^{\text{high}} = [1, 2, 3]$ 。当舒适区间上下限处于不同调整等级时, 其水温曲线如图5所示。

不同舒适区间上下限调整等级下的电费情况如表1所示。

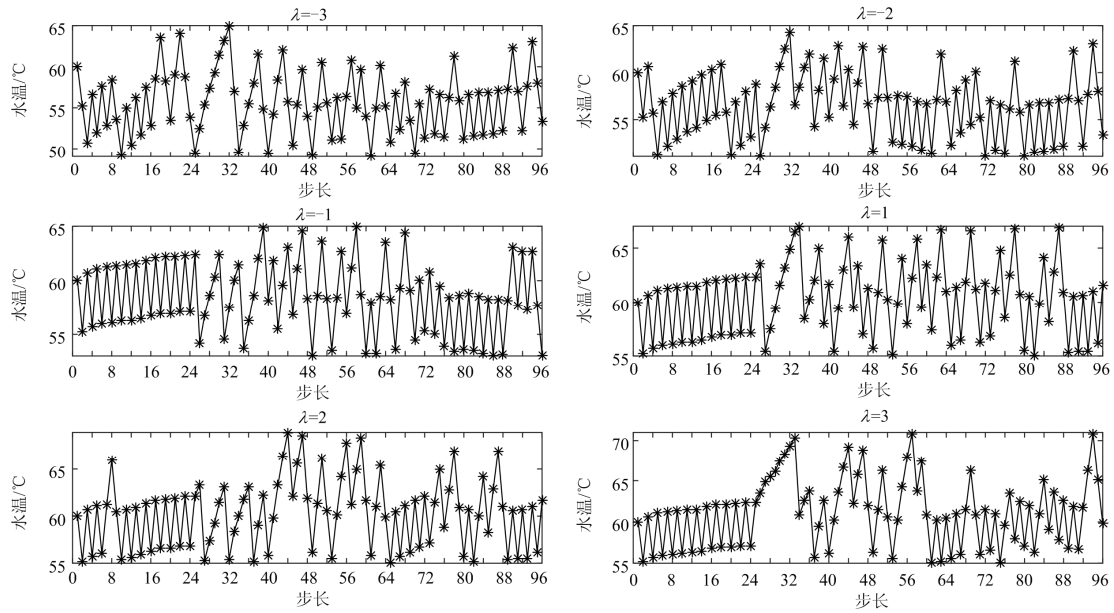


图 5 不同调整等级下的水温曲线

Fig. 5 Hot water temperature under different adjusting levels

表 1 不同调整等级下的电费

Table 1 Energy costs of different adjusting levels

调整等级	电费/元
$\lambda = 3$	23.607 7
$\lambda = 2$	23.655 8
$\lambda = 1$	24.560 4
$\lambda = 0$	26.473 8
$\lambda = -1$	23.063 0
$\lambda = -2$	21.614 4
$\lambda = -3$	20.045 4

可以看到，无论是调整舒适区间上限还是下限，都能够一定程度上减少电费，使调度方案更加经济。与基准舒适区间相比，增加舒适区间上限能够使调度方案有更多的可选择性，在低电价时期将水温加热到更高的温度，从而尽可能少地减少高电价时期的加热动作，减少电费。分析表 1 可以发现，适当增加舒适区间上限能够显著减少电费，但是当上限增加到一定幅度之后，再增加上限并不会有很好的效果。例如，在 $\lambda = 2$ 增加到 $\lambda = 3$ 时，电费仅减少了 0.048 1 元。

减少舒适区间下限能够使调度方案中的加热动作更少，从而使电费有显著的降低。与增加上限相比，通过减少下限来降低电费的经济性更好，适当减少下限能够使电费减少更多。

3 基于多维度信息的综合权重排序法

通过对舒适区间上下限的整体调整，能够有效

改善对调度方案的经济性。但是整体增加或者下调舒适区间上下限的方法对舒适性的影响太大，全天舒适区间的整体大幅度变化对于有些用户来说是不可接受的。因此，提出了一种仅调整舒适区间中的较少部分来获取最大经济效益的方法。无选择性舒适区间调整的方法并没有很好地挖掘多种参数中所包含的信息来选择效益最大的调整节点，即在同样的调整时长内，能够获得更大经济效益的时间段。本文采用了基于多维度信息的综合权重排序法来选择具有最大效益的调整节点。

总体来说，有三个参数能够对电热水器的总用电费用产生影响，即电价、热水使用量和环境温度。电价的变化能够直接影响用电费用，而热水使用量和环境温度则通过影响热水温度，从而改变最优调度方案来间接影响用电费用。从直接影响上来看，选择在高电价时期降低舒适区间的下限，能够减少高电价时期的加热动作，从而降低电价。但是，热水使用量和环境温度的峰谷期并不是和实时电价的峰谷期完全一致。因此，在电价很高时，基准舒适区间下的原调度方案在此时刻可能并没有进行加热动作，此时降低舒适区间下限并不会对总用电费用造成影响。所以，需要综合考虑电价、热水使用量和环境温度这三个维度对总用电费用的影响，并根据三者对用电费用影响的大小设定权重，选取三者加权和最大的时间节点作为舒适区间调整节点。

实时电价、热水使用量和环境温度的权重计算方法如式(13)所示。

$$\beta_p = \frac{Cost((1+\Delta)p_h, d_h, \theta_h)}{Cost((1+\Delta)p_h, d_h, \theta_h) + Cost(p_h, (1+\Delta)d_h, \theta_h) + Cost(p_h, d_h, (1-\Delta)\theta_h)} +$$

$$\beta_d = \frac{Cost(p_h, (1+\Delta)d_h, \theta_h)}{Cost((1+\Delta)p_h, d_h, \theta_h) + Cost(p_h, (1+\Delta)d_h, \theta_h) + Cost(p_h, d_h, (1-\Delta)\theta_h)} +$$

$$\beta_\theta = \frac{Cost(p_h, d_h, (1-\Delta)\theta_h)}{Cost((1+\Delta)p_h, d_h, \theta_h) + Cost(p_h, (1+\Delta)d_h, \theta_h) + Cost(p_h, d_h, (1-\Delta)\theta_h)} +$$

(13)

式中: $Cost((1+\Delta)p_h, d_h, \theta_h)$ 表示将实时电价 p_h 增加 Δp_h 后的用电费用, 其他的同理; β_p 、 β_d 、 β_θ 分别表示实时电价、热水使用量和环境温度的权重。

定义各时间节点加权效益值的计算方法如式(14)所示。

$$value_h = \beta_p \frac{p_h}{\sum_{h=1}^H p_h / H} + \beta_d \frac{d_h}{\sum_{h=1}^H d_h / H} + \beta_\theta \frac{\theta_h}{\sum_{h=1}^H \theta_h / H}$$

(14)

式中, $value_h$ 为第 h 个时间节点时的加权效益, 其值越高, 代表在此时间节点进行舒适区间下限调整的收益越大。设 $\Delta = 10\%$, 各时间节点的加权效益值如图 6 所示。

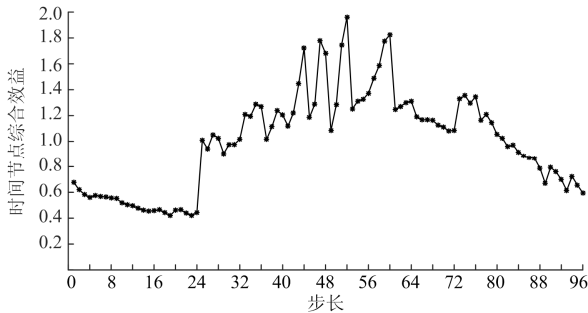


图 6 各时间节点加权效益图

Fig. 6 Weighted benefit of each time spot

舒适区间下限的调整时长是根据用户偏好设置的, 此时, 设定调整时长最长为 5 h, 即 20 个步长, 调整幅度设置为 4°C 。若调整时长设定为 5 h, 根据各时间节点的加权效益值的大小挑选出前 20 个时间节点进行舒适区间下限调整。若调整时长设定为 4 h, 根据各时间节点的加权效益值的大小挑选出前 16 个时间节点进行舒适区间下限调整, 依此类推。表 2 表示了不同调整时长时的用户电费变化情况。

表 2 不同舒适区间调整时长下的电费

Table 2 Energy costs of different adjusting durations	
调整时长/h	电费/元
5	22.871 4
4	23.015 5
3	23.591 9
2	24.248 3
1	25.128 9
0	26.473 8

分析表 2 可以发现, 随着调整时长的增加, 总用电费用是在逐渐减少的。并且, 当调整时长较小时, 增加调整时长的效果更为明显, 当调整时长由 4 h 变为 5 h 时, 电费并没有显著变化。这是因为当调整时长较小时, 所增加的时长具有很好的时间节点加权效益, 能够有效减少用电费用。当调整时长逐步增大之后, 时间节点的加权效益值逐渐降低, 对用电费用的影响变小。

将表 1 和表 2 进行对比, 表 1 中的 $\lambda = -2$ 表示舒适区间下限整体下降 4°C , 此时的用电费用为 21.614 4 元, 电费下降了 4.859 4 元。表 2 中调整时长为 4 h 时, 其用电费用为 23.015 5 元, 电费下降了 3.458 3 元, 与舒适区间下限整体下降 4°C 时的电费下降幅度相比, 其比例为 71.17%。也就是说, 仅利用整体调整方法六分之一的时长, 就可以达到其 71.17% 的效果。验证了本文所提出的基于多维度信息的加权排序法能够挑选出合适的舒适区间下限调整节点, 仅通过调整较少的舒适区间, 达到很好的经济性效果。

4 结论

基于需求侧响应的家庭电热水器调度能够通过将加热动作转移至低电价时期, 尽可能减少高电价时期的用电行为, 来显著减少家庭总用电费用。本文首先构建了能够直接求解的电热水器调度的线性整数规划模型, 然后, 以此为基础, 讨论了无选择性舒适区间上下限调整方案和有选择性舒适区间上下限调整方案的经济性。通过比较, 表明有选择性的舒适区间上下限调整方案能够通过较少的舒适区间调整, 得到无选择性整体调整方案的绝大部分经济效益, 极大提高了舒适区间单位时间的调整效益。说明了基于多维度信息的综合权重排序法能够对舒适区间调整节点做出合理选择。

参考文献

- [1] 白杨, 李昂, 夏清. 新形势下电力市场营销模式与新型电价体系[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 10-16.

- BAI Yang, LI Ang, XIA Qing. Electricity business marketing modes in the new environment and new electricity pricing systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 10-16.
- [2] 王伟, 何光宇, 万钧力, 等. 用户侧能量管理系统初探[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(3): 10-15.
WANG Wei, HE Guangyu, WAN Junli, et al. Preliminary investigation on user energy management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(3): 10-15.
- [3] YIN Xianggen, ZHANG Zhe, LI Zhenxing, et al. The research and the development of the wide area relaying protection based on fault element identification[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 95-107. DOI: 10.1186/s41601-016-0023-z.
- [4] WANG J, LI Y, ZHOU Y. Interval number optimization for household load scheduling with uncertainty[J]. Energy Build, 2016, 130: 613-624.
- [5] 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.
- [6] 佟晶晶, 温俊强, 王丹, 等. 基于分时电价的电动汽车多目标优化充电策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 17-23.
TONG Jingjing, WEN Junqiang, WANG Dan, et al. Multi-objective optimization charging strategy for plug-in electric vehicles based on time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 17-23.
- [7] PEDRASA M A, SPOONER T D, MACGILL I F. The value of accurate forecasts and a probabilistic method for robust scheduling of residential distributed energy resources[C] // 2010 IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, June 14-17, 2010, Singapore, Singapore: 587-592.
- [8] WANG C, ZHOU Y, WU J, et al. Robust-index method for household load scheduling considering uncertainties of customer behavior[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1806-1818.
- [9] WANG C, ZHOU Y, JIAO B, et al. Robust optimization for load scheduling of a smart home with photovoltaic system[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 102: 247-257.
- [10] ARABALI A, GHOFRANI M, ETEZADI-AMOLI M, et al. Genetic-algorithm-based optimization approach for energy management[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 162-170.
- [11] 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[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1819-1826.
- 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): 1819-1826.
- [12] DU P, LU N. Appliance commitment for household load scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 411-419.
- [13] WANG C, ZHOU Y, WANG J, et al. A novel traversal-and-pruning algorithm for household load scheduling[J]. Applied Energy, 2013, 102: 1430-1438.
- [14] IWAFUNE Y, YAGITA Y. High-resolution determinant analysis of Japanese residential electricity consumption using home energy management system data[J]. Energy and Buildings, 2016, 116: 274-284.
- [15] PRATT R G, TAYLOR Z T. Development and testing of an equivalent thermal parameter model of commercial buildings from time-series end-use data[M]. Richland, WA, USA: Pac. Northwest Lab, 1994.
- [16] TAYLOR Z T, PRATT R G. The effects of model simplifications on equivalent thermal parameters calculated from hourly building performance data[C] // Proc ACEEE Sum Study Energy Efficiency Build, 1988, 10: 268-285.
- [17] CALLAWAY D S. Tapping the energy storage potential in electric loads to deliver load following and regulation, with application to wind energy[J]. Energy Conversion Management, 2009, 50(9): 1389-1400.
- [18] HONG Y Y, LIN J K, WU C P, et al. Multi-objective air-conditioning control considering fuzzy parameters using immune clonal selection programming[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1603-1610.
- [19] AGNETIS A, DE PASCALE G, DETTI P, et al. Load scheduling for household energy consumption optimization[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(4): 2364-2373.
- [20] 2012 ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment. Amer. Soc. Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Eng., Inc., 2012[EB/OL]. https://app.knovel.com/web/search.v?q=2012%20ASHRAE%20Handbook&my_subscription=FALSE&search_type=tech-reference.

收稿日期: 2018-01-02; 修回日期: 2018-04-07

作者简介:

郝文斌(1976—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护及调度运行; E-mail: hwb760817@163.com

李银奇(1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为能源互联网及智能家居能量管理; E-mail: yinqili@tju.edu.cn

张毓格(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电网规划技术. E-mail: 305716037@qq.com

(编辑 许威)