

考虑用户用电灵活性的社区能源系统双层优化

卢一涵¹, 余晓丹^{1*}, 靳小龙¹, 王红梅^{2,3}, 贾宏杰¹, 穆云飞¹

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072;

2. 天津医科大学基础医学院, 天津市 和平区 300070;

3. 康奈尔大学电气与计算机工程学院, 美国 伊萨卡 14850)

Bi-level Optimization Framework of Community Energy System Considering User Flexibility

LU Yihan¹, YU Xiaodan^{1*}, JIN Xiaolong¹, WANG Hongmei^{2,3}, JIA Hongjie¹, MU Yunfei¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China;

2. School of Basic Medicine, Tianjin Medical University, Heping District, Tianjin 300070, China;

3. School of Electrical and Computer Engineering, Cornell University, Ithaca, NY 14850, USA)

Abstract: In this paper, we propose a bi-level optimization framework for a community energy system that considers the flexibility of users' electricity loads. At the upper level, the energy operator maximizes its profits by optimizing electricity sale prices. At the lower level, a thermal dynamic model reflecting the heat storage characteristics of electric water heaters and the operating model reflecting the load transfer characteristics of dishwashers and washing machines are developed. Consumers minimize their electricity costs by controlling the switching of their appliances depending on the electricity price provided by the upper level. Subsequently, the two-level optimization problem is iteratively solved. Numerical results show that the energy operator can use their pricing flexibility to optimize the electricity sale price, and users can provide demand responses to reduce electricity costs. Moreover, the proposed bi-level optimization method can combine the flexibility from both the supply and demand sides and benefit both the community energy operator and consumers.

Keywords: Bi-level optimization; demand response; electricity price; flexibility

摘要: 提出一种考虑用户用电灵活性的社区能源系统双层优化模型, 在上层, 能源运营商通过优化售电价格来最大化其利润; 在下层, 建立了反映电热水器蓄热特性的热动态模型以及反映洗碗机和洗衣机的负荷可转移特点的运行特性模型。用户根据运营商提供的电价灵活控制电负荷的开关状态

及运行时段, 最大程度地降低其用电成本。然后, 通过上下两层迭代求解该双层优化问题。仿真结果表明, 能源运营商可以发挥其定价的灵活性, 优化售电价格; 而用户可以利用其需求响应能力, 从而降低用电成本; 此外, 提出的双层优化方法可以将供需双方的灵活性结合起来, 使能源运营商和用户受益均衡。

关键词: 双层优化; 需求响应; 电价; 用电灵活性

0 引言

在全世界范围内, 能源和环境形势日趋严峻, 这使得发展可再生能源、节能减排、提高能效等技术受到广泛关注^[1]。2020年《中国建筑节能年度发展研究报告》显示, 楼宇建筑运行总能耗约占全社会能耗的23%^[2]。因此, 充分挖掘住宅楼宇灵活可控负荷的需求响应能力, 可以缓解建筑行业能源需求的快速增长给能源供应带来的压力, 对缓解能源需求增长与能源紧缺矛盾、能源利用与环境保护矛盾具有重要意义^[3]。

在中国很多地区, 住宅用户采用电热水器通过电转热的方式获取生活热水。研究表明, 电热水器是住宅建筑中的重要设备, 能源消耗约占住宅每日能源需求的20%, 是造成住宅用电需求早晚高峰的最大因素^[4]。尽管单台电热水器负荷容量较小, 但住宅社区中全体用户的电热水器集群总体能耗较大, 具备参与电需求响应的能力^[5]。目前基于热水器的建模方法、控制策略等方面已有较多研究成果。文献[6]以电热水器作为家居温控负荷的代表, 分析了在不同调整舒适区间下

基金项目: 国家自然科学基金项目(51625702, U1766210); 国家电网公司科技项目(SGTJJY00GHJS1800123)。

National Natural Science Foundation of China (51625702, U1766210); Science and Technology Foundation of SGCC (SGTJJY00GHJS1800123).

基于需求侧响应的家庭电热水器优化调度问题。文献[7]提出了一种考虑热水消耗和室内环境温度不确定性的电热水器经济调度策略,通过热水器的需求响应降低用能成本。文献[8]通过对用户群进行适当的控制,提出了一种有利于电网削峰填谷的热水器控制策略。

用户的电热水器能够利用水箱的蓄热能力发挥其灵活性。而居民负荷中的另外一些柔性负荷设备(如洗衣机、洗碗机等)虽不具备储能能力,但可以在不影响用户使用的前提下根据不同时段的电价优化设备开启的时间,从而降低居民用电成本^[9-10]。在居民日常用电设备中,该类可转移柔性电负荷也占据了一定的比重。

降低能耗成本不仅有赖于用户侧的用能模式,还需要考虑更合理的供能方式。当大量用户主动参与需求响应时,上级能源系统将难以直接管理该部分资源^[11]。在这样的情景下,社区能源运营商可以将参与需求响应的分散用户集合起来,围绕用户的综合能源需求开展服务,为用户提供节能且高效的集中供能方案^[12]。

事实上,在社区能源服务定价策略中,终端用户可以通过需求响应从被动的适从者转变成更积极的角色^[13]。已有一些研究考虑用户侧的灵活性对能源销售方定价发挥的作用。具体而言,这些研究将运营商与用户之间的互动描述为一个双层优化问题,通过两者间的协同优化和需求侧资源的灵活调度,实现双方利益的优化^[14]。文献[15]通过双层优化的方法确定了能够平衡公用事业公司和大型工业客户之间利益的最佳零售电价。文献[16]提出了一种双层最优低碳调度,同时满足能源服务机构产能和用户用能的经济性。文献[17]提出一种融合家庭柔性负荷管理和售电公司售电决策的优化模型,旨在利用家庭柔性负荷的储能特性来协调售用双方的利益,提高双方经济性。文献[18]提出了一种综合负荷聚合商和上级能源系统的互动均衡模型,通过价格机制,实现上级能源系统与综合负荷聚合商的互利共赢。然而上述研究并未同时考虑用户侧多类型柔性用电设备(如以电热水器为代表的时延动态电负荷以及以洗衣机、洗碗机等为代表的可转移柔性电负荷)的灵活性,及该灵活性对能源销售方定价发挥的作用。

本文在上述双层优化的基础上,进一步提出一种考虑用户用电灵活性的社区能源系统日前调度策略。该策略用于指导社区能源运营商的定价并激励用户参

与电需求响应,从而达到使双方受益均衡的目的。

本文作为社区能源运营商与用户需求响应协同优化研究的一个初步探索,将工作聚焦于充分考虑电力用户需求响应能力制定优化策略。因热水器的工作特性及其使用的广泛性,本文以热水器作为实现需求响应的典型负荷,同时考虑用户集群的其他柔性电负荷设备(洗碗机和洗衣机)的需求响应能力。

本文的主要工作如下:

1) 本文结合反映电热水器蓄热特性的热动态模型、反映洗碗机和洗衣机的负荷可转移特点的运行特性模型,在综合考虑用户舒适度、用户偏好时间等因素的情况下,提出了用户侧精细化的电需求响应模型。

2) 本文利用了用户侧的电需求响应能力参与社区综合能源系统调度策略的制定,构建了考虑用户用电灵活性的社区能源系统日前双层优化调度框架。在该框架中,用户的灵活用电设备通过控制器与社区能源运营商进行信息传递,实现运营商和用户之间的双向互动。

1 双层优化数学模型

如图1所示,社区能源系统由社区能源运营商、配电网以及终端建筑用户组成。社区能源运营商位

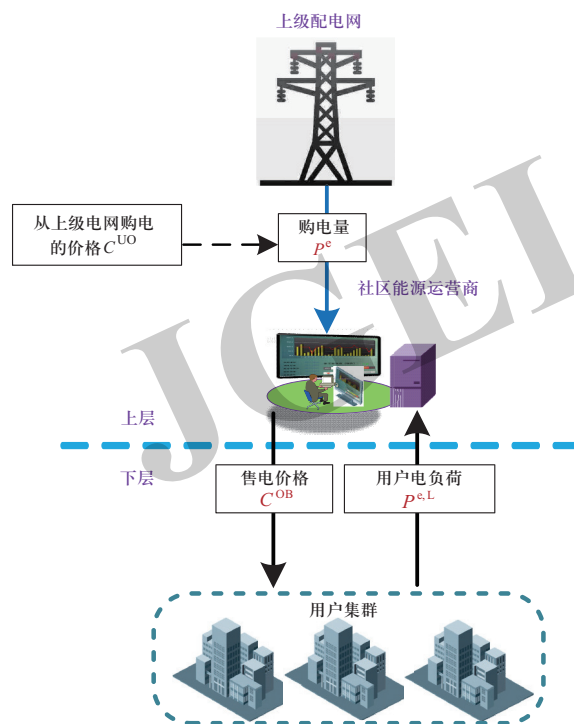


图1 社区能源系统双层优化框架

Fig. 1 Framework of the bi-level optimization model

于上层，用户位于下层。能源运营商根据从上级电网购电的价格和用户的用能情况制定售电价格（ C^{OB} ）和从上级购买的电量（ P^e ），实现利润最大化；用户则根据运营商制定的电价，通过需求响应安排电负荷（ $P^{e,L}$ ），实现用电成本最小化，上下层互相影响。

1.1 上层模型——社区能源运营商

1.1.1 目标函数

上层能源运营商的优化目标为销售利润最大化。本文中的销售利润由向用户售电的收益减去从上级购电的成本构成。

$$\max TP = \sum_{t=1}^T [\sum_{n=1}^N (C_t^{OB} P_{n,t}^{e,L} \Delta t) - C_t^{UO} P_t^e \Delta t] \quad (1)$$

式中： C_t^{OB} 为 t 时段运营商（operator）销售给用户（building consumers）的电价； $P_{n,t}^{e,L}$ 为 t 时段用户的电负荷； C_t^{UO} 为 t 时段上级电网（upper grid）销售给运营商（operator）的电价格； $P_t^e \Delta t$ 为 t 时段运营商从上级电网购买的电能； N 为用户的数量。本文设定 $\Delta t=15$ min，全天的时段数 $T=96$ 。

1.1.2 约束条件

1) 配电网约束。

为了保证社区配电网的安全稳定运行，需要考虑运营商和用户之间配电网的运行约束。本文采用单向单分支径向分布电路模型。总线 n 是发送端， $n+1$ 是接收端。 $P_n + iQ_n$ 是节点 n 的复功率； $P_{n+1}^{load} + iQ_{n+1}^{load}$ 是节点（ $n+1$ ）所带负荷的复功率； $r_f + ix_f$ 是从节点 n 到节点 $n+1$ 线路的复阻抗。 V_n 是节点 n 的电压，每个节点的潮流表示为^[19]

$$P_{n+1} = P_n - r_f \frac{P_n^2 + Q_n^2}{V_n^2} - P_{n+1}^{load} \quad (2)$$

$$Q_{n+1} = Q_n - x_f \frac{P_n^2 + Q_n^2}{V_n^2} - Q_{n+1}^{load} \quad (3)$$

$$V_{n+1}^2 = V_n^2 - 2(r_f P_n + x_f Q_n) + (r_f^2 + x_f^2) \frac{P_n^2 + Q_n^2}{V_n^2} \quad (4)$$

为了使配电网正常工作，沿线的电压变化应在一定范围之内^[19]：

$$1 - \varepsilon \leq V_{n*} \leq 1 + \varepsilon \quad (5)$$

式中： V_{n*} 为节点 n 的电压标么值； ε 取0.05。

2) 电平衡约束。

为保证社区内供、用电平衡，运营商在 t 时刻购买的电能应与用户消耗的电功率相等：

$$P_t^e = \sum_{n=1}^N P_{n,t}^{e,L} + P_t^{loss} \quad (6)$$

式中： P_t^{loss} 为 t 时刻社区配电网的有功损耗，其计算公

式为：

$$P_t^{loss} = \sum_n r_{f,n} \frac{P_n^2 + Q_n^2}{V_n^2} \quad (7)$$

3) 售电价格约束。

在设置售电价格时，运营商需要考虑用户的购买意愿以及自身的收益。事实上，运营商与上级电网的能源交易价格通常低于用户直接与上级电网的交易价格^[20]。运营商的最优能源价格需要在优化区间范围内通过优化求解制定。优化区间的设定是以用户从上级电网购电的价格曲线为基准，在保证全天平均价格不变的前提下，拟合出一条较为平滑的价格曲线。随后，将这条较为平滑的价格曲线分别增大到1.4倍和降低到0.6倍得到优化区间的上下限^[21]，如式（8）所示。这样可以在合乎价格常理的情况下放宽优化的区间，扩大了寻优的范围，进而调动用户主动参与价格优化的积极性。

另外，运营商不能为了盈利而任意抬高价格至优化区间上限。因此，公式（9）约束全天优化价格的平均值不高于用户从上级电网中购买电价的平均值，从而使得运营商在制定价格时综合考虑全天电价的合理性^[16]。这样的设置能够保证优化价格合理并促进用户参与需求响应，避免出现电价过高导致用户无法降低用能成本，进而失去参与需求响应积极性的问题。

$$C_t^{OB,min} \leq C_t^{OB} \leq C_t^{OB,max} \quad (8)$$

$$\sum_{t=1}^T C_t^{OB} / T \leq \sum_{t=1}^T C_t^{UB} / T \quad (9)$$

式中： $C_t^{OB,min}$ 和 $C_t^{OB,max}$ 分别为运营商在 t 时刻售电价格的下限和上限； C_t^{UB} 为用户从上级电网购电的价格。

1.2 下层模型——住宅建筑用户

下层住宅建筑的电负荷分为不受电价影响的刚性负荷和可随电价而调整的柔性负荷。而柔性电负荷又包括具有储能能力的电热水器负荷和可转移的电负荷设备（本文以洗碗机和洗衣机为例）。

本文将住宅建筑中照明、娱乐、烹饪等用电设备归类为刚性电负荷设备，可根据《中国公共建筑节能设计标准》对其用电量情况进行估计。通常考虑误差的逐时使用率和建筑面积进行估计，单个居民 t 时刻不可控电负荷的预测功率 $P_{1,t}^{e,L,f}$ 可描述为

$$P_{1,t}^{e,L,f} = p_{e,t} \times (L_1 + E_1) \times S_1 \quad (10)$$

式中： $p_{e,t}$ 表示考虑误差的不可控用电设备逐时使用率； L_1 和 E_1 分别表示照明和其他用电设备的功率密度值，

kW/m^2 ; S_i 为住宅建筑使用面积, m^2 。

不同用户的热热水需求具有随机性。文献[22]统计了2004户家庭一天内各时段用水次数的情况,可以在某种程度上反映居民群体的用水行为和热水消耗特点。研究表明,用户的用水高峰一般集中在6:00~8:00和19:00~22:00,通常偏移会在1 h以内。基于上述调查研究的结果,本文模拟出3种较为常见用户类型的热热水需求曲线,如图2所示。

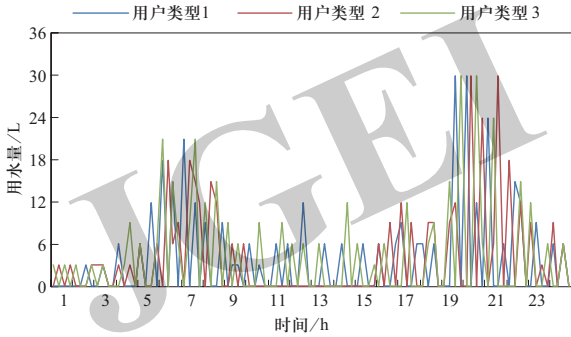


图2 3类用户用水需求曲线

Fig. 2 Demand curves of three types of users

从图中可看出:用户类型1全天在家,且早晚高峰时段开始用水的时间较早,对应老年人用户;用户类型2在9:00~16:30之间都没有热水需求,对应上班族用户;用户类型3综合用户类型1和2两种情况,对应介于两种情况之间的混合型的用户。

洗衣机和洗碗机负荷的使用时间一般由用户自行设定。洗衣机的使用时间一般不受限制,而洗碗机需要在用户用餐之后使用,并保证用户在下次用餐之前使用完毕。

1.2.1 目标函数

本文考虑了多种类型热水用户,其对电价的需求响应行为有差异。因此,下层问题的目标函数为最小化住宅建筑集群的总耗能成本。

$$\min OC = \sum_{t=1}^T (C_t^{\text{OB}} \sum_{n=1}^N P_{n,t}^{\text{e,L}} \Delta t) \quad (11)$$

1.2.2 约束条件

1) 热水器的热动态平衡方程。

本文考虑储水式电热水器,具有自动加热的能力^[5]。由于用户使用或者热水器自然散热,当水温到达舒适温度下限时,热水器开启,进入加热状态直至温度上限,热水器关闭,进入保温状态。如此循环往复,使水温保持在用户舒适范围内。

假设热水器循环加热时主回路供电功率为热水器的额定功率,不加热时进入保温状态,此时的功率消

耗可以忽略不计。电热水器中水温的热动态变化可以表示为

$$T_{t+1}^{\text{ewh}} = T_t^{\text{room}} - \left(T_t^{\text{room}} - \frac{T_t^{\text{ewh}}(W - w_t) + T_t^{\text{room}} w_t}{W} \right) e^{-\Delta t / R^{\text{ewh}} C^{\text{ewh}}} + \mu_t^{\text{ewh}} P^{\text{ewh}} R^{\text{ewh}} - (\mu_t^{\text{ewh}} P^{\text{ewh}} R^{\text{ewh}}) e^{-\Delta t / R^{\text{ewh}} C^{\text{ewh}}} \quad (12)$$

式中: T_t^{ewh} 为 t 时刻热水器水箱内的水温; T_t^{room} 为 t 时刻的环境温度; P^{ewh} 为热水器的功率; R^{ewh} 和 C^{ewh} 分别为热水器的热阻和热容; W 为热水器水箱的水容量; w_t 为 t 时刻用户的用水量。 μ_t^{ewh} 表示 t 时刻的热水器开关状态, $\mu_t^{\text{ewh}}=0$ 代表热水器保温, $\mu_t^{\text{ewh}}=1$ 代表热水器开启。

2) 热水器舒适温度约束。

为了保证用户使用热水器的舒适性,热水器内热水温度应保持在舒适水温区间范围内:

$$T^{\text{ewh,min}} \leq T_t^{\text{ewh}} \leq T^{\text{ewh,max}} \quad (13)$$

式中: $T^{\text{ewh,min}}$ 为用户舒适水温下限; $T^{\text{ewh,max}}$ 为用户舒适水温上限。

3) 其他柔性电负荷的运行约束。

住宅用户可以根据其自身需要设定洗碗机和洗衣机负荷开始运行和必须结束的时间。在该时间段内,负荷可以在任意时刻开始运行,但必须完整运行一个负荷周期^[23]。由此可得洗碗机和洗衣机的运行约束为^[24]

$$\sum_{t=t_s^{\text{dw}}}^{t_e^{\text{dw}}-1} u_{1,t}^{\text{dw}} = T^{\text{dw}} \quad (14)$$

$$\sum_{t=t_s^{\text{wm}}}^{t_e^{\text{wm}}-1} u_{1,t}^{\text{wm}} = T^{\text{wm}} \quad (15)$$

$$\sum_{t=k+1}^{k+T^{\text{dw}}} u_{1,t}^{\text{dw}} \geq T^{\text{dw}} (u_{1,k+1}^{\text{dw}} - u_{1,k}^{\text{dw}}), \forall k \in [t_s^{\text{dw}}-1, t_e^{\text{dw}}-T^{\text{dw}}-1] \quad (16)$$

$$\sum_{t=k+1}^{k+T^{\text{wm}}} u_{1,t}^{\text{wm}} \geq T^{\text{wm}} (u_{1,k+1}^{\text{wm}} - u_{1,k}^{\text{wm}}), \forall k \in [t_s^{\text{wm}}-1, t_e^{\text{wm}}-T^{\text{wm}}-1] \quad (17)$$

式中: $u_{1,t}^{\text{dw}}$ 和 $u_{1,t}^{\text{wm}}$ 分别为单台洗碗机和洗衣机 t 时刻的工作状态,处于工作状态为1,处于非工作状态为0; T^{dw} 和 T^{wm} 分别为洗碗机或洗衣机的负荷运行周期; t_s 和 t_e 分别表示设备可以开始工作的时刻以及必须结束工作的时刻。

热水器开启后即按照加热功率运行。根据热水器的开关状态,单台热水器 t 时刻消耗的电功率 $P_{1,t}^{\text{e,ewh}}$ 可以表示为

$$P_{1,t}^{\text{e,ewh}} = \mu_t^{\text{ewh}} P^{\text{ewh}} \quad (18)$$

洗衣机和洗碗机一旦开启将以额定功率运行^[9]。根据两种设备的开关状态,用户的洗衣机和洗碗机 t 时刻消耗的电功率 $P_{1,t}^{\text{e,L-c}}$ 可以表示为

$$P_{1,t}^{\text{e,L-c}} = u_{1,t}^{\text{dw}} P^{\text{dw}} + u_{1,t}^{\text{wm}} P^{\text{wm}}, \forall t \in [t_s, t_e-1] \quad (19)$$

式中： P^{dw} 和 P^{wm} 分别为单台洗碗机和洗衣机的工作功率。

综上所述，住宅建筑集群的电负荷总量可以表示为

$$\sum_{n=1}^N P_{n,t}^{\text{e},\text{L}} = \left(\sum_{n=1}^{N_1} P_{n,t}^{\text{e},\text{ewh},1} + \sum_{n=1}^{N_2} P_{n,t}^{\text{e},\text{ewh},2} + \sum_{n=1}^{N_3} P_{n,t}^{\text{e},\text{ewh},3} \right) + \sum_{n=1}^N P_{n,t}^{\text{e},\text{L},\text{f}} + \sum_{n=1}^N P_{n,t}^{\text{e},\text{L},\text{c}} \quad (20)$$

本文设置了3种不同热水需求用户， $P_{n,t}^{\text{e},\text{ewh},1}$ 、 $P_{n,t}^{\text{e},\text{ewh},2}$ 、 $P_{n,t}^{\text{e},\text{ewh},3}$ 分别为3种类型的单个用户热水器功率；3种用水需求的用户数量分别为 N_1 、 N_2 、 N_3 ；用户的总数 $N=N_1+N_2+N_3$ 。

2 模型求解

2.1 求解算法

上层运营商供能最优模型和下层用户用能最优模型共同构成了双层优化模型。在上层，运营商根据购电价格和用户的用电需求制定售电价格；在下层，运营商制定的能源价格指导用户的需求响应，影响用户的用电需求。下层问题含有0-1变量使得下层目标函数为非凸函数。因此本文采用迭代算法进行求解^[25]。在这个过程中，运营商将价格信息传递给用户，而用户将用电功率信息反馈给运营商，分别迭代求解上下层问题。当两次迭代之间运营商制定的电价足够接近，即满足收敛条件时，就可以得到满足双方目标的均衡解。收敛条件如公式(21)所示^[25]：

$$\frac{|C_t^{\text{OB}(k)} - C_t^{\text{OB}(k-1)}|}{C_t^{\text{OB}(k)}} \leq \sigma \quad (21)$$

式中： σ 为公差； k 为迭代次数。

迭代算法的迭代步骤为^[25]

第一步：设置 C_t^{OB} 的值为优化区间下限使得下层的用能成本最小，此时的 $P_{n,t}^{\text{e},\text{L}}$ 为下层变量的初始值，并设置 $k=1$ 。

第二步：将 $P_{n,t}^{\text{e},\text{L}}$ 代入上层问题求解，得到更新的 C_t^{OB} 值。

第三步：将更新的 C_t^{OB} 代入下层问题求解，从而得到更新的 $P_{n,t}^{\text{e},\text{L}}$ 。

第四步：判断 k 是否到达最大值或收敛条件是否满足。若满足，则结束循环；否则设置 $k=k+1$ ，重复第二步继续迭代，直到得到满足收敛条件的双层优化解。

该迭代算法的求解流程如图3所示。

2.2 配电网约束线性化

为了提高求解效率，本文将配电网潮流约束中的

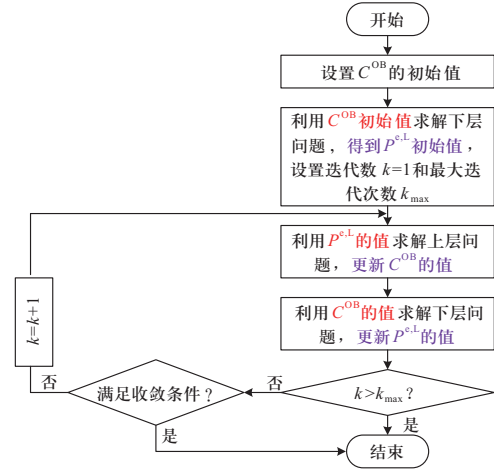


图3 求解流程图

Fig. 3 Flow chart of the algorithm

平方项进行线性化处理。式(5)一式(7)的配电网潮流约束可以通过两个假设来线性化处理^[19]：非线性项 $((P_n^2 + Q_n^2)/V_n^2)$ 表示网损，其实际中要远小于节点的有功、无功功率，因此可以将其忽略；同时，节点电压变化在很小的范围内，所以假设 $(V_0 - V_n)^2 \approx 0$ ，从而使得 $V_n^2 \approx V_0^2 + 2V_0(V_n - V_0)$ 。线性化的配电网潮流约束为

$$P_{n+1} = P_n - P_{n+1}^{\text{load}} \quad (22)$$

$$Q_{n+1} = Q_n - Q_{n+1}^{\text{load}} \quad (23)$$

$$V_{n+1} = V_n - \frac{r_f P_n + x_f Q_n}{V_0} \quad (24)$$

基于MATLAB-YALMIP协同仿真平台，上述模型可以通过CPLEX求解。迭代算法的迭代次数与设置的初值和公差有关，本算法迭代了16次得到了收敛结果。

3 算例分析

图4为本文社区能源系统的网络结构。图中配电网的节点1、2、3、4分别有10、8、6、6座建筑物连接。社区综合能源系统中有1200个用户，假设每一个节点

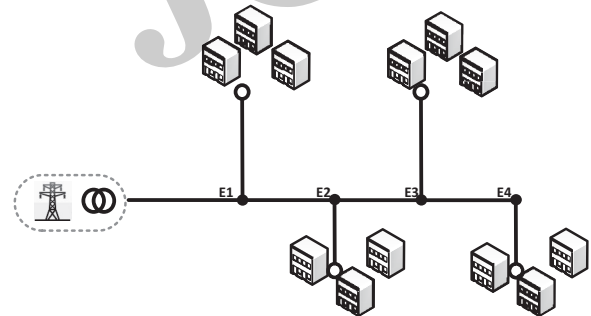


图4 社区能源系统网络结构图

Fig. 4 Schematic of networks of community energy system

的建筑群中分别有25%、35%和40%的用户对应图2中用户类型1、2、3的3种热水需求。

为保证运营商能够获得盈利，上级电网卖给运营商的价格要稍低于其直接卖给用户的价格。运营商和用户分别从上级能源系统中购买的电价如图5所示。

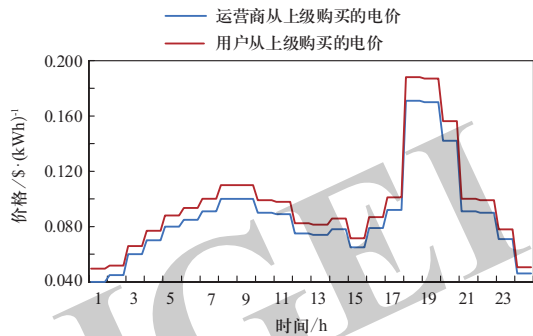


图5 运营商和用户从能源网络购买的电价

Fig. 5 Operator and consumers' energy purchasing prices from upper energy system

本文设置电价每小时变化一次，每个用户有一台热水器，每15 min调节一次。刚性电负荷估算出的数值示见图6。本文设置每个用户有一台洗衣机和一台洗碗机，用户的洗衣机带有烘干功能，在洗涤完毕后自动进入烘干模式。洗衣机可以在全天的任何时段开启一次，洗碗机可在全天开启2次，分别为9:00~17:00和20:00~次日6:00。洗衣机和洗碗机的额定功率以及负荷周期如表1所示。

表1 洗衣机和洗碗机的额定功率和负荷周期

Table 1 Power and cycle of washing machine and dishwasher

用电设备	额定功率/kW		负荷周期/h	
	洗涤	烘干	洗涤	烘干
洗衣机	0.5	1.8	1	2
洗碗机	1		1	

3.1 运营商结果分析

运营商根据消费者的用电量和从上层电网购电的价格来决定与上级运营商之间的购电计划并制定与用户之间的售电价格，优化结果如图6和图7所示。

从图6和图7可以看出，运营商在9:00~16:00和24:00~次日4:00从上级购电的价格也相对较低，用户的电负荷在大部分时间中也处于较低值，所以即使运营商将售电价格定在优化区间下限也不会造成较多的亏损；相反，用户在早晨和晚上的热水需求明显增多，导致热水器电负荷较高，刚性负荷也较高，运营商为了获得更高的收益，弥补电价低时段的亏损选择

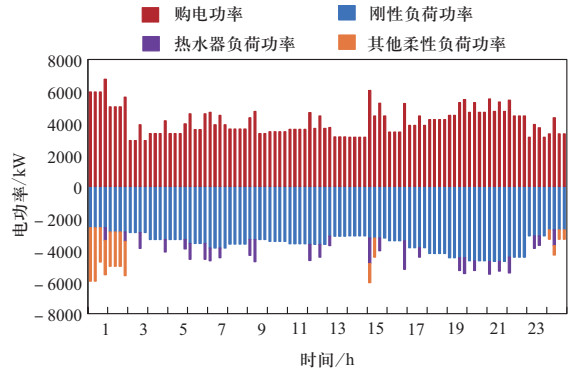


图6 运营商购电计划

Fig. 6 Energy supply schedules of the operator

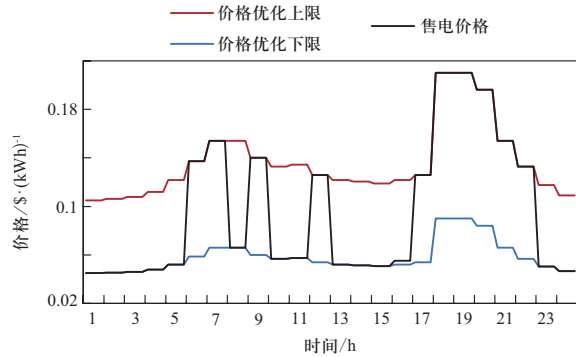


图7 运营商优化后的售电价格

Fig. 7 Optimal electricity prices of the operator

将售电价格提高至优化上限，这样的设置可以在满足平均价格约束的条件下保证能源运营商获利。

3.2 用户结果分析

柔性负荷的设备控制器根据用户生活需要和运营商的售电价格曲线，优化电器工作时段。

3.2.1 热水器需求响应结果

在用水需求和运营商售电价格的影响下，3类用户的热水器开关情况如图8所示。

其中一个售电价格高峰时段在7:00~9:00，而该时段也恰好是用户晨间的用水高峰时段。然而，尽管3类用户具体的用水高峰时间略有差异（如图3示），但均选择在5:00~7:00之间提前对热水器加热，从而在电价高峰时段减少热水器加热次数。另外一个价格高峰时段在18:00~20:00，由于用户在晚间洗澡用水远高于晨间用水，因此，热水器仍要在电价高峰时段加热才能够满足居民较大的用水需求。综上所述，热水器的电需求响应可以在一定程度上降低电价高峰时期的热水器负荷，从而降低用户的用电成本。然而，在用水需求较大的时段则需要优先满足用水需求，这些时段热水器对于售电价格的需求响应能力并不明显。

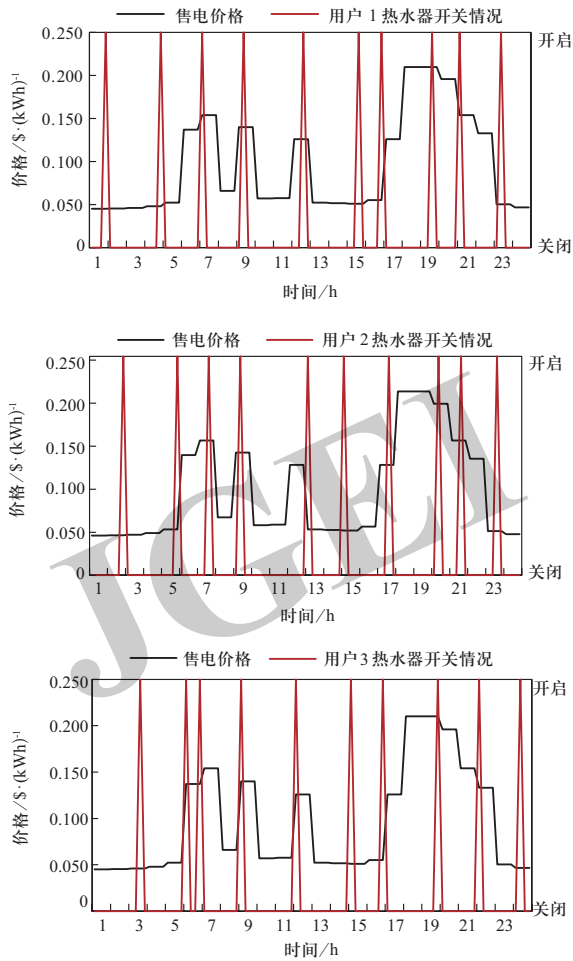


图8 3类用户的水箱温度

Fig. 8 Electric heater states of three types of consumers

热水器在进行需求响应调节时还要满足舒适性。

3种类型用户热水器水箱内的水温如图9所示。

热水器水箱内的热水温度在用户用水的高峰时段下降较快，且需要频繁地进行加热才能够将温度维持在舒适范围内。而在居民用水需求较低的时段，水箱内的热水温度下降速度较缓，只需加热一次就能够在3 h甚至更长时间内维持水箱内热水温度。

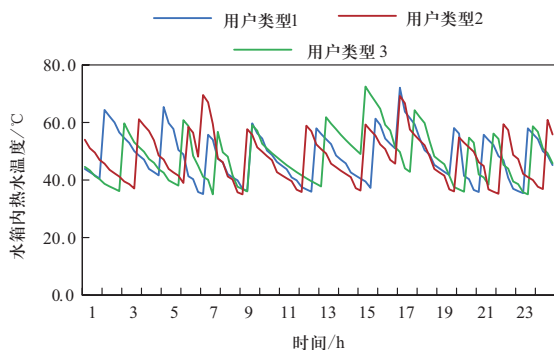


图9 3类用户的水箱温度

Fig. 9 Water temperature of three types of consumers

3.2.2 其他柔性电负荷需求响应结果

在售电价格的影响下，用户洗衣机和洗碗机的开关情况如图10所示。

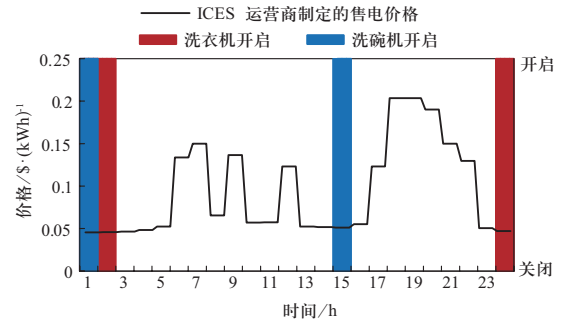


图10 用户洗碗机和洗衣机的状态

Fig. 10 States of washing machine and dishwasher

一天中售电价格的低谷时段为0:00~4:00和13:00~16:00，两个低谷时段分别在洗碗机两次工作的时间段内，因此，洗碗机选择在允许工作的时段内电价最低时开启。具体而言，洗碗机延迟开启时间，在1:00~2:00处于开启状态，处理前一天晚上洗碗任务；在15:00~16:00处于开启状态，处理当日早上和中午的洗碗任务。对于洗衣机而言，其烘干功率远大于洗涤功率，为最大限度地降低用电成本，洗衣机选择在全天电价最低的时段（即1:00~2:00时段电价0.045 \$/kWh）对衣物进行烘干处理，因此洗衣机的开启时段为0:00~次日3:00，处理前一天晚间用户的洗衣任务。

3.3 对比算例

本文设置两个对比算例来验证所提出的双层优化方法的有效性，如表2所示。

场景1：双层优化，即本文提出的考虑用户电需求响应参与运营商定价策略的优化方案。

场景2：社区能源运营商将售电价格设置在 $[0.6C_t^{UB} \sim 1.4C_t^{UB}]$ 区间的一条固定曲线。用户据此开展需求侧响应，但运营商在定价时不考虑用户的需求响应能力，这意味着用户的用电行为无法对售电定价产生任何影响。

场景3：运营商设置固定的售电价格（ $1.11C_t^{UB}$ ，此处的系数1.11是为了后文进行对比分析而设置），用户无电需求响应能力。该场景下用户的电热水器不能根据电价控制运行状态，只按自身用水需要来加热和保温。用户的洗碗机和洗衣机也不能根据电价转移电负荷，完全按照用户主观需要来开启和关闭。

表2 3种对比场景设置
Table 2 Comparisons between three scenarios

场景	售电价格	上层是否优化	下层是否优化
1	被优化	是	是
2	$0.6C_t^{UB} \sim 1.4C_t^{UB}$	否	是
3	$1.11C_t^{UB}$	否	否

表3展示了3种场景下运营商的收益和用户的总用电成本。图11为在 $[0.6C_t^{UB} \sim 1.4C_t^{UB}]$ 范围内的18组不同的售电价格下运营商的收益和用户的用电成本之间的关系。

表3 运营商的收益和用户的成本
Table 3 Profits of the operator and costs of consumers

场景	运营商收益/\$	用户总成本/\$
1	1 336.8	9 687.5
2	$[-2\ 938.3, 4\ 666.7]$	$[5\ 703.7, 13\ 309.2]$
3	1 335.6	9 968.8

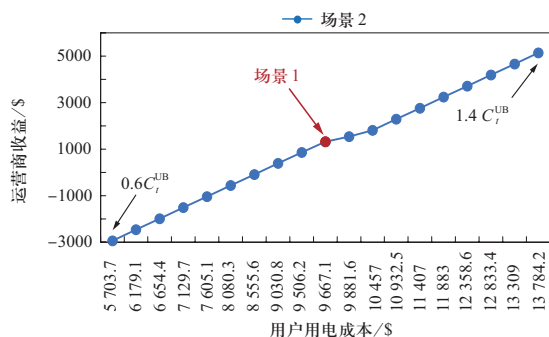


图11 场景1和2中运营商的收益和用户的成本

Fig. 11 Operator's profits and consumers' costs in two scenarios

为了证明住宅建筑用户参与售电价格的制定的好处，将场景1与场景2进行对比。从表3和图11的结果可以看出，用户的用电成本越高，运营商的利润就越大。在场景2的区间范围内，较高的售电价格对运营商更有利，而较低的价格对消费者更有利。相比之下，场景1在电价的制定策略中同时考虑了运营商和用户，得到的售电价格对应的运营商收益和用户成本在场景2的区间内处于平衡位置，即代表了场景1的结果为双方的均衡解，因此，本文所述的双层优化方案平衡了运营商和消费者的利益，实现双方共赢。

为了证明用户参与电需求响应的好处，将场景1与场景3进行比较。如表3所示，通过控制变量法使得这两种情况下运营商的收益相同。但在场景3中，用户的用能成本较高。这是因为场景3中用户无法根据

价格进行需求响应调节，从而无法避免在高电价时开启用电设备。在运营商收益确定的情况下，用户的用能成本会增大。

4 结论

本文提出一种考虑用户用电灵活性的社区能源系统双层优化策略。运营商根据用户的用电需求优化售电价格，而用户可以根据售电价格进行需求响应。通过算例分析可以得出以下结论：

1) 本文提出的双层优化模型可以使运营商和用户都参与定价策略。可兼顾供需双方的灵活性，平衡运营商和用户的利益。在提高运营商经济性的同时降低用户用能成本，使双方受益均衡。

2) 运营商发挥其供给侧的定价灵活性，根据用户的用能情况，在保证自身收益的情况下，优化售电价格，以激励用户的需求响应参与度。

3) 热水器的蓄热特性和洗衣机、洗碗机等家庭用电设备可以在社区能源服务中提供需求侧的灵活性，通过控制设备的开启时间，达到削峰填谷，降低用户侧用能成本的目的。

参考文献

- [1] 刘坚, 熊英, 金亨美, 等. 电动汽车参与电力需求响应的成本效益分析——以上海市为例[J]. 全球能源互联网, 2021, 4(1): 86-94.
LIU Jian, XIONG Ying, KIM Hyoung Mi, et al. Economic assessment of demand response delivered by electric vehicles in Shanghai[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1):86-94(in Chinese).
- [2] 清华大学建筑节能中心. 中国建筑节能年度发展研究报告2020[EB/OL]. (2020-04-09)[2020-11-05]. <https://max.book118.com/html/2020/0409/8076066116002105.shtml>.
- [3] 李卓阳, 靳小龙, 贾宏杰, 等. 考虑建筑物热动态特性的暖通空调模型预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3928-3940.
LI Zhuoyang, JIN Xiaolong, JIA Hongjie, et al. Model predictive control method for the HVAC system of buildings considering the thermal dynamic characteristics of the envelope[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3928-3940(in Chinese).
- [4] POURMOUSAVI S A, PATRICK S N, NEHRIR M H. Real-time demand response through aggregate electric water heaters for load shifting and balancing wind generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 769-778.
- [5] 姜英涵. 智慧社区电热水器类温控负荷需求响应控制策略研究[D]. 天津大学, 2018.

- [6] 郝文斌, 李银奇, 张毓格, 等. 基于需求侧响应的家庭电热水器优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 95-100. HAO Wenbin, LI Yinqi, ZHANG Yuge, et al. Household electric water heater load scheduling based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 95-100(in Chinese).
- [7] WANG J D, SHI Y C, FANG K J, et al. A robust optimization strategy for domestic electric water heater load scheduling under uncertainties[J]. Applied Sciences, 2017, 7(11): 1136.
- [8] ALVAREZ M A Z, AGBOSSOU K, CARDENAS A, et al. Demand response strategy applied to residential electric water heaters using dynamic programming and K-means clustering[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(1): 524-533.
- [9] CHEN C, WANG J H, HEO Y, et al. MPC-based appliance scheduling for residential building energy management controller[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1401-1410.
- [10] ALTHAHER S, MANCARELLA P, MUTALE J. Automated demand response from home energy management system under dynamic pricing and power and comfort constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1874-1883.
- [11] 周宁, 刘文学, 李嘉媚, 等. 基于合作博弈论与综合需求响应的负荷聚合商集群优化运营策略[J]. 水电能源科学, 2020, 38(8): 202-206. ZHOU Ning, LIU Wenxue, LI Jiamei, et al. Load aggregator cluster optimization operation strategy based on cooperative game theory and comprehensive demand response[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(8): 202-206(in Chinese).
- [12] 焦菲, 秦承龙, 潘广旭. 关于综合能源服务的发展研究[J]. 黑龙江电力, 2020, 42(2): 182-184. JIAO Fei, QIN Chenglong, PAN Guangxu. Research on the development of integrated energy services[J]. Heilongjiang Electric Power, 2020, 42(2): 182-184(in Chinese).
- [13] LIU N, YU X H, WANG C, et al. Energy-sharing model with price-based demand response for microgrids of peer-to-peer prosumers[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3569-3583.
- [14] 李媛, 冯昌森, 文福拴, 等. 含电动汽车和电转气的园区能源互联网能源定价与管理[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(16): 1-10. LI Yuan, FENG Changsen, WEN Fushuan, et al. Energy pricing and management for park-level energy internets with electric vehicles and power-to-gas devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(16): 1-10(in Chinese).
- [15] SHU J, GUAN R, WU L, et al. A Bi-level approach for determining optimal dynamic retail electricity pricing of large industrial customers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 2267-2277.
- [16] GU H F, LI Y, YU J, et al. Bi-level optimal low-carbon economic dispatch for an industrial park with consideration of multi-energy price incentives[J]. Applied Energy, 2020, 262: 114276.
- [17] 贾雁冰, 杨阳方, 刘继春, 等. 售用双方协同优化的家庭柔性负荷管理策略[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1430-1438. JIA Yanbing, YANG Yangfang, LIU Jichun, et al. Management strategy for domestic flexible load to achieve retailer-user coordinated optimization[J]. Power System Technology, 2019, 43(4): 1430-1438(in Chinese).
- [18] 李昊飞, 余涛, 瞿凯平, 等. 综合负荷聚合商参与的配电—气能源系统供需互动均衡模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(19): 32-41. LI Hao-fei, YU Tao, QU Kaiping, et al. Interactive equilibrium supply and demand model for electricity-gas energy distribution system with participation of integrated load aggregators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 32-41(in Chinese).
- [19] YE H G, GAYME D F, LOW S H. Adaptive VAR control for distribution circuits with photovoltaic generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1656-1663.
- [20] WANG Z Y, CHEN B K, WANG J H, et al. Coordinated energy management of networked Microgrids in distribution systems[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2015: 1.
- [21] TIAN F Y, LI Y, SUN J H. Bi-level optimal scheduling for integrated wind farms and power-to-gas facilities[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). October 20-22, 2018, Beijing. IEEE, 2018: 1-6.
- [22] LUTZ J. Water heaters and hot water distribution systems[R]. Lawrence Berkeley National Laboratory, 2008: 33-34.
- [23] 南思博. 城区居民用户柔性负荷需求响应策略研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
- [24] 胡佳怡, 严正, 王晗. 考虑清洁电力共享的社区电能日前优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 61-70. HU Jiayi, YAN Zheng, WANG Han. Day-ahead optimal scheduling for communities considering clean power-sharing[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 61-70(in Chinese).
- [25] CHENG Y H, ZHANG N, ZHANG B S, et al. Low-carbon operation of multiple energy systems based on energy-carbon integrated prices[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1307-1318.

收稿日期: 2020-12-08; 修回日期: 2021-02-28。

作者简介:



卢一涵

卢一涵(1996), 女, 硕士研究生, 研究方向为用户侧综合能源系统建模及能量管理, E-mail: luyh1996@tju.edu.cn。

余晓丹(1973), 女, 博士, 副教授, 研究方向为综合能源系统、电力系统时滞稳定及非线性电路理论。通信作者, E-mail: yuxd@tju.edu.cn。

靳小龙(1990), 男, 博士, 研究方向为集成智能楼宇的区域综合能源系统能量管理及集成规划, E-mail: xljin@tju.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)