

基于社区能源平台的电力负荷调度

张美霞, 黄旭焱, 杨 秀

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘 要:针对当前社区负荷在夏季高峰时段偏高, 峰谷差较大的问题, 通过调用需求响应资源对社区负荷进行调控。主要研究社区能源平台中的可控电力负荷(居民、商业)调度策略, 重点分析电动汽车和空调这两类负荷, 在满足用户舒适度的前提下, 构建用电成本最低与社区负荷峰谷差最小的多目标负荷优化调度模型。其中对居民变频空调和商业中央空调分别采取温控和轮控调控方式, 电动汽车则采取有序充电模式, 并采用改进粒子群算法对模型进行求解。仿真结果表明, 通过对电动汽车、空调负荷以及储能设备的合理调控, 可以明显地降低用户的用电成本, 改善社区负荷曲线特性。

关 键 词:需求响应; 电动汽车; 空调负荷; 用户满意度; 多目标优化

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.009 中图分类号:TM34 文章编号:1673-9140(2021)03-0076-08

Power load dispatching research based on community energy platform

ZHANG Meixia, HUANG Xuyan, YANG Xiu

(Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In view of the fact that the current community load is high and the load peak and off-peak difference is increasing in summer, community load is regulated by invoking demand response resources. This paper mainly studies the controllable power load (resident, commerce) scheduling strategy in the community energy platform. Focusing on the analysis of two types of loads, electric vehicles and air conditioning, this paper constructs a multi-objective load optimization dispatch model with the lowest electricity cost and the smallest difference between community load peaks and valleys under the satisfaction of user comfort level. For the resident inverter air conditioning and commercial central air conditioning, temperature control and periodic stopping control are adopted, respectively. Moreover, orderly charging mode is adopted for the electric vehicle. The improved particle swarm optimization algorithm is used to solve the model. Simulation results show that reasonable control of the electric vehicle, air conditioning load and energy storage can evidently reduce the user electricity costs and improve community load curve characteristics.

Key words: demand response; electric vehicle; air conditioning load; user satisfaction; multi-objective optimization

近年来,因电力需求不断增长而导致的电力负荷峰谷差不断拉大,以及分布式能源的快速发展,给

传统的电力调度带来了一定的挑战。根据智能电网的建设发展要求,系统调度需从发电侧向负荷侧进

行转变^[1-2]。通过需求侧管理及需求响应技术,可有效地挖掘负荷侧资源,并将其纳入到电网的调度运行当中,对实现削峰填谷、消纳分布式能源等有着重要的意义^[3-6]。

目前,已有部分学者对需求侧资源参与系统的负荷调度进行了探讨,文献[7]对柔性负荷参与系统调度运行的可行性、调度模式、负荷建模以及调度架构等方面进行了阐述;文献[8]将直接负荷控制(direct load control, DLC)应用于供电上售购电风险管理,建立兼顾供电商与用户利益的多目标 DLC 优化决策模型;文献[9]则从整合需求响应资源的角度,对负荷聚集商(load aggregator, LA)的运营机制、调度和控制策略进行论述。在居民用电负荷调度方面,文献[10]在家庭能源管理系统(home energy management system, HEMS)框架下,建立考虑用户经济性和舒适度的多目标优化调度模型,同时考虑分布式能源与需求响应技术的应用;文献[11-12]基于智能能量管理系统(smart energy management system, SEMS)构建一种考虑用户满意度的居民两阶段需求响应调控策略;文献[13]根据居民用户的用电习性,对用电负荷需求响应特性进行分析并提出负荷状态概率矩阵,以最大程度地消纳光伏发电为目标进行调控。商业负荷的调度主要集中在空调方面,文献[14]从空调系统的热力学模型、聚合模型、控制模型以及调控策略 4 个角度,探讨空调负荷在需求响应中的研究现状;文献[15]通过轮控技术对智能楼宇中央空调进行调控,并建立电力公司—负荷聚合商—智能楼宇的调度框架;文献[16]采用温度优先列表法对暖通负荷进行调控,从而使室内温度维持在一个平衡幅度。对于大规模的商业空调负荷控制,文献[17]采用直接控制模式,并提出负荷聚集商为中介的双层优化调度模型。

社区能源平台是依据系统电力供需情况,对社区负荷做出优化调控的能源调度机构。与传统智能小区偏向于居民侧负荷不同,社区能源平台的调度范围包括社区中的居民、商场、储能以及分布式能源。文献[18]中松下集团的藤泽 SST 项目,以建设“电力信息网络的融合为区域住民提供无负担的最适合控制的智能街区”为目的,包含社区中的家庭、商业以及公共设施三方面的能量管理。该文首

先通过构建社区能源平台,研究了用户负荷特性;然后在考虑用电舒适性的前提下,提出了基于社区能源平台的电力负荷优化调度模型;最后通过算例分析,验证了该模型可有效地整合居民与商业侧负荷,起到降低用户用电成本,调整用户用电行为从而优化系统负荷曲线的作用。

1 社区能源平台构建

社区能源平台如图 1 所示。能源平台中主要包含居民和商业负荷,其中居民负荷包括基础用电负荷、空调负荷与电动汽车等,商业负荷则包括办公楼、商场和宾馆负荷。通过 AMI 实时高级监测系统,能源平台可对社区中的负荷用电情况进行监控,并对其中的可控负荷进行同时调控。用户用电成本最低和社区负荷曲线峰谷差最小,调控过程中,通过一些激励政策,对参与需求响应的负荷做出适当补偿,提高用户参与社区负荷调控的积极性。该文主要调控的对象包括居民空调、电动汽车负荷和商场空调负荷。

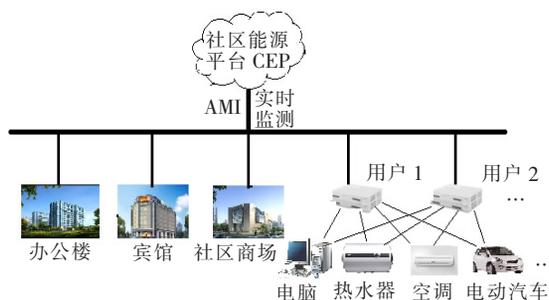


图 1 社区能源平台

Figure 1 Schematic diagram of the community energy platform

2 电力负荷建模

2.1 基本负荷

这类负荷主要是照明、电脑与电视用电,属于居民的刚性需求,且用电时间较为固定,用电功率波动性较小,不具备负荷调节能力。此类负荷电器的集合用 G 表示,电器 g 的耗电特性为

$$\begin{cases} P_g^{\min} \leq P_g^t \leq P_g^{\max}, & t \in [t^{\text{start}}, t^{\text{end}}] \\ P_g^t = 0, & t \notin [t^{\text{start}}, t^{\text{end}}] \end{cases} \quad (1)$$

$$g \in G \quad (2)$$

式(1)中 P_g^t 为电器 g 在 t 时段的功率; P_g^{\min} 、 P_g^{\max} 分别为其最小和最大功率; t^{start} 为电器 g 起始工作时间; t^{end} 为工作结束时间。

2.2 电动汽车

电动汽车用电较为灵活,且在固定时间段内其总耗电量一定,这为社区能源平台提供了一个很好的调度资源。电动汽车 i 的充电特性^[19]为

$$S_{i,e} = S_{i,s} + \frac{P_{i,EV}\eta T_{i,r}}{B_e} \quad (3)$$

式中 $S_{i,e}$ 为经过时长 T_r 后电动汽车 i 的荷电电量; $S_{i,s}$ 为起始电量; $P_{i,EV}$ 为额定充电功率; η 为充电效率; $T_{i,r}$ 为充放电时长; B_e 为电动汽车所装载的电池额定容量。

1) 充电约束。

$$0.15 \leq S_{i,s} \leq S_{i,e} \quad (4)$$

$$S_{\min} \leq S_{i,e} \leq S_{\max} \quad (5)$$

式(4)、(5)中 S_{\min} 、 S_{\max} 分别为电池电量的下限和上限值,该文分别设为 0.2 与 1,当电池电量达到 S_{\max} 时,电动汽车不再进行充电。电动汽车在行驶过程中过度的放电,会缩短其电池使用寿命,故规定电动汽车充电的初始电量不得低于 0.15。

2) 时长约束。

$$0 \leq T_{i,r} \leq T_{i,d} - T_{i,a} \quad (6)$$

式中 $T_{i,a}$ 为电动汽车开始入网充电时间; $T_{i,d}$ 为断网停电时间。

2.3 空调建模

根据居民与商业侧的空调运行特性与用户需求,商业空调侧为定频空调,居民则为变频空调。该文主要借鉴文献[16]的能量消耗模型来描述居民空调功率与室内外温度的关系,其建模公式为

$$T_{t+1}^{\text{in}} = \lambda T_t^{\text{in}} + (1 - \lambda)(T_t^{\text{out}} \mp \eta P_{AC}^t / A) \quad (7)$$

$$0 \leq P_{AC}^t \leq P_{AC,\max} \quad (8)$$

$$T_{\min}^{\text{in}} \leq T_t^{\text{in}} \leq T_{\max}^{\text{in}} \quad (9)$$

式(7)~(9)中 T_t^{in} 、 T_t^{out} 分别为 t 时段的居民户内温度和户外温度; P_{AC}^t 为空调 AC 在 t 时段的用电负荷; λ 为系统惯量; η 为空调的效率系数; A 为热传导系数; +、- 为空调分别运行在制热和制冷的功率。

商业侧的中央空调通过周期性的启停压缩机来维持室温处于设定的温度区间内,且在其运行期内始终为恒功率运行,该文采用状态队列模型来表征

其运行状态。考虑到居民用户与商业用户空调在主要用电时段、选用类型和设定温度区间的不同,故选用 T_{room}^t 和 T_{room}^{t+1} 来表示商业用户室内 t 与 $t+1$ 时刻的温度, T_{out}^t 和 T_{out}^{t+1} 分别为外界 t 与 $t+1$ 时段温度。

当空调为关闭状态时:

$$T_{\text{room}}^{t+1} = T_{\text{out}}^{t+1} - (T_{\text{out}}^{t+1} - T_{\text{room}}^t) e^{-\Delta t / RC} \quad (10)$$

当空调处于开启状态时:

$$T_{\text{room}}^{t+1} = T_{\text{out}}^{t+1} - \eta P / A - (T_{\text{out}}^{t+1} - \eta P / A - T_{\text{room}}^t) e^{-\Delta t / RC} \quad (11)$$

式(10)、(11)中 P 为商业空调额定功率; R 为房间的等效电阻; C 为房间的等效电容; Δt 为仿真周期。

若将室内温度的上下限设定在 $[T_1, T_2]$, τ_{off} 和 τ_{on} 分别为中央空调开启和关停时长,经过公式运算,可表征空调开启和关停时长为

$$\tau_{\text{off}} = -RC \ln \frac{T_{\text{out}} - T_2}{T_{\text{out}} - T_1} \quad (12)$$

$$\tau_{\text{on}} = -RC \ln \frac{T_{\text{out}} - \eta P / A - T_1}{T_{\text{out}} - \eta P / A - T_2} \quad (13)$$

由状态队列表示中央空调的运行状态时,开启和关闭数目分别为 n_1 和 n_2 ,总状态数为 n ,那么可得到聚合空调负荷的计算公式:

$$P_{\text{sy}} = \frac{n_1}{n} NP = \frac{\tau_{\text{on}}}{\tau} NP \quad (14)$$

式中 N 为空调总数量。

2.4 储能

储能设备在 t 时刻的充放电功率 P_c^t 与荷电状态 S_t 的关系:

$$S_t = \begin{cases} S_{t-1} + \frac{P_c^t \Delta t \mu}{S_{\max}}, & P_c^t \geq 0 \\ S_{t-1} + \frac{P_c^t \Delta t}{\rho S_{\max}}, & P_c^t < 0 \end{cases} \quad (15)$$

式中 S_t 为储能设备 t 时段的荷电状态; P_c^t 为 t 时段的充放电功率,当 $P_c^t > 0$ 时,处于充电状态,当 $P_c^t < 0$ 时,处于放电状态; S_{\max} 为储能设备容量上限; μ 为充电效率; ρ 为放电效率。

2.5 负荷随机性分析

在对社区负荷进行预测时,可采用正态分布近似反映负荷的随机性^[20],这在大量的实践中得到验证。负荷的概率密度为

$$f(P_L) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_P} \exp\left[-\frac{(P_L - \mu_P)^2}{2\sigma_P^2}\right] \quad (16)$$

式中 P_L 为有功负荷; μ_P 、 σ_P^2 为有功负荷的平均值和标准差。

3 能源平台优化调度模型

3.1 目标函数

用户在 t 时段的用电负荷总功率为

$$P_L^t = P_g^t + P_{AC}^t + P_{sy}^t + P_{EV}^t + P_C^t \quad (17)$$

式中 P_{sy}^t 为 t 时段商业空调负荷; P_{EV}^t 为所有电动汽车在 t 时段总的充电功率,可表示为

$$P_{EV}^t = \sum_{i=1}^N P_{i,EV}^t x_i(t) \quad (18)$$

当电动汽车 i 充满电或未进行充电时, $x_i(t)$ 为 0;反之在充满电前且进行充电时, $x_i(t)$ 则为 1。

1) 目标函数一,用电成本 F_1 最低。

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^T c(t) P_L^t \Delta t \quad (19)$$

式中 $c(t)$ 为分时段电价。对参与需求响应的用户做出适当的补偿激励,可提高用户参与社区负荷调控的积极性。社区能源平台对用户削减负荷做出适当的经济性补偿,可表示为

$$F_2 = \begin{cases} \sum_{t=1}^T (P^t - P_L^t) \Delta t \gamma, & P^t \geq P_L^t \\ 0, & P^t < P_L^t \end{cases} \quad (20)$$

式中 P^t 为未调控前 t 时段的用电负荷; γ 为单位电量补偿价格。考虑激励补偿后,社区用户的最终用电成本为

$$\min F = F_1 - F_2 \quad (21)$$

2) 目标函数二,负荷曲线方差 G 最小。负荷均方差可用作表征电网负荷的波动情况,均方差越小,负荷曲线越平稳,故将社区负荷均方差最小作为第 2 个目标函数,即

$$\min G = \sum_{t \in T} [P_L^t - \bar{P}_L^t]^2 \quad (22)$$

$$\bar{P}_L^t = \frac{1}{T} \sum_{t \in T} P_L^t, \forall t \in T \quad (23)$$

式中 \bar{P}_L^t 为 T 时段内的负荷均值。

3.2 约束条件

1) 相邻时间段内的充电功率约束。

$$P_{EV}^t - P_{EV}^{t-1} \leq \Delta P \quad (24)$$

为避免电动汽车充电负荷因突然大量接入或切除而对负荷曲线产生大范围波动,需设定功率波动

允许范围 ΔP , 该文设置为 50 kW。

2) 电动汽车充电容量约束。假设电动汽车 i 离开充电桩后的 $S_{i,e}$ 均为 1, 应满足以下功率平衡约束, 即

$$\sum_{t=1}^T P_{i,EV}^t x_i(t) \Delta t = (1 - S_{i,s}) B_e \quad (25)$$

3) 储能出力约束及容量约束。

$$P_{c,\min} \leq P_C^t \leq P_{c,\max} \quad (26)$$

$$S_{c,\min} \leq S_t \leq S_{c,\max} \quad (27)$$

当储能设备放电时, $P_C^t < 0$, 有放电容量约束:

$$P_C^t \Delta t \leq (S_{t-a} - S_{c,\min}) S_{\max} \quad (28)$$

当储能设备充电时, $P_C^t > 0$, 有充电容量约束:

$$P_C^t \Delta t \leq (S_{c,\max} - S_{t-1}) S_{\max} \quad (29)$$

在进行一天的充放电后,需保证储能设备的剩余容量足以满足第 2 天的正常运行,即

$$S_{\text{end}} \geq S_{\text{start}} \quad (30)$$

式中 S_{end} 为当天储能设备结束充放电后的结余电量; S_{start} 为起始充放电电量。

3.3 算法流程

在处理目标优化过程中,通常可采用粒子群算法,通过粒子的迭代搜索,从而寻找最优解。对于多目标优化问题,通常是通过加权等方法将多目标转为单目标进行求解,但在处理高维问题时容易早熟,陷入局部最优,为此该文采用了改进的约束多目标粒子群算法 (constrained multi-objective particle swarm optimization, CMOPSO)^[21-24] 对模型进行求解。借鉴文献[21]中的动态不可行度 ϵ_i 来约束支配关系,即

$$\epsilon_i = \begin{cases} \epsilon_0 \times (1 - 5i/4M), & i \leq 0.8M \\ 0, & i > 0.8M \end{cases} \quad (31)$$

式中 ϵ_0 为初始约束条件违反程度允许值; i 为当前迭代次数; M 为种群总的迭代次数。随着迭代次数的进行,不可行度 ϵ_i 会逐渐减少。通过对比 ϵ_i 与每个候选解 X_i 的不可行度来判断 X_i 的可行性,若候选解 X_i 的不可行度小于 ϵ_i , 那么 X_i 称为可行解。由于是多目标优化问题,改进粒子群算法所求解出来的是 Pareto 最优解集,在这些解集当中,选择用电成本最小的解作为最优解,并进行接下来的分析。

计算的具体步骤如下:

1) 决策空间设置,输入粒子维度,种群规模,根

据各约束条件完成粒子位置与速度初始化;

2) 计算初始种群的适应度值, 并将其存于外部档案集 archives 中;

3) 计算 archives 中各粒子的拥挤距离, 按大到小进行排序, 并在排名前 10% 的粒子中随机选取一行为全局最优解 gbest;

4) 通过迭代计算, 更新粒子的速度和位置, 计算粒子的适应度值;

5) 通过式(17)动态不可行度 ϵ_i 来约束支配关系, 对外部档案进行维护更新, 调整各粒子新的 pbest;

6) 若达到最大迭代次数, 则终止搜索并输出结果, 反之, 则返回步骤 2。

4 算例分析

4.1 基础数据处理及预测

采用上海市某社区夏季典型休息日的数据为例, 社区中有 100 户居民。据统计, 每户居民均有 2 台额定功率为 1.5 kW 的家用变频空调, 其相关参数参照文献[16], 根据 ASHRAE 标准, 室温范围设定在 24~27 °C; 社区居民用户电动汽车保有率设为 50%, 共有 50 台电动汽车(由于数量较少, 该文假设其全部参与负荷调控)。该社区还包括一幢 2 层, 面积为 4 000 m² 的商场, 根据单位面积制冷量 120~150 W/m² 估算, 总的商场制冷功率应在 480~600 kW 之间, 取两者的均值 540 kW 计算, 那么该商场需安装额定制冷功率为 4 kW 的中央空调 135 台。算例中, 粒子数 N 、 M 、 ω_{\min} 、 ω_{\max} 、 c_1 、 c_2 分别取 40、3 000、0.9、0.2、1.4 962、2。

对于参与调控的用户, 社区能源平台给予的日前补偿价格为 0.3 元/kW·h。算例中的分时电价借鉴文献[25], 表 1 为居民用户与商业用户电价表。

表 1 分时电价

Table 1 TOU prices 元

用户	电价		
	08:00—10:00	11:00—13:00	14:00—18:00
居民	0.3	0.6	1.2
	一般工商业	0.3	0.9
		0.3	1.5

对社区负荷进行预测, 电动汽车车主下班后回到社区即开始选择充电, 充电起始时刻和初始电量分别满足 $N(19, 1.5^2)$ 和 $N(0.4, 0.1^2)$ 。为方便计算, 电动汽车的充电功率和充电容量均采用定值, 分别为 4 kW 和 30 kW·h。购物商场中负荷数据参考文献[26], 商场的运营时段为 8:00—22:00, 其余时段的负荷主要为照明负荷。考虑用电负荷不确定性, 并采取蒙特卡罗法对电动汽车和空调的用电负荷进行预测, 在与基础负荷进行叠加后获得未调控前社区的总负荷预测曲线, 如图 2 所示。空调负荷功率走势大体上与当天的温度走势一致, 在午间 12:00 左右, 当天温度达到最高值, 空调负荷也为最高值。

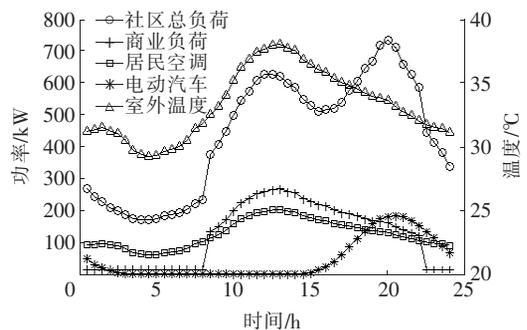


图 2 社区负荷曲线

Figure 2 Community load power curve

4.2 可控负荷参与负荷调控仿真分析

采用自动开断充电模式后电动汽车充电负荷曲线如图 3 所示, 该文对电动汽车调控时段设置为 18:00 到次日 06:00。可以看到充电功率峰值明显减少, 且在高峰时段 19:00—21:00 间的充电功率上升速率明显变缓, 功率前后波动小, 其中一部分充电负荷平移到 0:00—06:00 时段的用电低谷期, 达到明显的“削峰填谷”作用。

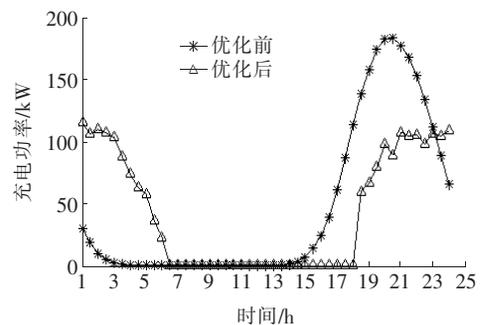


图 3 电动汽车充电功率

Figure 3 Charging power of electric vehicles

居民变频空调和商场空调优化前后功率如图 4 所示, 居民空调的控制策略主要为温控调节, 优化时

间段与分时电价的峰时段对应,午高峰下降幅度相较于晚高峰的下降幅度较大,这与午时段温度较高与晚时段温度有关。商场主要负荷的运行时段集中在 8:00—22:00,其它负荷相较于空调负荷的可控性不强,在这里进行忽略,只对空调负荷进行调整。该文把商业空调的轮停时段控制在 11:00—19:00,共 8 h。由图 4 可以看出,通过轮停调控后商场空调负荷明显下降。

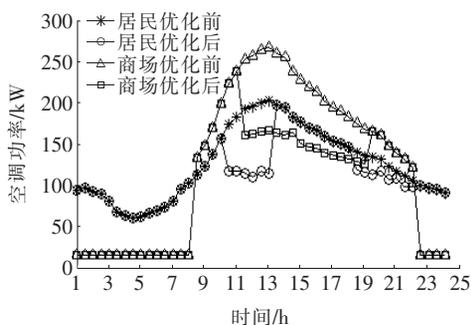


图 4 空调负荷功率需求

Figure 4 Air conditioning load power demand

储能设备的充放电功率如图 5 所示。储能设备遵循“低电价充电,高电价放电”模式,即在电价较低时段,给储能设备充电;电价较高时段,储能设备放电,减少负荷峰值。该文拟采用的储能设备最大充放电功率为±30 kW,容量为 500 kW·h,起始的 S_{start} 设为 0.4,充放电上下限 S_{c_min} 和 S_{c_max} 分别设为 0.2 和 1。假定储能的放电时段与电价高峰时段对应,其余时段对储能设备进行充电,不考虑前期储能设备的成本投资与充放电过程中的电能损耗。在高峰时段,储能设备以最大功率 30 kW 对平台进行放电,削减高峰负荷;在夜间谷时段和其余平时段,考虑电价等因素,储能设备社区能源平台进行充电。

通过搭建社区能源平台,优化后的负荷曲线如图 6 所示。由于电动汽车充电时段的后移,01:00—06:00 时段优化后的负荷明显高于优化前的负荷,达到明显的“填谷”作用,11:00—13:00 之间负荷的突然大幅度地下降,主要原因是由于对居民和商业空调分别进行了温控和轮停控制策略,该时段内储能设备也以最大功率进行放电;由于居民空调调控时段与电价高峰时段同步,在 13:00—17:00 期间的负荷调控对象主要是商场中的空调负荷;晚高峰 18:00—22:00 时段由于电动汽车和空调的双重调控,高峰负荷有所下降,但负荷下降程度要小于午高

峰,主要是由于夜间进出商场的人流量有所增多,商场中央空调根据需求退出了负荷调控。

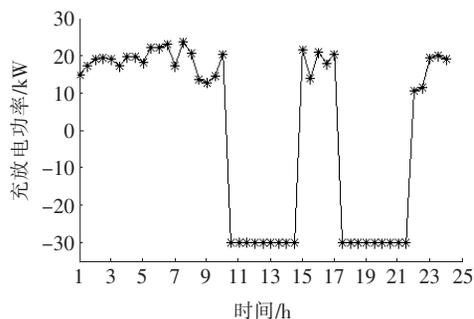


图 5 储能设备充放电情况

Figure 5 Charging and discharging of energy store device

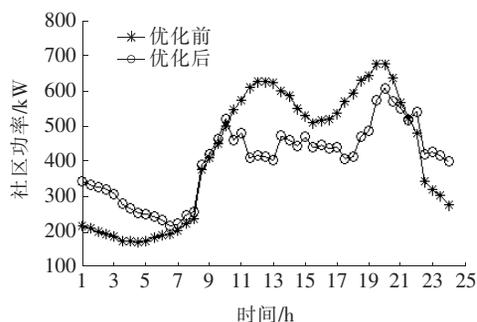


图 6 社区负荷优化曲线

Figure 6 Community load power curve after optimization

4.3 用电成本与负荷峰谷差分析

社区用户优化前后的峰谷差变化和用电成本分别如表 2、3 所示,对比可控负荷参与调控优化后可以看出,峰谷差明显下降,优化后的峰谷差降了 133.75 kW,降幅为 26.34%;负荷曲线方差下降幅度较大,降幅达到 76.28%。用户参与需求相应调控后,用电成本下降了 2 002.7 元,降幅达到 21.28%,其中,用户参与社区负荷调度得到补偿收益 480.6 元,储能设备在扣除充电成本后,放电收益达到 152.9 元。综上所述,通过搭建社区能源平台,让居民与商业侧的需求侧资源参与到社区负荷优化当中,可降低用电成本并优化社区整体负荷曲线。

表 2 峰谷差变化对比

Table 2 Comparison of peak-valley difference

情况	峰谷差/kW	负荷曲线方差
优化前	507.08	1.555×10^6
优化后	373.33	3.689×10^5
绝对差值	133.75	1.186×10^6
变化率	0.263	0.762 8

表 3 用电成本对比

Table 3 Comparison of electricity costs 元

情况	居民	商场	储能收益	补偿收益	总成本
优化前	6 027.8	3 380.9	0	0	9 408.7
优化后	5 335.2	2 704.3	152.9	480.6	7 406.0

5 结语

该文通过构建社区能源平台,根据不同的用电负荷特性,进行分类建模,建立了考虑用户用电成本最少与社区负荷峰谷差最低的双目标优化调控模型。算例仿真结果表明,午高峰时段,通过对居民空调、商业空调以及储能出力的调控,可有效地降低负荷峰值,且效果明显;晚高峰时段,除了居民空调与储能出力调控外,根据分时电价的设定,对电动汽车进行有序充电管理,可将充电负荷由高电价峰时段向低电价谷时段进行转移,实现“削峰填谷”的效果。总体而言,通过对需求侧资源的调控,合理安排社区用户的用电行为,可有效地降低社区用户的用电成本和负荷峰谷差。

参考文献:

- [1] 马斌,袁龙,刘文宗,等. 基于云雾计算的智能电网调度机制[J]. 电测与仪表,2019,56(24):67-72.
MA Bin, YUAN Long, LIU Wenzong, et al. Distribution mechanism for smart grid based on cloud fog computing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019,56(24):67-72.
- [2] 杨延昊. 基于云计算的智能电网调度系统设计研究[J]. 电网与清洁能源,2019,35(9):7-11.
YANG Yanhao. Design of intelligent grid scheduling system based on cloud computing[J]. Power System and Clean Energy, 2019,35(9):7-11.
- [3] 程杉,陈欢田. 基于 Stackelberg 博弈的智能电网完全分布式需求响应策略[J]. 智慧电力,2019,47(3):60-65+96.
CHENG Shan, CHEN Huantian. Fully distributed demand response strategy for smart grid based on stackelberg game[J]. Smart Power, 2019,47(3):60-65+96.
- [4] 杨海柱,李梦龙,江昭阳,等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(10):30-37.
YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas

loads response[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(10):30-37.

- [5] 刘鑫,吴红斌,王鲸杰,等. 市场环境下考虑需求响应的虚拟电厂经济调度[J]. 中国电力,2020,53(9):172-180.
LIU Xin, WU Hongbin, WANG Jingjie, et al. Economic dispatch of a virtual power plant considering demand response in electricity market environment[J]. Electric Power, 2020,53(9):172-180.
- [6] 王蓓蓓,刘小聪,李扬. 面向大容量风电接入考虑用户侧互动的系统日前调度和运行模拟研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):35-44.
WANG Beibei, LIU Xiaocong, LI Yang. Day-ahead generation scheduling and operation simulation considering demand response in large-capacity wind power integrated systems[J]. Proceeding of the CSEE, 2013,36(22):35-44.
- [7] 王珂,姚建国,姚忠良,等. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):127-135.
WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Liangzhong, et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,38(20):127-135.
- [8] 张钦,王锡凡,别朝红,等. 电力市场下直接负荷控制决策模型[J]. 电力系统自动化. 2010,34(9):23-28.
ZHANG Qin, WANG Xifan, BIE Zhaohong, et al. A decision model of direct load control in electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010,34(9):23-28.
- [9] 高赐威,李倩,李慧星,等. 基于负荷聚集商业需求相应资源整合方法与运营机制[J]. 电力系统自动化,2013,37(17):78-86.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Huixing, et al. Methodology and operation mechanism of demand response resources integration based on load aggregator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013,37(17):78-86.
- [10] 王春梅,李扬,王旭东,等. 计及用户舒适性的家庭智能用电调度优化[J]. 电网与清洁能源,2016,32(4):58-62.
WANG Chunmei, LI Yang, WANG Xudong, et al. Optimal scheduling of smart home power consumption considering user's comfort [J]. Power System and Clean Energy. 2016,32(4):58-62.
- [11] 曾鸣,武赓,王昊婧,等. 智能用电背景环境下考虑用户满意度的居民需求侧响应调控策略[J]. 电网技术,2016,40(10):2917-2923.
ZENG Ming, WU Geng, WANG Haojing, et al. Regulation strategies of demand response considering user satisfaction under smart power background[J]. Power System Technology, 2016,40(10):2917-2923.

- [12] Adika C O, Wang L F. Demand-side bidding strategy for residential energy management in a smart grid environment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014,5(4):1724-1733.
- [13] 汤奕,鲁针针,伏祥运. 居民主动负荷促进分布式电源消纳的需求响应策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(24):49-55.
TANG Yi, LU Zhenzhen, FU Xiangyun. Demand response strategies for promoting consumption of distributed power generation with residential active loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015,39(24):49-55.
- [14] 宋梦,高赐威,苏卫华. 面向需求响应技术的空调负荷建模及控制[J]. 电力系统自动化,2016,40(14):158-167.
SONG Meng, GAO Ciwei, SU Weihua. Modeling and controlling of air-conditioning load for demand response applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(14):158-167.
- [15] 石坤,李德智,杨斌,等. 面向市场化的智能楼宇互动调控技术[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(3):114-120.
SHI Kun, LI Dezhi, YANG Bin, et al. Market oriented interactive control technology for intelligent building[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017,32(3):114-120.
- [16] Lu N. An evaluation of the HVAC load potential for providing load balancing service[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012,3(3):1263-1270.
- [17] 高赐威,李倩玉,李扬. 基于DLC的空调负荷双层优化调度和控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34(10):1546-1555.
GAO Ciwei, LI Qianyu, LI Yang. Bi-level optimal dispatch and control strategy for air-conditioning load based on direct load control[J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(10):1546-1555.
- [18] 苗宇鑫,李洵,史宁,等. 关于日本智能社区(Smart Community)发展动向的介绍[J]. 智能建筑电气技术,2012,6(4):59-63.
MIAO Yuxing, LI Xu, SHI Ning, et al. An introduction to the development of Smart Community in Japan[J]. Intelligent Building Electrical Technology, 2012,6(4):59-63.
- [19] 常小强,宋政湘,王建华. 基于蒙特卡罗算法的电动汽车充电负荷预测及系统开发[J]. 高压电器,2020,56(8):1-5.
CHANG Xiaoqiang, SONG Zhengxiang, WANG Jianhua. Electric vehicle charging load prediction and system development based on monte carlo algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2020,56(8):1-5.
- [20] 张美霞,陈洁,杨秀,等. 考虑风光和负荷随机性的微网三相潮流计算[J]. 中国电机工程学报,2015,33(13):103-107.
ZHANG Meixia, CHEN Jie, YANG Xiu, et al. Three-phase power flow calculation for microgrid with volatile wind power, photovoltaic power and load[J]. Proceeding of the CSEE, 2013,33(13):101-107.
- [21] 凌海风,周献中,江勋林,等. 改进的约束多目标优化算法[J]. 计算机应用,2012,32(5):1320-1324.
LING Haifeng, ZHOU Xiangzhong, JIANG Xunlin, et al. Improved constrained multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2012,32(5):1320-1324.
- [22] 潘峰,李位星,高琪,等. 粒子群优化算法与多目标优化[M]. 北京:北京理工大学出版社,2013:9-13.
- [23] 路小娟,郭琦,董海鹰. 基于CMOPSO的混合储能微电网多目标优化研究[J]. 太阳能学报,2017,38(1):279-286.
LU Xiaojuan, GUO Qi, DONG Haiying. Multiobjective optimization of hybrid energy storage micro grid based on COMPSO algorithm[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2017,38(1):279-286.
- [24] 刘星平,李世军,于浩明,等. 住宅小区内电动汽车有序充电优化模式[J]. 电工技术学报,2015,30(20):238-245.
LIU Xingping, LI Shijun, YU Haoming, et al. Coordinated charging optimization mode of electric vehicles in the residential area[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015,30(20):238-245.
- [25] 李秀磊,耿光飞,季玉琦,等. 主动配电网中储能和需求侧响应的联合优化规划[J]. 电网技术,2016,40(12):3803-3810.
LI Xiulei, GENG Guangfei, JI Yuqi, et al. Integrated optimal planning of energy storage and demand side response in active power distribution network[J]. Power System Technology, 2016,40(12):3803-3810.
- [26] 程杉,陈梓铭,徐康仪,等. 基于合作博弈与动态分时电价的电动汽车有序充放电方法[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(21):15-21.
CHENG Shan, CHEN Ziming, XU Kangyi, et al. An orderly charging and discharging method for electric vehicles based on a cooperative game and dynamic time-of-use price[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(21):15-21.