

DOI: 10.7667/PSPC171201

考虑用户行为不确定性的智能家电控制策略

孙毅¹, 裴俊亦¹, 景栋盛²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 昌平 102206; 2. 苏州供电公司信息通信分公司, 江苏 苏州 215004)

摘要: 针对用户行为在家庭负荷调度中引起的不确定性对用电造成的影响, 提出了考虑用户行为不确定性的智能家电控制策略。首先, 建立了家电负荷模型, 并通过定义用户舒适度违反率对用户不确定行为进行量化。其次, 制定了家电实时关断机制, 对计划外用电进行合理控制。随后, 制定的控制策略通过生成用电计划、判断用户行为和实时修改用电计划三步实现对用户家电的实时智能控制。通过仿真证明了优化策略在应对用户不确定行为方面的有效性。

关键词: 智能家电控制; 需求响应; 用户行为; 不确定性; 粒子群算法

Smart home appliance control strategy considering user behavior uncertainty

SUN Yi¹, PEI Junyi¹, JING Dongsheng²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Information and Communication Branch, Suzhou Power Supply Company, Suzhou 215004, China)

Abstract: Aiming at the influence of uncertainty caused by user behavior in household load dispatching on power consumption, a control strategy of smart appliances considering the uncertainty of user behavior is proposed. First of all, this paper establishes the appliance load model and quantifies the uncertain behavior of users by defining the user comfort violation rate. Secondly, it develops a real-time power-off mechanism to control the rational use of unplanned power. Subsequently, it formulates control strategies to achieve real-time intelligent control of consumer appliances by generating electricity plans, judging user behavior and real-time modifying the power consumption plan. The simulation results show the effectiveness of the optimization strategy in dealing with the uncertain behavior of users.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Research on Key Support Technologies of Information and Communication for Quick Control System of User Load Group Under the Condition of Emergency Power Grid Emergency Fault” (No. SGJSSZ00FZWT1701004).

Key words: smart home appliance control; demand response; user behavior; uncertainty; particle swarm optimization

0 引言

随着我国经济水平的提高, 居民用电量在社会用电中所占比重逐年增加。在这种背景下, 采用有效的智能用电手段, 引导需求侧合理用电, 提高资源利用率显得尤为重要。需求响应是需求侧管理的重要技术手段, 可以实现需求侧用电优化和系统资源的综合优化配置^[1]。然而现阶段, 由于用户行为的不确定性, 需求响应的执行往往难以达到理想效

果。智能电网环境下的家庭能源管理系统功能更多, 更加完善, 可以有效地提高用户的用电效率, 提升需求响应的效果^[2]。在需求响应的研究方面, 文献[3-5]都综合考虑了用户侧负荷、常规机组以及储能装置, 以提升可再生能源消纳率和降低负荷调度成本为目标建立了“源-网-荷”优化调度模型, 并通过仿真验证了模型在负荷调度中的有效性。文献[6-7]对智能用电中电网与用户的互动技术, 互动模式以及相关理论进行了总结, 设计了电网与用户侧智能互动的技术架构, 并对我国智能用电的发展提出了建设性意见。对家庭能源管理系统优化调度算法的研究目前有很多, 文献[8-11]提出的家庭能源管理优化算法都考虑了室外环境的不确定性对可再生

基金项目: 国家电网公司科技项目(SGJSSZ00FZWT1701004)
“大受端电网紧急故障条件下用户负荷群快速调控系统的信息通信关键支撑技术研究”

能源出力的影响, 制定的家庭负荷调度策略在保证经济性的同时, 降低需求侧负荷不确定性带来的风险, 但对于用户行为在负荷调控中的影响并未考虑。文献[12-14]都考虑了用户不确定性在负荷调度中的影响, 并采用构建分时电价的不确定机理模型来验证用户响应的不确定性对负荷调度的影响, 主要通过控制电价来间接影响用户行为, 且调度中忽略了用户用电的舒适度。文献[15-17]采用鲁棒经济优化方法来解决用户行为在调控中的不确定性, 保证了负荷调控的经济性和鲁棒性水平, 但对用户实际行为导致的负载使用变化未予考虑, 实时性较差。

现有研究在家电模型建立和策略优化方面研究比较深入, 对于不确定性的研究大都集中在可再生能源出力的不确定上, 对于用户行为不确定因素考虑较少, 且在策略应用的实时性方面研究较少。本文通过定义舒适度违反率的概念量化表示了用户行为的不确定性。同时, 制定了家电实时关断机制, 提出的控制策略通过生成以舒适度违反率和用电成本最小为目标的用电策略、判断用户行为和实时修改用电计划三个步骤, 实现对用户家电的实时智能控制, 并通过仿真证明了优化策略的有效性。

1 家庭能源管理系统

1.1 家庭能源管理系统框架

图1所示为一典型的智能家庭能源管理系统, 未来的智能家庭主要由智能家电、分布式发电以及大量测量设备(如传感器、智能插座等)组成。家庭能源管理系统通过家庭网关收集各家电的数据, 并发送控制信号对用电设备进行控制, 实现家电优化调度。



图1 智能家庭能源管理系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of smart home energy management system

1.2 家电负荷分类及模型建立

根据家电负荷在调控中能否被控制, 将其分为可控负荷和不可控负荷。本文研究主要考虑可控负荷, 根据其工作特性分为两类: 可转移类负荷和温控类负荷^[18]。

假设家电负荷优化调度的区间为 $[0, T]$, 划分为 N 个时间间隔, 每个时间间隔持续的时间是 Δt , t_i 表示第 i 个时间间隔, 则各类负荷模型如下所述。

1) 可转移类负荷(TL)

假设该类负荷允许在 t_b 之后开始工作, 并不晚于 t_e 之前完成用电任务。其功率损耗 P_{TL} 是恒定的, 用电任务的总能量消耗为 E_{TL} , 其模型为

$$x_{TL,i} = 0 \quad \forall i \in [1, b) \cup (e, N] \quad (1)$$

$$\sum_{i=b}^e x_{TL,i} \cdot P_{TL} \cdot \Delta t = E_{TL} \quad (2)$$

式中, $x_{TL,i}$ 表示可转移类负荷TL在第 i 个时间间隔时的开断状态, 为二进制0-1变量, 当开启时为1, 关断时为0。

对于可转移不可中断类负荷, 其约束条件为

$$\sum_{i=j}^{j+L_{TL}-1} x_{TL,i} \geq (x_{TL,j} - x_{TL,j-1}) \cdot L_{TL} \quad \forall j \in (b, e - L_{TL} + 1] \quad (3)$$

式中, L_{TL} 表示用电任务的持续时间。

2) 温控类负荷(TCL)

(1) 热水器模型

当热水器在 $[t_n, t_{n+1}]$ 时段处于开启、关闭状态以及用水状态时, t_{n+1} 时刻的水温 θ_{n+1} 分别如式(4)~式(6)所示, 约束条件如式(7)所示。

$$\theta_{n+1} = \theta_{en} + Q_h \cdot R_h - (\theta_{en} + Q_h \cdot R_h - \theta_n) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{R_h \cdot C_h}\right) \quad (4)$$

$$\theta_{n+1} = \theta_{en} - (\theta_{en} - \theta_n) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{R_h \cdot C_h}\right) \quad (5)$$

$$\theta_{n+1} = [\theta_{cur} \cdot (M - d_{n+1}) + \theta_{en} \cdot d_{n+1}] / M \quad (6)$$

$$\theta_{min} < \theta < \theta_{max} \quad (7)$$

式中: θ_{en} 表示环境温度, 即冷水的温度; τ 表示时间间隔; M 表示热水器的容量; R_h 表示热水器热阻系数; C_h 表示热水器热容; Q_h 表示热水器功率; d_{n+1} 表示在 $[t_n, t_{n+1}]$ 时段内加入的冷水量; θ_{cur} 表示当前水温。

(2) 空调模型

当空调在 $[t_n, t_{n+1}]$ 处于开启和关闭状态时, t_{n+1} 时刻的室温 T_{n+1} 如式(8)、式(9)所示, 运行约束条件如式(10)所示。

$$T_{n+1} = T_{\text{out}} - Q_a \cdot R_a - (T_{\text{out}} - Q_a \cdot R_a - T_n) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{R_a \cdot C_a}\right) \quad (8)$$

$$T_{n+1} = T_{\text{out}} - (T_{\text{out}} - T_n) \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{R_a \cdot C_a}\right) \quad (9)$$

$$T \in [T_C - \sigma, T_C + \sigma] \quad (10)$$

式中: R_a 表示空调热阻系数; C_a 表示空调热容; Q_a 表示空调功率; T_{out} 表示环境温度; T_C 表示用户设置的舒适温度; σ 表示舒适温度的波动最大值。

2 用户不确定行为描述及其量化

用户的不确定行为会影响用电计划的执行效果, 当用户的实际用电意愿与家庭能源管理系统根据用户用电习惯生成的用电计划相违背时, 会导致家庭总功率越限, 用户的用电舒适度降低等后果。基于此, 本文定义了舒适度违反率的概念, 对用户不确定行为进行量化处理。

2.1 用户不确定行为描述

1) 可转移类负荷

根据用户用电习惯, 一般在不晚于 t_c 之前完成用电任务, 但在实际使用时, 用户可能提前或推迟截止时间至 t_f (或 t'_f)。这可能会导致用户无法在改变后的截止时间内完成用电计划, 降低用户的舒适度。

如图 2、图 3 所示, t_b 表示用户允许的负荷起始时间; t'_b 表示用电计划中的负荷实际开启时间; t_c 表示用户允许的负荷截止时间; t_f 、 t'_f 表示提前或推迟后的用户允许负荷截止时间。

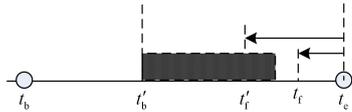


图 2 可转移类负荷用户不确定行为示意图

Fig. 2 Diagram of user uncertainty behavior of transferable loads

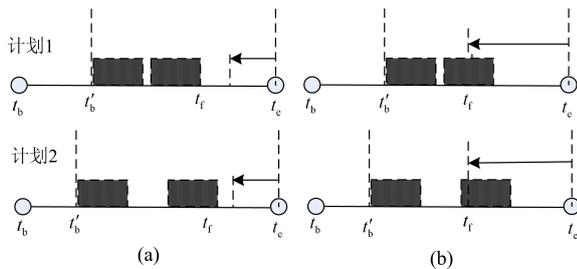


图 3 可转移可中断负荷用户不确定行为示意图

Fig. 3 Diagram of user uncertainty behavior of interruptible loads

相同的截止时间的提前对于不同用电计划来说, 产生的影响却有所不同。如图 3(a)所示, 截止

时间的提前并不会影响两个计划的执行效果; 而图 3(b)则不同, 计划 1 相较于计划 2 违反用户舒适度的程度更严重, 这就说明两种计划应对用户不确定行为的能力是不同的。

2) 温控类负荷

温控负荷在保障用户的热舒适度的情况下应尽可能多地降低用电成本。但实际使用时, 用户可能会进行未定计划的洗浴, 如图 4 所示, T_{max} 、 T_{min} 表示用户允许的水箱温度的上限和下限。当热水器中的水温接近或低于舒适温度下限时, 洗浴水温可能低于用户所需的温度, 使得用户在洗浴期间感到不舒适; 同理, 用户可能会在某一段时间内改变空调的舒适温度, 这时若按照原有用电计划可能会导致用户的舒适度降低。

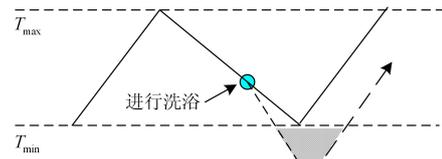


图 4 热水器水箱温度示意图

Fig. 4 Diagram of tank temperature of heater

2.2 用户不确定行为量化

由上述分析可以看出, 用户的不确定行为会影响原有用电计划的使用效果, 本文采用舒适度违反率来量化表示用户行为对用电计划带来的影响。

1) 可转移类负荷

假设用户截止时间的提前满足 $x \sim N(\mu, \xi^2)$, 则

由置信区间的定义可得: $P\{-Z_{\alpha/2} < \frac{x-\mu}{\xi} < Z_{\alpha/2}\} =$

$1-\alpha$, 从而得到 μ 的置信度为 $1-\alpha$ 的置信区间为 $(x - Z_{\alpha/2}\xi, x + Z_{\alpha/2}\xi)$ 。采用蒙特卡洛抽样生成具有不同提前截止时间的 N 个场景, 则定义可转移类负荷的舒适度违反率如式(11)所示。

$$C_{vio_{TL}} = \frac{\sum_{j=1}^N \left(\sum_{i=t_f}^{t_c} x_{TL,i} \cdot P_{TL} \cdot \Delta t \right)}{E_{TL} \cdot N} \quad (11)$$

式中: t_f 表示提前后的截止时间; t_c 表示预期的截止时间。

2) 温控类负荷

(1) 热水器负荷: 根据用户使用习惯, 假设一个不确定的洗浴发生在 (a, b) 期间, 起始时间在该时间段内均匀分布。洗浴的耗水量为 60 L 的 40° 的热水, 洗浴的持续时间为 30 min。采用蒙特卡罗采样产生 N 个场景, 则定义热水器负荷的舒适度违反率如式(12)所示。

$$Cvio_{TCL} = \frac{\sum_{i=1}^N E_{i,short}}{E_{demand} \cdot N} \quad (12)$$

式中： $E_{i,short}$ 表示在场景 i 中的热短缺； E_{demand} 表示一次洗浴所需要的热量。

(2) 空调负荷：根据用户的使用习惯，假设用户可能对于空调舒适温度的改变发生在 (a, b) 期间，起始时间在该时间段内均匀分布。舒适温度区间为 $T \in [T_C - \sigma', T_C + \sigma']$ ，持续时间为 60 min。采用蒙特卡罗产生 N 个场景，则定义空调负荷的舒适度违反率如式(13)所示。

$$Cvio_{TCL} = \frac{\sum_{i=1}^N t_{i,uncom}}{t_{total} \cdot N} \quad (13)$$

式中： $t_{i,uncom}$ 表示超出舒适温度区间所持续的时间； t_{total} 表示温度舒适改变所持续的时间。

其中， (a, b) 为热水器和空调的舒适度可能发生改变的区间，根据用户使用习惯选取，为仿真方便，本文统一选取为 19:00—23:00。

3 家电实时关断机制

当用户未按计划执行用电并导致家庭总功率超出功率阈值范围时，需要对该时刻的用电情况进行重新规划。为了实现家电的合理控制，需要制定有效的关断规则来暂缓部分家电的使用。通过定义二维优先级的概念，当出现使用冲突时，计算该时段开启家电的二维优先级，优先级较小的选择关闭，暂缓使用。

3.1 家电一维优先级定义

1) 可转移类负荷

可转移类负荷的一维优先级通过用电任务的剩余时间与当前时间到用户允许的负荷截止时间的关系表示，其一维优先级如式(14)所示。

$$pri1_{TL} = \frac{\sum_{i=1}^t x_{TL,i}}{t_e - t} \quad (14)$$

式中： t_e 表示用户允许的负荷截止时间； t 表示当前时间。

2) 温控类负荷

温控负荷的一维优先级如图 5、图 6 所示， T_{max} 表示舒适温度上限， T_{min} 表示舒适温度下限；通过当前允许的关闭时长与最大允许关闭时长的关系表示，其一维优先级如式(15)所示。

$$pri1_{TCL} = 1 - \frac{t_{off,cur}}{t_{off,max}} \quad (15)$$

式中： $t_{off,max}$ 表示最长关停时间； $t_{off,cur}$ 表示当前允许最长关停时间。

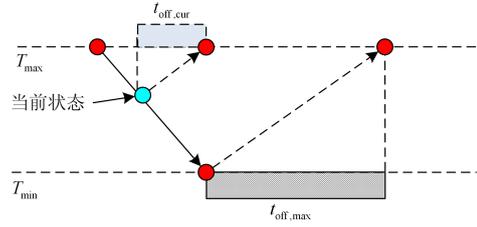


图 5 空调负荷一维优先级示意图

Fig. 5 Diagram of one-dimensional priority of air conditioner

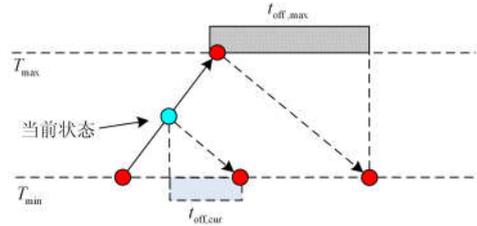


图 6 热水器负荷一维优先级示意图

Fig. 6 Diagram of one-dimensional priority of water heater

3.2 家电二维优先级定义

由于用户对于不同家电的习惯使用时间不同，只采用一维优先级可能会导致部分允许使用时长不同的家电在使用紧急程度上出现偏差，因此定义了二维优先级来对关断机制进行进一步的细化。

1) 可转移类负荷

根据当前时间点 to 使用截止时间点 te 的位置关系，将剩余时间平均分为 4 段，如图 7 所示，分别表示该电器处于 4 个不同的紧急等级，其中 L_i 表示不同紧急等级的截止时间。

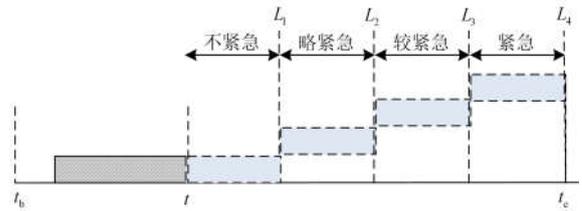


图 7 可转移类负荷二维优先级示意图

Fig. 7 Diagram of two-dimensional priority of transferable loads

根据家电的一维优先级计算结果，对家电二维优先级进行加权，权值 m 如表 1 所示。

表 1 二维优先级权值表示

Table 1 Representation of weight of two-dimensional priority				
$pri1_{TL}(pri1_{TCL})$	$(0, \frac{1}{4})$	$(\frac{1}{4}, \frac{2}{4})$	$(\frac{2}{4}, \frac{3}{4})$	$(\frac{3}{4}, 1)$
m	1	2	3	4

因此，定义可转移类负荷的二维优先级如式(16)所示。

$$pri2_{TL} = e^m + \frac{(L_i - t)}{60} \quad (16)$$

2) 温控负荷

温控负荷的二维优先级权值表示如表 1 所示, 定义其二维优先级如式(17)所示。

$$pri2_{TCL} = e^m + \frac{t_{off,cur}}{60} \quad (17)$$

4 优化控制策略

本文的实时优化控制策略如图 8 所示, 主要包含生成用电计划、判断用户行为和实时修改用电计划三大步骤, 下面分别详细说明。

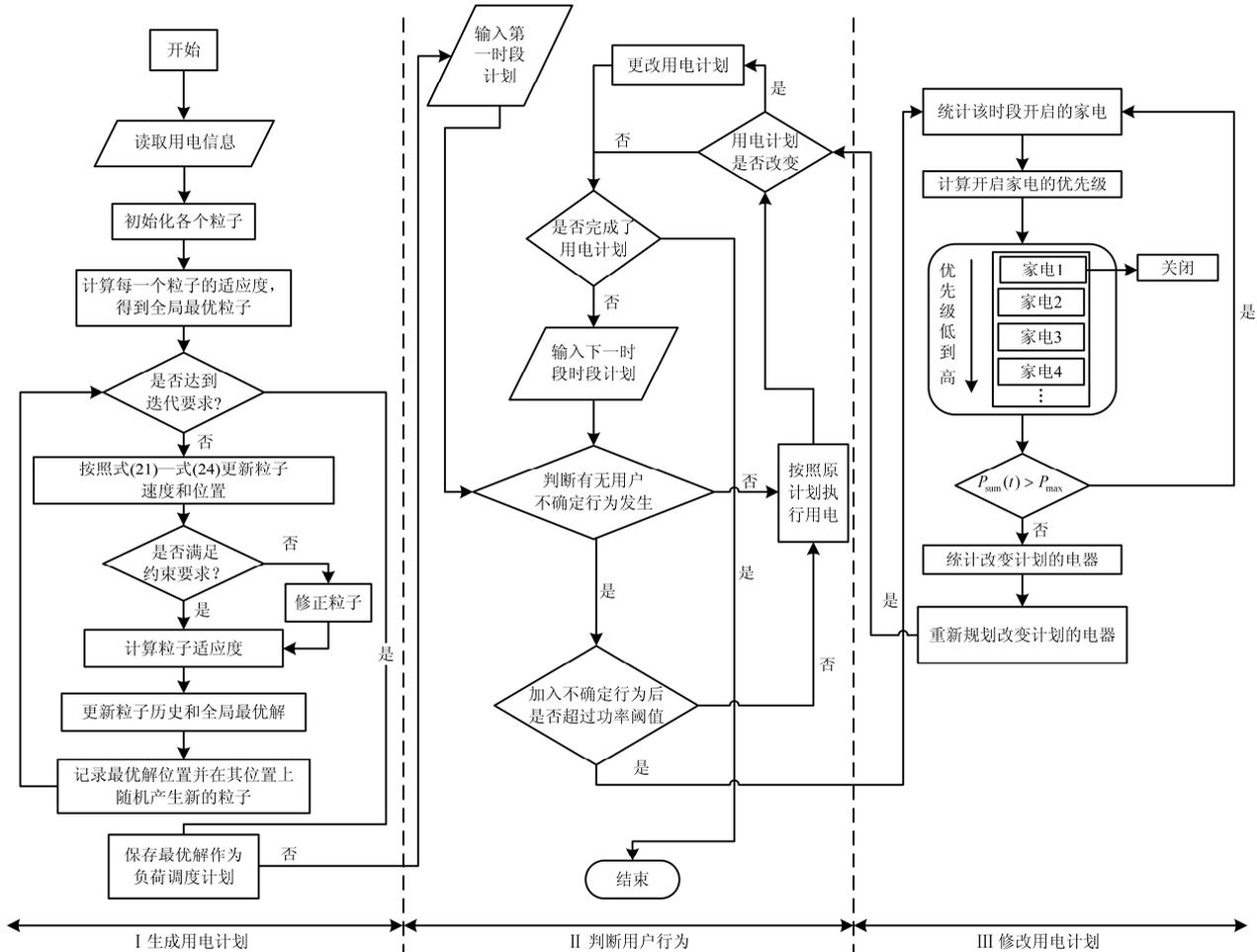


图 8 算法流程图

Fig. 8 Flow diagram of algorithm

4.1 生成用电计划

在降低用户用电负荷峰值的前提下, 为了得到受用户行为影响较小和更具有经济性的用电计划, 本文应以最小化舒适度违反率和用电成本为目标, 如式(18)、式(19)所示。但考虑到两个目标的数量级差异和家庭功率的约束限制, 通过归一化和罚函数法处理后的优化目标函数如式(22)所示。

$$Cvio = Cvio_{NL} + Cvio_{IL} + Cvio_{TCL} \quad (18)$$

$$Cost = \sum_{t=1}^n C(t) \cdot P(t) \quad (19)$$

$$\min \left(\frac{Cvio}{Cvio_{max}} + \frac{Cost}{Cost_{max}} + \sigma_k \cdot \sum_{i=1}^M (\max\{0, g(t)\})^2 \right) \quad (20)$$

式中: $Cvio_{max}$ 、 $Cost_{max}$ 分别表示迭代中所出现的舒适度违反率和用电成本的最大值; σ_k 为惩罚因子, 这里采用一个递增的正数数列 σ_k 来表示惩罚因子; 其中 $g(t) = P_{sum}(t) - P_{max}$, $P_{sum}(t)$ 、 P_{max} 分别表示 t 时刻的家庭总功率和功率上限。

生成用电计划步骤如下。

1) 读取用户用电信息, 设置改进粒子群算法的参数。

2) 初始化粒子的位置变量 $X_i = [x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}]$, 速度变量 $V_i = [v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,n}]$ 。

3) 根据式(20)计算每个粒子的目标值, 寻找最优粒子 P_{gbest} , 记录该次迭代中的最优粒子 P_{gbest} 位置, 并在其位置随机生成新的粒子来代替。

4) 根据式(21)~式(24)更新粒子的位置, 速度^[19]。

$$v_{i,j}(t+1) = \omega \cdot v_{i,j}(t) + c_1 \cdot r_1 \cdot [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2 \cdot r_2 \cdot [p_{g,j} - x_{i,j}(t)] \quad (21)$$

$$s_{i,j}(v_{i,j}(t+1)) = \begin{cases} 1 - \frac{2}{1 + \exp(-v_{i,j}(t+1))}, & \text{if } v_{i,j}(t+1) \leq 0 \\ \frac{2}{1 + \exp(-v_{i,j}(t+1))} - 1, & \text{if } v_{i,j}(t+1) > 0 \end{cases} \quad (22)$$

当 $v_{i,j}(t) < 0$ 时,

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} 0 & \text{if } \text{rand}() \leq s(v_{i,j}(t+1)) \\ x_{i,j}(t+1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

当 $v_{i,j}(t) > 0$ 时,

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{rand}() \leq s(v_{i,j}(t+1)) \\ x_{i,j}(t+1) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

5) 由于家电模型中包含较多约束条件, 在对粒子初始化和更新时需要不对不满足约束的粒子进行修正, 以满足约束条件要求, 本文设定修正规则如下。

(1) 可转移不可中断负荷: 每次迭代后, 采用只将速度最大变量及其后续的 N 个变量置 1 的方法来修正更新粒子。

(2) 可转移可中断运行的负荷: 采用速度和粒子当前状态对更新后的粒子进行修正, 若更新后可中断运行负荷运行时间超过计划时间, 则对速度改变量大于 0 且当前状态为 1 的位置置 0; 若更新后可中断运行负荷的运行时间少于计划时间, 则对速度改变量小于 0 且当前状态为 0 的位置置 1。

(3) 温控负荷: 对于更新后温度越限的粒子采用强制置 1 或 0 的方式修正粒子。

6) 判断是否达到迭代次数 M 。若否, 则重复步骤 3)、4)、5); 若是, 保存该用电计划作为用户初始用电计划。

4.2 判断与修改用电计划

1) 判断用户行为

家庭能源管理系统将初始用电计划提供给用户, 并根据用户实际用电情况判断用户用电行为与初始用电计划是否一致。

根据上述用电初始计划执行用电任务, 判断用户行为与用电计划是否一致。

若一致, 则按照用电计划用电。若不一致, 则

判断是否超过家庭功率阈值: 若没有超过功率阈值, 则按照原用电计划继续安排家电使用; 若超过功率阈值, 则需要家电实时关断机制关闭部分家电, 进入步骤 III, 修改用电计划。

2) 修改用电计划

当出现家电的总功率 $P_{\text{sum}}(t)$ 超过 P_{max} 时, 首先, 统计原计划中该时刻开启的家电, 按照家电实时关断机制计算开启家电的二维优先级; 随后, 按照优先级由低到高的顺序依次关闭优先级最低的家电, 直至家电总功率 $P_{\text{sum}}(t)$ 不超过 P_{max} ; 最后, 统计关闭的家电, 以最小用电成本为目标重新规划关闭家电的剩余时段的使用计划, 并实时更新原有计划。

5 算例分析

5.1 算例参数设置

为了验证本文控制策略的有效性, 选取的调控家电包括: 空调、热水器、电饭煲、电炒锅、洗碗机、洗衣机、烘干机、吸尘器为代表的几种电器。

选取的分时电价信息如表 2 所示^[20]。

表 2 分时电价表

电价类型	电价时段	价格/(元/ kWh)
低谷电价	0:00—7:00	0.208
	22:00—24:00	
平时电价	7:00—11:00	0.52
	14:00—18:00	
高峰电价	11:00—14:00	0.832
	18:00—19:00	
尖峰电价	21:00—22:00	0.926
	19:00—21:00	

本文的其他参数设置如表 3 所示。

表 3 仿真参数设置

参数	数值	参数	数值
c_1, c_2	1.4	M	120
μ_{max}	0.8	σ_1	0.2
μ_{min}	0.5		

热水器和空调的参数参考文献[8]: θ_{en} 为 15° , M 为 80 L, R_h 为 400, C_h 为 1.52, Q_h 为 863.4, R_a 为 0.120 8, C_a 为 3 599.9, Q_a 为 400。选取 θ_{min} 为 40° , θ_{max} 为 70° ; T_{out} 为 35° , T_c 为 23° , σ 为 4° , σ' 为 2° 。根据用户的历史用电信息得到用户截止时间的提前有 95% 的概率落在 (0, 1.5) h 之间。

5.2 仿真分析

如图 9 所示, 优化前表示用户随机使用时的负

荷状态, 采用文献[10]中算法作为对比算法。可以看出, 优化前家庭总负荷在 18:00 左右以及 20:00 左右都达到了 9 kW。对比算法和本文优化算法都可以将家庭总负荷降低至功率阈值 6 kW 以下, 起到了很好的削峰效果, 保证了用户的用电安全。

从表 4 可以看出, 在优化后, 用户的用电成本有明显的降低, 而且, 由于考虑了用户的不确定行为对于调控方案的影响, 优化后的舒适度违反率大大降低, 有利于控制策略在不影响用户舒适度的情况下根据用户行为调整用电计划。文献[10]中对比算法的舒适度违反率达到了比本文优化算法更低的 3.48%, 但这是付出了更多的家电调控灵活性和用电成本来获得的。对用户来说, 付出较多的成本来换取舒适度违反率的略微降低的用电方案被采纳率是较低的。

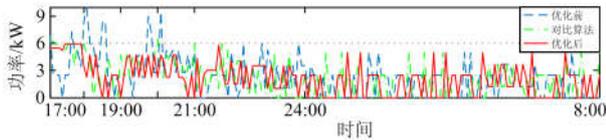


图 9 家庭负荷曲线对比图

Fig. 9 Comparison of family load curves before and after optimization

表 4 用户舒适度违反率以及用电成本对比
Table 4 Comparison of user comfort violation rate and electricity cost

	用电成本/元	舒适度违反率/%
优化前	18.41	31.30
对比算法	17.42	3.48
优化后	16.50	6.91

表 5 给出了不确定性在温控类负荷中持续时间 (a, b) 长度由短到长的 1、2、3 种情况下, 算法得到的最优家电控制方案所需的用电成本以及算法计算时间。可以看出, 当不确定性可能持续的时间越长时, 所需要的计算时间就会越长, 为了达到较低的舒适度违反率, 需要付出更多的用电成本来维持温控类负荷的温度在舒适温度内。

表 5 不同情况下用户用电成本和算法运行时间对比

Table 5 Comparison of user power cost and algorithm running time under different conditions

比较情形	用电成本/元	运行时间/s
1	16.50	438.79
2	16.74	464.49
3	16.85	480.22

由图 10—图 12 比较分析可以发现, 在 17:30—18:30 时段由于计划外电器烤箱的开启, 按照原计划使用会导致功率越限, 本文算法在 17:30, 即家

庭总功率初次越限时刻, 按照该时刻开启的家电的优先级调整用电情况, 关闭优先级较低的水热水器, 并重新制定了热水器的使用计划; 在 17:40 时刻, 关闭优先级较低的空调, 并重新制定了空调的使用计划。

根据图 10 可以看出用户在尖峰电价时刻选择参与了需求响应, 同时在 20:00—20:20 期间用户开启了热水壶, 且结合图 11 可以发现, 用户在 20:10 时刻进行了洗浴。为了保证用户洗浴的用水温度, 在 20:10—20:40 时间段, 用电策略在该时段选择持续保持热水器的开启。但是为了保证用户的家庭总功率低于功率阈值, 只能在该时段内关闭空调的使用, 这也导致了空调在该时间段内的温度超出了舒适温度的限制, 但在在 22:00—23:00 时间段用户选择改变空调的舒适温度区间的时段内, 用电策略也可以做出响应调整, 使用户的舒适度违反情况降到最低, 如图 12 所示。

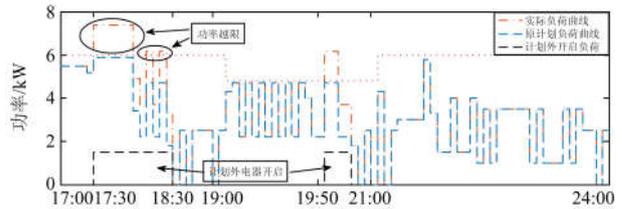


图 10 计划外电器开启后家庭总功率示意图

Fig. 10 Diagram of the total power of households after unplanned electrical appliances

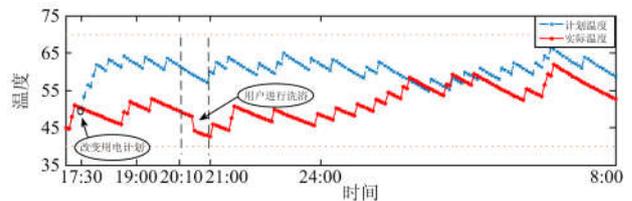


图 11 热水器计划和实际温度对比图

Fig. 11 Chart of plan and actual temperature of water heater

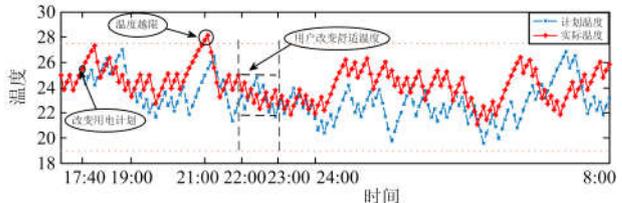


图 12 空调计划和实际温度对比图

Fig. 12 Chart of plan and actual temperature of air conditioner

6 结语

本文通过对用户舒适度违反率的定义和家电

实时关断机制的制定, 提出了考虑用户不确定行为的智能家电控制策略。通过仿真结果, 说明了本文优化策略可以为用户提供用电计划以降低用户的用电成本和用户不确定行为的影响。同时, 可以在用户行为与用电计划不一致时, 根据用户实际用电情况实施修改和更新用电计划, 在应对用户不确定行为方面具较好的有效性。

参考文献

- [1] 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.
- [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.
ZHANG Yanyu, ZENG Peng, ZANG Chuazhi. Study on family energy management system in smart grid environment[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 144-154.
- [3] 李逐云, 雷霞, 邱少引, 等. 考虑“源-网-荷”三方利益的主动配电网协调规划[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 378-386.
LI Zhuyun, LEI Xia, QIU Shaoyin, et al. Coordinated planning of active distribution network considering “source-grid-load” benefits[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 378-386.
- [4] 许汉平, 李姚旺, 苗世洪, 等. 考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源—荷—储”协调互动优化调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 18-25.
XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on “source-load-energy storage” coordination in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 18-25.
- [5] 刘巍, 黄翌, 李鹏, 等. 面向智能配电网的大数据统一支撑平台体系与构架[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊1): 486-491.
LIU Wei, HUANG Zhao, LI Peng, et al. Summary about system and framework of unified supporting platform of big data for smart distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 486-491.
- [6] 史常凯, 张波, 盛万兴, 等. 灵活互动智能用电的技术架构探讨[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2868-2874.
SHI Changkai, ZHANG Bo, SHENG Wanxing, et al. A discussion on technical architecture for flexible intelligent interactive power utilization[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2868-2874.
- [7] 李扬, 王蓓蓓, 李方兴. 灵活互动的智能用电展望与思考[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 2-9.
LI Yang, WANG Beibei, LI Fangxing. The prospect and thinking of flexible and interactive intelligent electricity use[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 2-9.
- [8] 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. Experimental scheduling algorithm for home energy management system in smart grid environment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 18-26.
- [9] 孙博宇, 喻洁, 梅军, 等. 考虑可调负荷集群响应不确定性的联合调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 61-67.
SUN Boyu, YU Jie, MA Jun, et al. Joint scheduling model considering the uncertainty of adjustable load cluster[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 61-67.
- [10] 张彦, 张涛, 刘亚杰, 等. 基于模型预测控制的家居能源局域网最优能量管理研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3656-3666.
ZHANG Yan, ZHANG Tao, LIU Yajie, et al. Study on optimal energy management of home energy LAN based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3656-3666.
- [11] 王守相, 孙智卿, 刘喆. 面向智能用电的家庭能量协同调度策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 108-113.
WANG Shouxiang, SUN Zhiqing, LIU Zhe. Study on family energy cooperative dispatching strategy for intelligent power consumption[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 108-113.
- [12] 孙宇军, 李扬, 王蓓蓓, 等. 计及不确定性需求响应的日前调度计划模型[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2708-2714.
SUN Yujun, LI Yang, WANG Beibei, et al. The day before the scheduling model and the uncertainty of demand response[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2708-2714.
- [13] 姜勇, 杨雪纯, 王蓓蓓, 等. 计及需求响应不确定性的智能用电双向互动仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(9): 48-55.
JIANG Yong, YANG Xuechun, WANG Beibei, et al.

- Bi-directional interactive simulation of intelligent power consumption considering demand response uncertainty[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(9): 48-55.
- [14] 陶顺, 陈鹏伟, 肖湘宁, 等. 智能配电网不确定性建模与供电特征优化技术综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 77-91.
- TAO Shun, CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, et al. Overview of uncertainty modeling and power supply feature optimization technology for smart distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(10): 77-91.
- [15] 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.
- [16] 魏韡, 刘锋, 梅生伟. 电力系统鲁棒经济调度(一)理论基础[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 37-43.
- WEI Wei, LIU Feng, MEI Shengwei. Economic dispatch of power system robust (1) the basic theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 37-43.
- [17] 梅生伟, 郭文涛, 王莹莹, 等. 一类电力系统鲁棒优化问题的博弈模型及应用实例[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 47-56.
- MEI Shengwei, GUO Wentao, WANG Yingying, et al. A class of game models and application examples for robust optimization of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 47-56.
- [18] PATERAKIS N G, ERDINC O, BAKIRTZIS A G, et al. Optimal household appliances scheduling under day-ahead pricing and load-shaping demand response strategies[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2015, 11(6): 1509-1519.
- [19] 刘建华. 粒子群算法的基本理论及其改进研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- LIU Jianhua. Basic theory and improvement of particle swarm algorithm[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [20] 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 Yu, JING Zhanghao, LUO Zhiyong, et al. Intelligent appliance control scheme based on time-of-use price[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 717-723.

收稿日期: 2017-08-10; 修回日期: 2018-02-11

作者简介:

孙毅(1973—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统信息通信技术; E-mail: sy@ncepu.edu.cn

裴俊亦(1992—), 男, 通信作者, 研究生, 研究方向为电力系统信息通信技术。E-mail: 1451014257@qq.com

(编辑 葛艳娜)