

DOI: 10.7667/PSPC160001

智能社区综合能源优化管理研究

王珺¹, 顾伟¹, 张成龙², 王志贺³, 唐沂媛¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 国网能源研究院, 北京 100000;
3. 徐州供电公司, 江苏 徐州 221000)

摘要: 居民负荷由于用电时间集中, 已成为电力峰荷的主要组成部分, 同时随着智能电网技术的发展, 需求侧响应作为缓解电力供需矛盾的有效途径备受关注。以智能社区为背景, 结合冷热电联供(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)系统能效高、经济效益好等优势, 与居民需求侧响应的潜力, 提出两阶段优化模式。第一阶段, 社区物业根据负荷预测及光伏出力预测, 优化 CCHP 系统各部分出力, 最大化物业净收益。第二阶段, 家庭能量管理系统(Home Energy Management System, HEMS)根据 CCHP 系统启停及出力情况与分时电价, 优化家庭负荷工作时间, 最小化用户费用。最后通过对比不同案例仿真结果, 证明了该两阶段优化模式能够实现供能侧与用能侧的双赢。

关键词: 两阶段优化; 智能社区; CCHP; DR; HEMS

Research on integrated energy management for smart community

WANG Jun¹, GU Wei¹, ZHANG Chenglong², WANG Zhihe³, TANG Yiyuan¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. State Grid Energy Research Institute, Beijing 100000, China; 3. Xuzhou Electric Power Company, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Residential electricity load due to the concentration of its use time has become a main component of electric power peak, meanwhile, with the development of smart grid technology, demand side response as an effective way to ease the imbalance between supply and demand has attracted much attention. Set in smart community, and combined the superiority of CCHP in energy efficiency and economic with the potential of household load in demand response, a two-stage optimization model is proposed. At first stage, property company optimizes the output of each part of CCHP system according to the forecast of load and photovoltaic output, in order to maximize the profits of property company. At second stage, HEMS optimizes the residential load schedule based on the condition of CCHP and time-of-use electricity price, minimum users' cost. Finally, comparison between the simulation results of different cases proves that the two-stage optimization can realize a win-win situation both in users and property company.

This work is supported by National Key Technology Support Program (No. 2015BAA01B01), National Natural Science Foundation of China (No. 51277027), and State Grid Science and Technology Project ("Two Alternatives") Potential Assessment.

Key words: two-stage optimization; smart community; CCHP; DR; HEMS

0 引言

近年来, 随着人们开始追求更加舒适、智能、便捷的居住环境, 智能社区应运而生, 且智能电网的发展也使得智能社区作为能源使用终端受到广泛

关注^[1]。智能社区支持清洁能源与储能系统, 鼓励能源梯级利用、循环利用, 引导用户优化用能结构, 提高能效、实现节能减排^[2-3]。因此研究如何优化用户用能结构、调整能源消费结构, 对智能社区的发展至关重要。

以终端用户为单元优化用能结构需要依托 HEMS^[4]。HEMS 对分时电价等信息做出响应, 合理实施需求侧管理, 不仅能减少居民用电费用, 还能平滑负荷曲线、提高电力系统安全性^[5-6]。文献[7-8]

基金项目: 国家科技支撑项目(2015BAA01B01); 国家自然科学基金资助项目(51277027); 国家电网公司科技项目支持(“两个替代”潜力评估)

在分时电价的基础上,以最小化负荷峰谷差为目标,建立了家居设备优化运行的决策模型。文献[9]针对分布式电源供电量的波动性与随机性,研究被供电对象中柔性负荷的控制策略,并对储能设备的充放电进行控制,但该文献只考虑从用户侧单方面匹配供能侧,未考虑双向匹配。文献[10]分析了需求响应机理,用需求价格弹性描述用户响应,建立分时电价模型,为需求响应项目的制定和实施提供参考和依据。文献[11]针对楼宇中的空调负荷,提出了一种基于直接负荷控制的空调负荷两阶段优化调度和控制模型,以电力公司负荷调度费用最小以及负荷聚合商收益最大为优化目标,只顾及供能侧利益,未考虑用户侧利益。

居民电力负荷种类多样,其中空调负荷由于用电时间集中已成为电力峰荷的主要组成部分,以上海市为例,夏季高峰时段,空调负荷占比高达30%~40%,且呈现逐年上升趋势^[12]。但空调负荷不属于电需求,而是源于用户对冷热负荷的需求,故综合能源优化需利用CCHP系统将冷热负荷从电负荷中剥离,从而有效地降低电力峰荷,缓解用电高峰时期的供需矛盾。CCHP系统是一种将制冷、供热及发电过程一体化的多联产能源系统,具有良好的社会效益与经济效益^[13]。目前,关于CCHP型微网的能量优化管理受到广泛关注。文献[14]详细介绍了CCHP型微网各单元模型、规划方法、系统评估指标以及能量优化管理方法等。文献[15]提出了一种基于纵横交叉算法的新求解方法,以解决热电联产经济调度优化问题。文献[16-17]分别建立了计及分布式能源随机性优化模型,利用改进的粒子群优化算法求解。目前大多数针对CCHP型微网能量管理的研究,仅仅优化CCHP系统各部分出力,单方面的匹配用户负荷,未考虑供能侧与用户侧的双向匹配,也没有结合用户侧的需求。

本文为实现供能侧与用户侧双向匹配,优化管理智能社区的综合能源,提出智能社区两阶段优化模式,将冷热电联供系统能效高、经济效益好等优势与家居负荷需求侧响应的潜力相结合,从而达到供能侧与用能侧的双赢。

1 智能社区两阶段优化模式

智能社区涵盖供能侧和用能侧两方面内容,供能侧采取电网与CCHP系统联合供能的方式,用能侧考虑基于直接负荷控制的需求侧响应。社区用户可以选择由电网供能或者由CCHP系统供能:选择电网供能时,用户按分时电价向电网购电;选择CCHP系统供能时,用户按物业公司的冷热电价向

物业公司购买冷热电能。

智能社区两阶段优化模式如图1所示:第一阶段,物业公司根据负荷预测与光伏出力预测,以净收益最大为目标,优化未来24h内CCHP系统各部分出力;第二阶段,HEMS根据CCHP系统启停及出力情况以及分时电价信息,以用户费用最小为目标,优化未来24h内家居负荷工作时间。通过两阶段优化模式可以实现供能侧与用户侧能源的高效利用与管理,实现物业公司与社区用户的双赢^[3]。

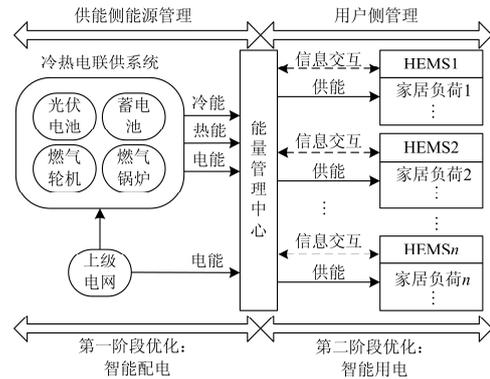


图1 智能社区的两阶段优化模式

Fig. 1 Two-stage optimal pattern in smart community

2 社区CCHP系统日前优化

智能社区CCHP系统由微型燃气轮机、蓄电池、光伏电池以及制冷装置、燃气锅炉等共同构成,图2给出了社区CCHP系统结构图^[18]。

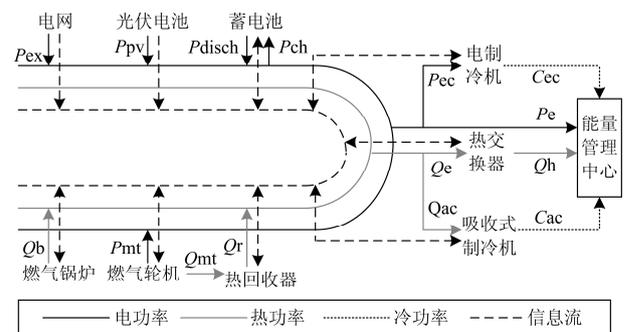


图2 社区CCHP系统结构图

Fig. 2 Framework of CCHP in smart community

2.1 CCHP系统模型

本节给出智能社区CCHP系统内各单元模型,包括微型燃气轮机、蓄电池、制冷机以及燃气锅炉的数学描述^[19-21]。

(1) 微型燃气轮机模型

$$P_{mt} = V_{mt} \cdot H_{ng} \cdot \eta_{mt} \quad (1)$$

$$Q_{mt} = V_{mt} \cdot H_{ng} \cdot (1 - \eta_{mt} - \eta_{loss}) \quad (2)$$

式中: P_{mt} 为微型燃气轮机的输出电功率; Q_{mt} 为经

回收后的热功率; η_{mt} 为微型燃气轮机发电效率; η_{loss} 为能量损耗率; V_{mt} 为微型燃气轮机每小时的天然气消耗量; H_{ng} 为天然气热值。

(2) 蓄电池模型

$$\begin{cases} 0 \leq U_{ch}^t \cdot P_{ch}^t \leq P_{ch}^{\max} \\ 0 \leq U_{disch}^t \cdot P_{disch}^t \leq P_{disch}^{\max} \\ U_{ch}^t + U_{disch}^t \leq 1 \\ W^t = W^{t-1} \cdot (1 - \mu) + (\eta_{ch} P_{ch}^t - \frac{1}{\eta_{disch}} P_{disch}^t) \Delta t \\ W^{\min} \leq W^t \leq W^{\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中: P_{ch}^t 、 P_{disch}^t 为蓄电池 t 时刻充放电功率; P_{ch}^{\max} 、 P_{disch}^{\max} 为蓄电池充放电功率上限; U_{ch}^t 、 U_{disch}^t 为蓄电池充放电状态变量; W^t 是蓄电池 t 时刻储能; W^{\max} 、 W^{\min} 为蓄电池储能上下限; μ 、 η_{ch} 、 η_{disch} 分别为蓄电池自身能量损耗率、充电效率、放电效率; Δt 为时间间隔, 取 $\Delta t=1$ h。

(3) 制冷机模型

$$C_{ac} = Q_{ac} \cdot COP_{ac} \quad (4)$$

$$C_{ec} = P_{ec} \cdot COP_{ec} \quad (5)$$

式中: Q_{ac} 、 P_{ec} 分别为吸收式制冷机输入热功率与电制冷机输入电功率; C_{ac} 、 C_{ec} 分别为吸收式制冷机与电制冷机输出冷功率; COP_{ac} 、 COP_{ec} 分别为吸收式制冷机与电制冷机的制冷系数。

(4) 燃气锅炉模型

$$Q_b = V_b \cdot H_{ng} \cdot \eta_b \quad (6)$$

式中: Q_b 为燃气锅炉输出热功率; V_b 为燃气锅炉每小时消耗的天然气量; η_b 为锅炉发热效率。

2.2 目标函数及约束条件

2.2.1 目标函数

第一阶段以物业公司净收益最大为 CCHP 日前优化的目标, 物业公司的净收益包括向用户售冷热电能的收入以及 CCHP 系统运行的成本。

$$\begin{cases} C_{pro} = C_{inc} - C_{cost} \\ C_{inc} = \sum_{n=1}^N C_{cchp,n} = \\ \sum_{n=1}^N \left(\sum_{t=1}^{24} (K_c \cdot Q_{c,n}^t + K_h \cdot Q_{h,n}^t + K_e \cdot P_{e,n}^t) \cdot \Delta t \cdot U_{cchp}^t \right) \\ C_{cost} = \sum_{t=1}^{24} (C_{gas}^t + C_{buy}^t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: C_{pro} 表示物业公司的净收益, 元; C_{inc} 表示物业公司向用户售冷热电的收入, 元; C_{cost} 表示 CCHP 系统的成本, 元; 它包含燃料费用 C_{gas} 以及购电费用 C_{buy} ; $C_{cchp,n}$ 表示第 n 户家庭向物业公司购买冷热电的费用, 元; N 表示用户数; $Q_{c,n}^t$ 、 $Q_{h,n}^t$ 、 $Q_{e,n}^t$

分别表示在 t 时刻第 n 户家庭的冷热电负荷, kW; K_c 、 K_h 、 K_e 分别表示冷热电电价, 元/kWh; Δt 为时间间隔; U_{cchp}^t 为 CCHP 系统供能的状态变量, $U_{cchp}^t=1$ 表示用户由 CCHP 系统供能。

2.2.2 约束条件

智能社区 CCHP 系统运行约束条件包括冷电功率平衡约束以及设备运行上下限约束。

(1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_e^t = P_{mr}^t + P_{pv}^t + P_{disch}^t + P_{ex}^t - P_{ch}^t - P_{ec}^t \\ Q_c^t = C_{ac}^t + C_{ec}^t = COP_{ac} \cdot Q_{ac}^t + COP_{ec} \cdot P_{ec}^t \\ Q_h^t = Q_e \cdot \eta_e = (Q_{mr}^t \cdot \eta_r + Q_b^t - Q_{ac}^t) \cdot \eta_e \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_e^t 、 Q_c^t 、 Q_h^t 分别表示在 t 时刻社区的冷热电负荷, kW; η_r 、 η_e 分别表示热回收装置以及热交换机的效率。

(2) 设备运行上下限约束

$$\begin{cases} P_{mt}^{\min} \leq P_{mt}^t \leq P_{mt}^{\max} \\ P_{ex}^{\min} \leq P_{ex}^t \leq P_{ex}^{\max} \\ Q_b^{\min} \leq Q_b^t \leq Q_b^{\max} \\ P_{ec}^{\min} \leq P_{ec}^t \leq P_{ec}^{\max} \\ Q_{ac}^{\min} \leq Q_{ac}^t \leq Q_{ac}^{\max} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{mt}^{\max} 、 P_{mt}^{\min} 表示燃气轮机运行上下限, kW; P_{ex}^{\max} 、 P_{ex}^{\min} 表示与电网交互上下限, kW; Q_b^{\max} 、 Q_b^{\min} 表示燃气锅炉上下限, kW; P_{ec}^{\max} 、 P_{ec}^{\min} 、 P_{ac}^{\max} 、 P_{ac}^{\min} 分别表示电制冷机与吸收式制冷机上下限, kW。

3 家庭能量管理系统日前优化

假设社区所有家庭中的设备均连接到家庭局域网中, 通过 ZigBee 组网进行节点通信^[9], HEMS 在控制家庭负荷时, 首先要求用户在交互界面输入家用电器期望完成的时间等各种参数, 然后根据用户输入的参数、分时电价、社区 CCHP 系统启停及出力情况等信息, 使用日前优化调度模型计算出第二天各家电最优运行计划, 以满足用户费用最少或舒适度最高等目标, 当天根据计划控制用户负荷开关, 实现负荷直接控制^[22]。家庭能量管理图如图 3 所示。

3.1 负荷控制模型

3.1.1 负荷分类

家居负荷类型众多, 负荷控制需充分考虑不同负荷的工作特性, 采取相应的控制策略。根据工作时间的弹性大小, 家居负荷可以分为两大类^[23]。

(1) 刚性负荷: 无时间弹性, 一旦用户有需求便需无条件被供应, 此类负荷一般满足人们基本生活

需求, 故不参与需求侧响应。刚性负荷一般有基本照明、电冰箱、电视机、计算机等。

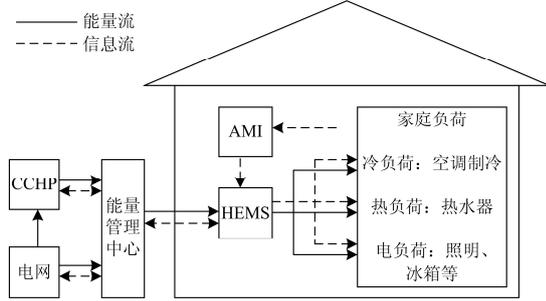


图3 家居能量管理图

Fig. 3 Framework of home energy management

(2) 柔性负荷: 有一定的时间弹性, 在用户舒适度范围内, 负荷是可控的。柔性负荷又可细分为不可中断负荷以及可中断负荷: 不可中断负荷一旦开始工作就不能停止, 直到满足工作时长要求才算工作结束, 这种类型的负荷有电饭煲、洗碗机、洗衣机等; 可中断负荷在允许工作时段范围内可以随意开停, 但也需满足其总工作时长, 此类负荷有空调、电动汽车、地面清洁机器人、衣服烘干器等。

3.1.2 柔性负荷控制模型

家居负荷中不可中断负荷及可中断负荷的数学模型如式(10)、式(11)所示^[24-27]。

(1) 不可中断负荷模型

$$\begin{cases} t_i^{\text{start}} \leq t_i \leq t_i^{\text{end}}, i \in 1, \dots, m \\ U_i^t = 0, t \in [1, 24] \setminus [\alpha_i, \beta_i] \\ \sum_{t=t_i^{\text{start}}}^{t_i^{\text{end}}} U_i^t = \sum_{t=\alpha_i}^{\beta_i} U_i^t = d_i \\ t_i^{\text{end}} - t_i^{\text{start}} + 1 = d_i \end{cases} \quad (10)$$

式中: i 是设备编号, m 是不可中断负荷数量; t_i 是设备 i 可能的工作时间点; t_i^{start} , t_i^{end} 是设备 i 工作开始与结束时刻; U_i^t 是设备 i 的状态变量($U_i^t = 1$ 表示设备在 t 时刻处于工作状态, $U_i^t = 0$ 表示处于停用状态); $[\alpha_i, \beta_i]$ 是设备允许工作时段范围, 不在这个范围内时, 设备不工作, $U_i^t = 0$; d_i 为工作时长; 由于设备为不可中断负荷, 故工作开始到结束之间的时长即为工作时长。

(2) 可中断负荷模型

$$\begin{cases} \alpha_j \leq t_j \leq \beta_j, j \in m+1, \dots, m+n \\ U_j^t = 0, t \in [1, 24] \setminus [\alpha_j, \beta_j] \\ \sum_{t=\alpha_j}^{\beta_j} U_j^t = d_j \end{cases} \quad (11)$$

式中: j 是设备编号, n 是可中断负荷数量, 为了从

设备编号判断设备类型, 将可中断负荷在不可中断负荷后编号; $[\alpha_j, \beta_j]$ 是设备允许工作的时段, 不在这个时段内, 状态变量 $U_j^t = 0$, 在这个范围内, U_j^t 可为 1 或 0, 但该设备工作总时长 $\sum U_j^t (t \in [\alpha_j, \beta_j])$ 需与要求的工作时长 d_j 相一致。由于考虑到用户舒适度, 故要求空调不能连续中断两个时段, 故在空调负荷控制时还需加约束条件 $U_j^{t-1} + U_j^t \geq 0$ 。

3.2 目标函数及约束条件

以用户费用最低作为 HEMS 日前优化目标。用户费用包括从电网购电费用与从物业公司购冷热电能费用。

$$\begin{cases} C_{\text{user},n} = C_{\text{grid},n} + C_{\text{cchp},n} \\ C_{\text{grid},n} = \sum_{t=1}^{24} K_{\text{grid}}^t \cdot P_n^t \cdot \Delta t \cdot U_{\text{grid}}^t \\ C_{\text{cchp},n} = \sum_{t=1}^{24} (K_c \cdot Q_{c,n}^t + K_h \cdot Q_{h,n}^t + K_e \cdot P_{e,n}^t) \cdot \Delta t \cdot U_{\text{cchp}}^t \end{cases} \quad (12)$$

式中: $C_{\text{user},n}$ 表示第 n 个家庭的费用, 包括从电网购电的费用 $C_{\text{grid},n}$ 与从物业公司购冷热电能的费用 $C_{\text{cchp},n}$, 元; K_{grid}^t 表示分时电价, 元/kWh; P_n^t 表示第 n 个家庭在电网供电时的总电力负荷, kW; U_{grid}^t 为电网供电的状态变量, $U_{\text{grid}}^t = 1$ 表示用户由电网供电。由于用户在某一时刻只能选择电网供电或者 CCHP 系统供电, 故有约束条件:

$$U_{\text{grid}}^t + U_{\text{cchp}}^t = 1 \quad (13)$$

家庭能量管理系统日前优化模型的约束条件即为式(10)~式(13)。

4 案例分析

4.1 仿真参数

(1) 用户负荷参数

设智能社区中共有 50 户家庭, 主要分为两种类型: A 类家庭 25 户属于“正常作息型”, 白天与晚上均有一定程度的负荷; B 类家庭 25 户属于“早出晚归型”, 负荷主要集中在晚上。通过对两类家庭在夏季典型日的负荷进行调研, 得到如表 1 和表 2 所示的用户负荷参数。表 1 和表 2 中空调、冰箱、热水器的功率是指额定电功率, 转化成冷热功率需要乘以冷热能效比, 所有家电都选用能效等级为 1 级的产品, 能效比取 3.4^[28]。此处, 插电式混合动力车只考虑作为普通用电负荷进行充电, 不考虑其放电性。由于有些设备一天内不止使用一次, 且一户家庭里同类型设备可能有不同额定功率, 故对于

同一种设备, 当存在不同工作时间段, 或是工作时长、额定功率不同时, 则可作为不同设备来控制。

(2) 分时电价

表 3 给出的分时电价信息以安徽省马鞍山市发布的信息为参考^[29]。

表 1 A 类用户负荷参数

Table 1 Household load work schedule of type A

类型	负荷	工作区间	时长/h	功率/kW
电负荷	照明	00:00~24:00	-	-
	电视×2	00:00~24:00	-	0.1
	电脑	00:00~24:00	-	0.25
	冰箱	00:00~24:00	24	0.49
	洗碗机	09:00~11:00	1	0.73
	电饭煲	10:00~12:00 16:00~18:00	1	0.8
	洗衣机	07:00~10:00	1	0.38
	PHEV	00:00~08:00	4	2.4
	衣服烘干机	15:00~17:00	1	1.26
	地面清洁机	09:00~12:00	2	0.7
冷负荷	空调 1	00:00~07:00 18:00~00:00	10	1.08
	空调 2	9:00~17:00	5	1.08
热负荷	热水器	14:00~19:00	3	2

表 2 B 类用户负荷参数

Table 2 Household load work schedule of type B

类型	负荷	工作区间	时长/h	功率/kW
电负荷	照明	00:00~24:00	-	-
	电视×2	00:00~24:00	-	0.1
	电脑	00:00~24:00	-	0.25
	冰箱	00:00~24:00	24	0.49
	洗碗机	20:00~22:00	1	0.73
	电饭煲	06:00~08:00 16:00~18:00	1	0.8
	洗衣机	00:00~07:00	1	0.38
	PHEV	00:00~08:00	4	2.4
	衣服烘干机	20:00~22:00	1	1.26
	地面清洁机	00:00~07:00	2	0.7
冷负荷	空调 1	00:00~07:00 18:00~00:00	10	1.08
	空调 2	00:00~07:00 18:00~00:00	10	1.08
热负荷	热水器	14:00~19:00	3	2

(3) CCHP 系统参数

社区 CCHP 系统燃气轮机容量 P_{mt}^{\max} 为 200 kW; 蓄电池容量 W^{\max} 为 500 kWh; 燃气锅炉容量 Q_b^{\max} 为 300 kW; 电制冷机容量 Q_{cc}^{\max} 与吸收式制冷机容量

Q_{ac}^{\max} 均为 200 kW; 与电网交互上限 P_{ex}^{\max} 为 200 kW。燃气价格也以安徽省马鞍山市为例, 2.1 元/m³^[30]。

表 3 分时电价

Table 3 Time-of-use power price

时间区间	电价/(元/kWh)	电价时段
00:00~08:00	0.315 3	谷时
23:00~24:00		
08:00~09:00	0.598 3	平时
12:00~17:00		
21:00~23:00		
09:00~12:00	0.798	峰时
17:00~21:00		

4.2 仿真结果分析

本文的优化模型在 Intel 32 位机上调试, 运行平台为 Matlab, 优化求解工具为 YALMIP。为便于对比分析, 将供能侧只有电网供电, 用户侧无响应的方案称为案例 I; 供能侧只有电网供电, 用户侧有响应的方案称为案例 II; 供能侧综合供能, 用户侧有响应的方案称为案例 III。不同案例下用户费用与物业公司净收益对比见表 4。

表 4 不同案例下用户费用与物业公司净收益对比

Table 4 User cost and property company profit under different cases

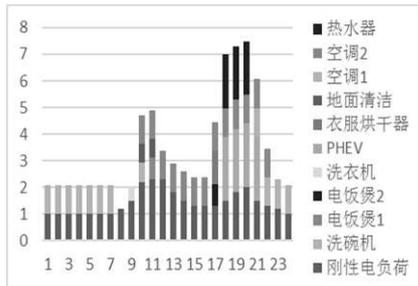
案例	供能侧优化	用户侧优化	A 类家庭费用/元	B 类家庭费用/元	物业公司净收益/元
I	×	×	52.25	46.49	0
II	×	√	39.53	37.11	0
III	√	√	34.64	36.55	337.81

由表 4 可以看出, A 类家庭在案例 I 的情景下, 费用为 52.25 元, 在案例 II 的情景下费用为 39.53 元, 相对于案例 I 节省了 12.72 元, 在案例 III 的情景下费用为 34.64 元, 相对于案例 II 节省了 4.89 元, 相对于案例 I 节省了 17.61 元; B 类家庭在案例 I 的情景下, 费用为 46.49 元, 在案例 II 的情景下费用为 37.11 元, 相对于案例 I 节省了 9.38 元, 在案例 III 的情景下费用为 36.55 元, 相对于案例 II 节省了 0.56 元, 相对于案例 I 节省了 9.94 元。由对比可以看出, 两阶段优化对 A、B 类家庭均有一定的经济性, 但相对于 A 类家庭, B 类家庭的节省费用较少, 这是因为 B 类家庭的负荷大多处于 18:00~7:00(次日), 而除 18:00~19:00 是峰时段外都是平谷时段, 故 B 类家庭负荷优化的潜力较小, 相对于大部分负荷集中在峰时段的 A 类家庭, B 类家庭经济性不明显。对于物业公司, 在用户直接由电网供能时并没有收益, 而在投入 CCHP 系统并优化

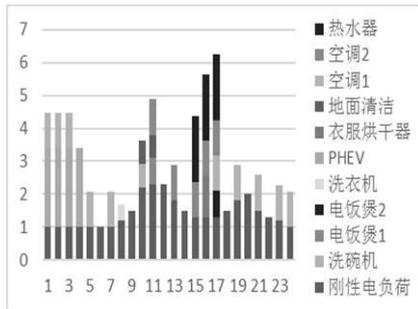
出力后，日净收益达到 337.81 元。

4.2.1 用户侧负荷优化结果

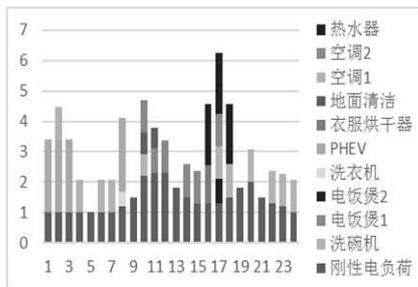
图 4(a)给出了 A 类家庭预测负荷数据，在 HEMS 没有优化负荷时，负荷高峰主要在峰价时段，峰荷出现在夜间 20:00 左右，达到 7.5 kW；图 4(b)给出了只有电网供电时，A 类家庭负荷优化后的数据，相对图 4(a)，原来在峰时段(18:00~21:00)的负荷明显降低，高峰时段的负荷转移到平谷时段，峰荷也降低为 6.26 kW，降幅 1.24 kW，降幅率 16.5%，但由于此时供能侧只有电网，故此时的负荷优化只是基于电价的需求侧响应；图 4(c)给出了综合供能时 A 类家庭负荷优化后的数据，相对于案例 II，案例 III 除了有对电价的响应也有对 CCHP 系统出力的响应，故负荷调节灵活性更大，相对于案例 I 峰荷降为 6.26 kW，相对于案例 II 峰荷没有下降，但将各类用电负荷在时序上重新调度。



(a) A 类家庭负荷预测



(b) A 类家庭仅有电网供电时的负荷安排

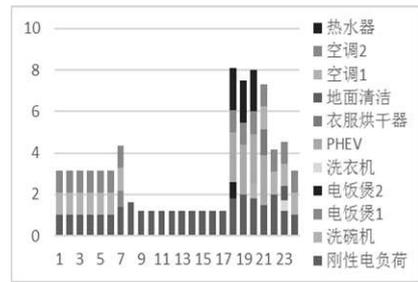


(c) A 类家庭经两阶段优化后的负荷安排

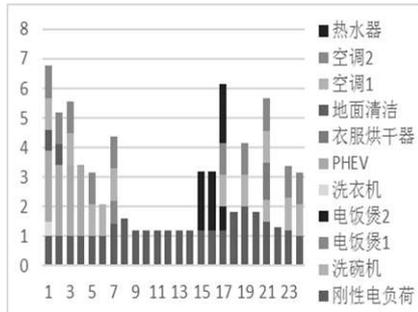
图 4 A 类家庭负荷数据

Fig. 4 Load data of family type A

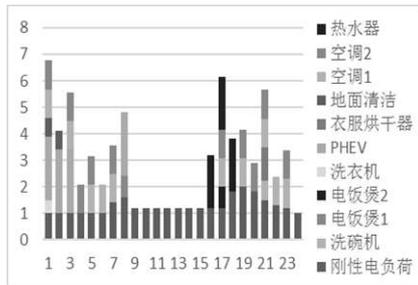
图 5(a)给出了 B 类家庭预测负荷数据，在 HEMS 没有负荷优化时，最高负荷出现在夜间 18:00 左右，数值为 8.08 kW；图 5(b)给出了只有电网供电时，B 类家庭负荷优化后的数据，相对图 5(a)峰荷转移到了凌晨 1:00，且降低为 6.76 kW，降幅 1.32 kW，降幅率 16.33%，与 A 类家庭在案例 II 下相同，此时的负荷优化只是基于电价的需求侧响应；图 5(c)给出了综合供能时 B 类家庭负荷优化后的数据，除对电价的响应外，也对 CCHP 系统的响应，例如优化后热水器开启时间为 16:00~18:00，虽然 18:00 为峰时电价，但燃气轮机与燃气锅炉出力较大，故也对 CCHP 系统的出力响应，相对于案例 I 峰荷降为 6.76 kW，相对于案例 II 峰荷没有下降。



(a) B 类家庭负荷预测



(b) B 类家庭仅有电网供电时的负荷安排



(c) B 类家庭经两阶段优化后的负荷安排

图 5 B 类家庭负荷数据

Fig. 5 Load data of family type B

4.2.2 供能侧 CCHP 系统优化结果

CCHP 系统出力优化结果如图 6 所示。凌晨时段，电负荷与冷负荷较低，且此时电价较低，故燃

气轮机出力较低, 不足部分从电网购电; 在 8:00~9:00, 由于此时没有冷热负荷, 只有电负荷且电负荷不高, 且此时仍为平谷电价, 故燃气轮机不启动, 直接从电网购电; 在 10:00~15:00 时, 由于此时有冷电负荷, 光伏出力较大, 且电价较高, 故有燃气轮机与光伏满足电力需求, 几乎不从电网购电; 在 18:00~20:00, 由于此时热负荷较大, 燃气轮机产生的热量不够, 故需燃气锅炉补燃。

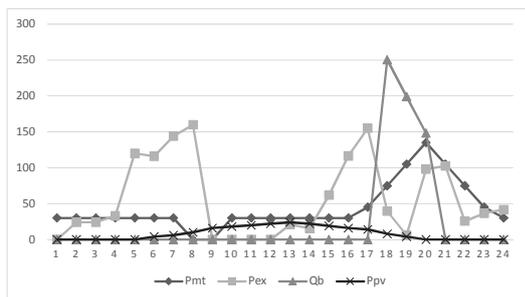


图 6 CCHP 系统出力情况

Fig. 6 Output of each part of CCHP

CCHP 系统中蓄电池储能变化情况如图 7 所示。蓄电池在电价平谷时段充电, 高峰时段放电, 从而降低系统的费用, 提高物业的净收益。

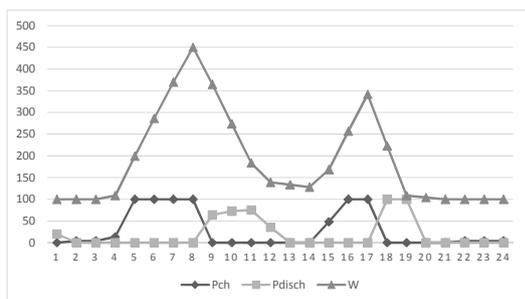


图 7 蓄电池充放电情况

Fig. 7 Charging and discharging state of battery

5 结论

本文研究了综合能源供能的智能社区两阶段优化模式, 在第一阶段以物业公司净收益最大为目标函数优化 CCHP 系统各部分出力, 在第二阶段以用户费用最低为目标函数优化负荷安排, 最后通过不同案例的仿真结果对比, 得出了以下结论:

(1) 综合能源供能的智能社区两阶段优化不仅对物业公司有经济性, 对用户侧也有经济性, 能实现用户侧与物业侧的双赢。

(2) 用户侧根据分时电价与社区 CCHP 系统出力情况做出响应, 通过 HEMS 合理安排负荷工作时间, 有效地降低了峰荷。

(3) 供能侧采用电网供能与冷热电联供相结合

的供能方式, 在电价低且冷热负荷不高时由电网供能, 在电价较高且冷热负荷较大时由冷热电联供系统供能, 即综合能源供应相对于单一电网供电灵活度更高, 经济效益更好。

参考文献

- [1] 张新昌, 周逢权. 智能电网引领智能家居及能源消费革新[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 59-61.
ZHANG Xinchang, ZHOU Fengquan. Smart grid leads the journey to innovative smart home and energy consumption patterns[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 59-61.
- [2] 曹志刚. 智能配用电园区用户侧双向互动功能的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 79-80.
CAO Zhigang. The design on two-way exchanging function of user side in intelligent power distribution and using community[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 79-80.
- [3] 王澄, 徐延才, 魏庆来, 等. 智能社区商业模式及运营策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 148-152.
WANG Cheng, XU Yancai, WEI Qinglai, et al. Analysis of intelligent community business model and operation mode[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 148-152.
- [4] 徐俊, 欧阳丽, 周春, 等. 多智能用户微电网的分层分时能量管理[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(10): 21-28.
XU Jun, OUYANG Li, ZHOU Chun, et al. Multi-time scale energy management for microgrid system with smart users[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(10): 21-28.
- [5] 蔡德华, 陈伯熹, 程乐峰, 等. 实施需求侧管理对提高发电系统可靠性的影响探究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 51-56.
CAI Dehua, CHEN Boxi, CHENG Lefeng, et al. Effective study about the implementation of demand side management on improving reliability of generation system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 51-56.
- [6] 何彦英, 曾鸣. 考虑需求侧响应的配电网运行效应评估研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(11): 1-7.
HE Yanying, ZENG Ming. Effect evaluation of demand response on distribution network operation[J]. Shanxi Electric Power, 2015, 43(11): 1-7.
- [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): 717-722.

- 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): 717-722.
- [8] 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): 367-371.
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): 367-371.
- [9] 阮冰洁, 杨强, 颜文俊. 计及实时电价的柔性负荷系统需求侧响应机制研究[J]. 机电工程, 2015, 32(6): 858-861.
RUAN Bingjie, YANG Qiang, YAN Wenjun. Demand response under real-time price for domestic energy system[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2015, 32(6): 858-861.
- [10] 陈俊生. 面向智能用电的需求响应技术及家庭用户用电策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
CHEN Junsheng. Research on demand response and electricity consumption strategy of residential consumers with smart power consumption oriented[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [11] 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): 1-5.
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): 1-5.
- [12] 张琪祁. 上海电网家用空调负荷特性试验圆满结束[EB/OL]. [2013-03-18]. http://www.sh.sgcc.com.cn/load.LoadPage.d?siteCode=sdsd&newsid=1646947&page=detail_zxzx.xml.
ZHANG Qiqi. The successful implementation of household air conditioning load characteristic test in Shanghai grid[EB/OL]. [2013-03-18]. http://www.sh.sgcc.com.cn/load.LoadPage.d?siteCode=sdsd&newsid=1646947&page=detail_zxzx.xml.
- [13] 赵峰, 张承慧, 孙波, 等. 冷热电联供系统的三级协同整体优化设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3785-3786.
ZHAO Feng, ZHANG Chenghui, SUN Bo, et al. Three-stage collaborative global optimization design method of CCHP[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3785-3786.
- [14] GU Wei, WU Zhi, BO Rui, et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: a review[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014(54): 26-37.
- [15] 孟安波, 梅鹏, 卢海明. 基于纵横交叉算法的热电联产经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 90-99.
MENG Anbo, MEI Peng, LU Haiming. Crisscross optimization algorithm for combined heat and power economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 90-99.
- [16] 顾伟, 吴志, 王锐. 考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 1-9.
GU Wei, WU Zhi, WANG Rui. Multi-objective optimization considering pollution gas emission in CHP micro grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 1-9.
- [17] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微电网经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 1-6.
WANG Rui, GU Wei, WU Zhi. Optimization of economic operation in CHP micro grid including renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 1-6.
- [18] 王成山, 洪博文, 郭力, 等. 冷热电联供微电网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 28-30.
WANG Chengshan, HONG Bowen, GUO Li, et al. A general modeling method for optimal dispatch of CCHP micro grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 28-30.
- [19] 李正茂, 张峰, 梁军, 等. 计及附加机会收益的冷热电联供型微电网动态调度[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 8-11.
LI Zhengmao, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Dynamic schedule considering additional opportunity income in CCHP micro grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 8-11.
- [20] 彭树勇. 冷热电联供型微电网优化配置与运行研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
PENG Shuyong. Research on the optimal configuration and operation for CCHP micro grid[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [21] 荆有印, 白鹤, 张建良. 太阳能冷热电联供系统的多

- 目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 33(20): 82-85.
- JING Youyin, BAI He, ZHANG Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar CCHP system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 33(20): 82-85.
- [22] 李东东, 崔龙龙, 林顺富, 等. 家庭智能用电系统研究及智能控制器开发[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 124-125.
- LI Dongdong, CUI Longlong, LIN Shunfu, et al. Study of smart power utilization system and development of smart controller for homes[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 124-125.
- [23] 王珂, 姚建国, 姚良忠. 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. A research review on flexible power load scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20): 127-135.
- [24] WU Zhi, ZHOU Sunyang, LI Jiangning, et al. Real-time scheduling of residential appliances via conditional risk-at-value[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1282-1285.
- [25] HUANG Yantai, TIAN Hongjun, WANG Lei. Demand response for home energy management system[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2015(73): 448-455.
- [26] 赵慧颖, 刘广一, 贾宏杰, 等. 基于精细化模型的需求侧响应策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 64-65.
- ZHAO Huiying, LIU Guangyi, JIA Hongjie, et al. Analysis of demand response program based on refined models[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 64-65.
- [27] YAN Chenchu, XUE Xue, WANG Shengwei, et al. A novel air-conditioning system for proactive power demand response to smart grid[J]. Energy Conversion and Management, 2015(102): 239-243.
- [28] 能效等级[EB/OL]. [2014-12-31]. <http://baike.sogou.com/v7882811.htm>.
- [29] 分时电价指南[EB/OL]. [2015-02-11]. <http://www.mas.gov.cn/wsbs/contentDetail/544f0aa5ceaf52cfc6cd55.html>.
- [30] 港华燃气收费指南[EB/OL]. [2015-06-15]. <http://www.mas.gov.cn/wsbs/contentDetail/544f0aa5ceaf52cfc6cd61.html>.

收稿日期: 2016-01-03; 修回日期: 2016-03-21

作者简介:

王 珺(1994-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为冷热电联供系统优化、需求侧响应; E-mail:837518282@qq.com

顾 伟(1981-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为分布式发电与微电网、配电网及电能质量分析等; E-mail:wgu@seu.edu.cn

王志贺(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网规划与运行、能量管理。E-mail:wzhihew@163.com

(编辑 葛艳娜)