

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230474

智能小区居民负荷参与优化调度及控制策略研究

杨秀¹, 卢炜¹, 余文昶², 陈永刚², 曹俊波²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 中国华电集团有限公司上海分公司, 上海 200120)

摘要: 随着居民用电设备的快速发展, 居民用电占社会用电的比例越来越大, 调动居民负荷参与需求侧响应值得深入研究。首先, 建立了智能小区参与需求侧响应的双层调度模型, 上层为配电网运营商收益最大化, 下层为智能小区用户总调度成本最低。其次, 该模型考虑了各类用电设备的负荷模型、用户的舒适度以及基于调峰贡献度指标约束的激励措施。最后, 考虑到居民负荷参与调度会产生功率波动的问题, 以功率较大的空调负荷为例, 针对空调参与调度造成功率跌落的现象提出相应的控制策略。结果表明, 双层调度模型能够使用户按照配电网运营商的调控期望进行调度, 调峰效果较好, 并且兼顾配电网运营商和用户的利益。提出的两种控制策略均有效地减小了功率跌落, 提高了配电网的稳定性。

关键词: 智能小区; 需求响应; 双层调度; 调峰约束; 控制策略

Optimal dispatching and control strategies for residential load of intelligent communities

YANG Xiu¹, LU Wei¹, YU Wenchang², CHEN Yonggang², CAO Junbo²

(1. School of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. China Huadian Group Co., Ltd. Shanghai Branch, Shanghai 200120, China)

Abstract: With the rapid development of residential electricity equipment, the proportion of residential electricity in social electricity consumption is increasing. Mobilizing residential load to participate in demand side response is worthy of in-depth research. First, a two-layer scheduling model for intelligent community participation in demand side response is established. The upper layer maximizes the profits of distribution network operators, and the lower layer has the lowest total scheduling cost for intelligent community users. Second, the model considers the load models of various types of electrical equipment, user comfort, and incentive measures based on peak shaving contribution index constraints. Finally, considering the issue of power fluctuations caused by residential load participation in scheduling, and taking high-power air conditioning loads as an example, it proposes corresponding control strategies to address the phenomenon of power drops caused by air conditioning participation in scheduling. The results show that the double-layer scheduling model can enable users to schedule according to the scheduling expectations of distribution network operators, the peak shaving effect is good. It also takes into account the interests of both distribution network operators and users. The two proposed control strategies effectively reduce power drop and improve the stability of the distribution network.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52207121).

Key words: intelligent community; demand response; double layer scheduling; peak shaving constraints; control strategy

0 引言

近年来我国的经济迅速发展, 电力需求量逐年增大, 同时伴随着大量随机性、波动性较大的可再生能源接入电网, 给电网供电带来了巨大的挑战^[1-2]。为了缓解用电高峰期电网的供电压力, 电网激励电

力用户积极参与需求侧响应^[3-5]。现如今, 居民负荷用电功率随着技术革新和用户拥有率的提升逐年增长, 占总用电比例也越来越高^[6]。因此, 调动居民负荷参与需求侧响应^[7-8]是一个值得深入研究的问题。

居民负荷参与需求侧响应首先应建立参与调度的负荷模型, 文献[9]在建立居民负荷模型时, 将居民负荷简单分为可平移、可转移和可削减这三类负

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52207121)

荷, 没有将居民负荷中耗电量较大的温控负荷考虑在内; 文献[10-11]建立了温控负荷模型, 但对其他可调度的用电负荷具体模型考虑较少。居民负荷参与调度主要是延长用户使用时间和降低负荷运行功率, 这两种调度方法均会影响用户的舒适度, 因此, 用户舒适度是居民参与需求侧响应不可忽视的因素。文献[12]考虑到人体热舒适度, 在此基础上建立了空调的虚拟储能模型; 文献[13]设置用户可忍受温度调控区间, 在该区间内对空调温度进行调控; 文献[14]针对电热水器采用多目标优化, 在目标函数中加入用户舒适度。上述文献仅考虑温控负荷对用户舒适度的影响, 但缺少对其他柔性负荷舒适度的考虑。进一步地, 为了调动居民参与需求侧响应的积极性, 需要采取一定的激励措施。文献[15]采用价格弹性矩阵形成不同的电价方案激励用户参与需求侧响应, 但这种方法对数据的要求较高; 文献[16]根据用户的调峰贡献度发放激励费用, 虽然能够在一定程度上激励用户削峰, 但最终还是依赖于用户自身参与调控的意愿。在调度模型目标函数的建立上, 文献[17]建立的日前调度模型以电网运营总成本最低为目标函数, 并未考虑用户侧的用电成本; 文献[18]从用户侧出发, 以总用电成本最低为目标, 规划出空调、电热水器以及电动汽车的最优调度计划, 但没有考虑发电侧的运营成本。

大量负荷参与调度的过程中会造成功率的波动, 以功率大且居民拥有数量较多的空调负荷为例, 文献[19]针对空调参与调峰造成的功率跌落, 利用其余空调组降低设定温度来提升运行功率, 从而填补功率空缺, 但这种方法对功率跌落的提升效果一般; 文献[20]采用变状态数的状态队列模型, 对功率跌落改善明显, 但其目标函数只考虑了控制后的空调聚合精度, 若在目标函数中进一步考虑功率跌落, 改善效果会更好。

综上所述, 目前居民负荷参与需求侧响应的调度模型往往考虑不够全面, 控制策略也有待进一步改进, 针对以上问题, 本文以智能小区用户为研究对象, 建立了双层调度模型, 兼顾配电网运营商的收益和居民用户的成本, 调度模型中对不同种类可调度的居民负荷进行详细建模, 并建立相应的舒适度模型。在激励措施上, 本文将用户调峰贡献度指标进行约束, 用户按照约束进行调峰并获得相应激励费用, 改变调峰受用户主观影响较大的缺点。在控制策略上, 对文献[20]使用的控制策略作进一步改进, 在目标函数上加入限制功率跌落控制, 最终的改善效果更好。

1 智能小区框架说明

智能小区能量信息流框架如图 1 所示。该智能小区由配电网供电, 并配备光伏发电系统和储能系统, 可调度的柔性负荷主要分为四大类: 温控负荷、可平移负荷、可中断负荷以及可削减负荷。配电网运营商与智能小区用户进行信息交互, 配电网运营商发布电价, 用户根据电价信息和调峰贡献度指标约束通过家庭能量管理系统(home energy management system, HEMS)制定调度计划, 并通过终端装置上报给配电网运营商。配电网运营商根据各个小区用户的调度计划, 制定相应的控制策略。

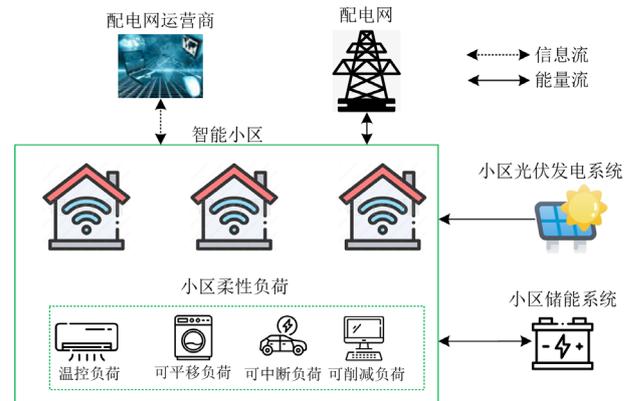


图 1 智能小区能量信息流框架

Fig. 1 Energy information flow framework of intelligent community

2 智能小区协调调度模型

智能小区调度模型采用双层调度模型, 如图 2 所示。上层是以配电网运营商的收益最大化为目标, 决策变量为配电网运营商的售电电价, 配电网运营商根据居民的用电计划调整售电电价, 从而使自身的利益最大化; 下层是以智能小区用户的成本最小为目标, 决策变量为用户的舒适度、调峰贡献指标以及配电网运营商的售电电价。小区用户根据自身对舒适度的要求、与配电网运营商签订的调峰贡献指标约束以及配电网运营商给出的电价调整自身的用电方案, 从而使总成本最低。需要强调的是, 用电计划是在配电网运营商收益最大化的前提下制定的。

2.1 智能小区负荷模型

智能小区负荷主要分为两类: 刚性负荷和柔性负荷。刚性负荷对居民生活影响较大, 如家用照明设备、厨房用电设备, 这类设备的用户往往不愿参与调控。而柔性负荷如空调、电热水器和洗衣机等, 由于其用电功率和用电时间可以灵活变动, 因此当电网需要负荷参与需求侧响应时, 这类负荷是良好

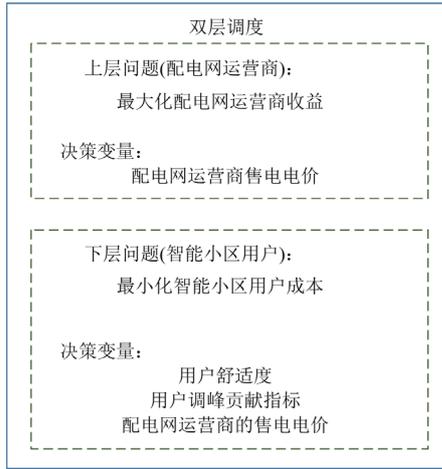


图2 双层调度示意图

Fig. 2 Double layer scheduling diagram

的调度资源。本文将智能小区柔性负荷分为四类：温控负荷、可平移负荷、可中断负荷以及可削减负荷。

2.1.1 温控负荷模型

居民常用的温控负荷有空调、电热水器和电冰箱。由于食物保鲜对电冰箱的温度要求较高，因此本文不对其进行调控。而空调和电热水器具有良好的保温性能，其功率的变动不会立即影响居民的舒适度，所以本文选取空调和电热水器作为调控资源。

空调可分为变频空调和定频空调，考虑到智能小区用户电气设备的多样性，本文对两类空调模型均作出具体分析。

对变频空调而言，其工作在稳态和动态两种工作状态。当变频空调在一段时间内运行在同一设定温度下，这段时间可认为变频空调工作在稳态，此时的室内温度等于变频空调的设定温度，其稳态功率 $P_{bp}(t)$ 为

$$P_{bp}(t) = (\theta_{out}(t) - \theta_{bp,set})A / \eta_{bp} \quad (1)$$

式中： $\theta_{out}(t)$ 和 $\theta_{bp,set}$ 分别为室外温度和设定温度；

A 为导热系数； η_{bp} 为变频空调的能效比。

当变频空调在某一时刻的设定温度发生了变化，其运行功率和室内温度也会随之改变，经过一段时间过渡后，变频空调重新运行到稳态，这一过渡时间段内可认为变频空调工作在动态中，其动态功率 P_{trends} 和室内温度 $\theta_{bp}(t)$ 变化情况分别为

$$P_{trends} = (k+1)P_{bp} \quad (2)$$

$$\theta_{bp}(t) = \theta_{out}(t) - \eta_{bp} P_{trends} / A - (\theta_{out}(t) - \eta_{bp} P_{trends} / A - \theta_{bp}(t-1))e^{-\frac{\Delta t_{bp}}{RC}} \quad (3)$$

式中： P_{trends} 为变频空调运行在动态状态下的功率

值； k 为功率变化系数，当设定温度上调时， $k < 0$ ，反之 $k > 0$ ； Δt_{bp} 为变频空调仿真时间步长； R 为房屋等效热阻； C 为房屋等效热容。

由于变频空调的动态过程仅存在 5 min，具体见附录 A，而本文日前调度模型的时间尺度为 30 min，因此变频空调较短的动态过程在日前调度模型中可以忽略，只考虑其稳态。

对定频空调而言，负荷模型可采用适用居民楼的一阶 ETP 模型来描述，室温变化一阶微分方程为

$$\frac{d\theta_{dp}(t)}{dt} = -[\theta_{dp}(t) - \theta_{out}(t) + m(t)QR] / CR \quad (4)$$

$$m(t) = \begin{cases} 0, & \theta_{dp}(t) \leq \theta_- \\ 1, & \theta_{dp}(t) \geq \theta_+ \\ m(t-\varepsilon), & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \theta_- = \theta_{dp,set} - c \\ \theta_+ = \theta_{dp,set} + c \end{cases} \quad (6)$$

式中： $\theta_{dp}(t)$ 和 $\theta_{out}(t)$ 分别为定频空调 t 时刻的室内外温度； $m(t)$ 为定频空调的开关状态，0 表示关，1 表示开； Q 为空调的制冷功率，大小可表示为 $Q = \eta_{dp} P_N$ ， η_{dp} 为定频空调的能效比， P_N 为定频空调的额定功率； θ_+ 和 θ_- 分别为定频空调在某一设定温度运行时室内温度变化上下限； $\theta_{dp,set}$ 为定频空调设定温度； c 为感应灵敏度； ε 为仿真时间步长。

将式(5)代入式(4)进行求解，得到定频空调的开关周期为

$$T_{on} = CR \ln\left(\frac{QR + \theta_{dp,set} + c - \theta_{out}}{QR + \theta_{dp,set} - c - \theta_{out}}\right) \quad (7)$$

$$T_{off} = CR \ln\left(\frac{\theta_{out} - \theta_{dp,set} + c}{\theta_{out} - \theta_{dp,set} - c}\right) \quad (8)$$

式中， T_{on} 和 T_{off} 分别为定频空调的开通和关断周期。

同样考虑到日前调度的时间尺度，定频空调在一个调度周期内的功率可用平均功率表示为

$$P_{on} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (9)$$

$$P_{dp}(t) = P_N P_{on} \quad (10)$$

式中： P_{on} 为定频空调的开通占比； $P_{dp}(t)$ 为定频空调一个运行周期内的平均功率。

由于式(10)为非线性方程，将其代入调度模型中进行计算时求解较为复杂，为了简化计算，需要对式(10)进行线性化处理。

将式(7)和式(8)进一步变换得到

$$\begin{cases} T_{\text{on}} = CR \ln(1 + x_{\text{on}}) \\ x_{\text{on}} = \frac{2c}{QR + \theta_{\text{dp,set}} - c - \theta_{\text{out}}} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} T_{\text{off}} = CR \ln(1 + x_{\text{off}}) \\ x_{\text{off}} = \frac{2c}{\theta_{\text{out}} - \theta_{\text{dp,set}} - c} \end{cases} \quad (12)$$

将式(11)和式(12)代入式(9)进行不等式变化, 得到

$$\frac{\frac{x_{\text{on}}}{1 + x_{\text{on}}}}{\frac{x_{\text{on}}}{1 + x_{\text{on}}} + \frac{x_{\text{off}}}{1 + x_{\text{off}}}} < P_{\text{on}} < \frac{x_{\text{on}}}{x_{\text{on}} + x_{\text{off}}} \quad (13)$$

将式(11)和式(12)代入式(13)得到

$$\frac{\theta_{\text{out}} - \theta_{\text{dp,set}} - c}{\eta_{\text{dp}} P_{\text{N}} R} < P_{\text{on}} < \frac{\theta_{\text{out}} - \theta_{\text{dp,set}} + c}{\eta_{\text{dp}} P_{\text{N}} R} \quad (14)$$

结合式(10)和式(14)可以求出定频空调的平均功率 $P_{\text{dp}}(t)$ 变化范围为

$$P_{\text{min}} = \frac{\theta_{\text{out}} - \theta_{\text{dp,set}} - c}{\eta_{\text{dp}} R} < P_{\text{dp}}(t) < P_{\text{max}} = \frac{\theta_{\text{out}} - \theta_{\text{dp,set}} + c}{\eta_{\text{dp}} R} \quad (15)$$

式中, P_{max} 和 P_{min} 分别为定频空调平均功率取值的上下限。

根据式(15), 定频空调平均功率可以近似表示为

$$P_{\text{dp}} = P_{\text{min}} + \alpha(P_{\text{max}} - P_{\text{min}}) \quad (16)$$

式中, α 为比例因子, 取值范围为[0, 1], 本文中误差取 0.5, 具体见附录 B。

基于居民最常用的储水式热水器建立电热水器一阶等值模型, 可表示为

$$\theta_{\text{ch,in}}(t) = \theta_{\text{out}}(t) + Q_{\text{ch}}(t)R_{\text{ch}} - (\theta_{\text{out}}(t) + Q_{\text{ch}}(t)R_{\text{ch}} - \theta_{\text{ch,in}}(t-1))e^{-\frac{\Delta t_{\text{ch}}}{R_{\text{ch}}C_{\text{ch}}}} \quad (17)$$

$$Q_{\text{ch}}(t) = \eta_{\text{ch}} P_{\text{ch}}(t) + Q_{\text{ch,loss}}(t) \quad (18)$$

式中: $\theta_{\text{ch,in}}(t)$ 和 $\theta_{\text{out}}(t)$ 分别为 t 时刻电热水器的内部和外部温度; $Q_{\text{ch}}(t)$ 为 t 时刻的等效热功率; R_{ch} 和 C_{ch} 分别为电热水器所在房间的等效热阻和等效热容; Δt_{ch} 为电热水器仿真时间步长; η_{ch} 为电热水器的热效率; $Q_{\text{ch,loss}}(t)$ 为 t 时刻热损失功率; $P_{\text{ch}}(t)$ 为 t 时刻电热水器电功率。

热水器热损失功率与用户用水行为有关, 当某一时刻用户存在用水行为, 此时的热损失功率可表示为

$$Q_{\text{ch,loss}}(t) = \frac{d(t)C_w(\theta_{\text{ch,in}}(t) - \theta_{\text{cw}})}{\Delta t_{\text{ch}}} \quad (19)$$

式中: $d(t)$ 为 t 时刻电热水器的用水量; C_w 为水的

比热容; θ_{cw} 为流入电热水器内的冷水温度。

2.1.2 可平移负荷模型

可平移负荷的特点是负荷一旦使用中途不可中断, 直到此次工作完成, 但是用户可以根据自身需要灵活调整使用时间, 居民家中最常见的可平移负荷有洗衣机、洗碗机和消毒柜等。

假设可平移负荷运行过程中以额定功率运行, 运行约束可表示为

$$\sum_t^{t+T_{\text{sh}}-1} x_{\text{sh}}(t) \geq y_{\text{sh}}(t)T_{\text{sh}}, t \in [\alpha_{\text{sh}}, \beta_{\text{sh}}] \quad (20)$$

$$\sum_{t=\alpha_{\text{sh}}}^{\beta_{\text{sh}}} x_{\text{sh}}(t) = T_{\text{sh}} \quad (21)$$

$$\sum_{t=\alpha_{\text{sh}}}^{\beta_{\text{sh}}} y_{\text{sh}}(t) = 1 \quad (22)$$

式中: $x_{\text{sh}}(t)$ 表示可平移负荷在 t 时刻是否运行, 1 表示运行, 0 表示不运行; $y_{\text{sh}}(t)$ 表示可平移负荷在 t 时刻是否启动, 1 表示启动, 0 表示未启动; α_{sh} 和 β_{sh} 分别表示可平移负荷允许调度的起止时间; T_{sh} 表示可平移负荷的运行时间总和。

2.1.3 可中断负荷模型

可中断负荷的特点是负荷运行过程中可以中断, 并且能够转移到其他时间段运行, 但累计运行的总时长不变, 居民负荷中最常见的可中断负荷为电动汽车, 假设可中断负荷运行过程中功率恒定, 其运行约束可表示为

$$P_{\text{tr}}(t) = P_{\text{N,tr}} x_{\text{tr}}(t) \quad (23)$$

$$\sum_{t=\alpha_{\text{tr}}}^{\beta_{\text{tr}}} x_{\text{tr}}(t) = T_{\text{tr}} \quad (24)$$

式中: $P_{\text{tr}}(t)$ 和 $P_{\text{N,tr}}$ 分别表示可中断负荷 t 时刻的运行功率和额定功率; $x_{\text{tr}}(t)$ 表示可中断负荷在 t 时刻是否运行, 1 表示运行, 0 表示不运行; α_{tr} 和 β_{tr} 分别表示可中断负荷允许调度的起止时间; T_{tr} 表示可中断负荷的运行时间总和。

2.1.4 可削减负荷模型

可削减负荷的特点是负荷的运行时间段不变但运行功率可调, 如功率可调的电脑, 假设某类可削减负荷共有 n 档功率模式, 其运行约束应满足式(25)一式(26)。

$$\sum_{k=1}^n x_{\text{cut},k}(t) = 1, t \in [\alpha_{\text{cut}}, \beta_{\text{cut}}] \quad (25)$$

$$P_{\text{cut}}(t) = \sum_{k=1}^n x_{\text{cut},k}(t)P_{\text{cut},k} \quad (26)$$

式中: $x_{\text{cut},k}(t)$ 表示可削减负荷在 t 时刻第 k 档功率

的运行情况, 1 表示运行, 0 表示不运行; α_{cut} 和 β_{cut} 分别表示可削减负荷允许调度的起止时间; $P_{\text{cut}}(t)$ 表示可削减负荷的运行功率; $P_{\text{cut},k}$ 表示可削减负荷在第 k 档功率模式下的运行功率。

2.2 智能小区储能系统模型

智能小区储能系统由铅酸蓄电池组成, 其运行约束为

$$S_{\text{ESS}}(t) = S_{\text{ESS}}(t-1) + \eta_{\text{ESSC}} P_{\text{ESSC}}(t) - \frac{P_{\text{ESSD}}(t)}{\eta_{\text{ESSD}}} \quad (27)$$

$$S_{\text{ESS},\min} \leq S_{\text{ESS}}(t) \leq S_{\text{ESS},\max} \quad (28)$$

$$0 \leq P_{\text{ESSC}}(t) \leq x_{\text{ESSC}}(t) P_{\text{ESSC},\max} \quad (29)$$

$$0 \leq P_{\text{ESSD}}(t) \leq x_{\text{ESSD}}(t) P_{\text{ESSD},\max} \quad (30)$$

$$0 \leq x_{\text{ESSC}}(t) + x_{\text{ESSD}}(t) \leq 1 \quad (31)$$

式中: $S_{\text{ESS}}(t)$ 为 t 时刻储能系统的蓄电量; $S_{\text{ESS},\max}$ 和 $S_{\text{ESS},\min}$ 分别为储能系统蓄电量的上下限; $P_{\text{ESSC},\max}$ 和 $P_{\text{ESSD},\max}$ 分别为储能系统充放电功率的上限; $P_{\text{ESSC}}(t)$ 和 $P_{\text{ESSD}}(t)$ 分别为 t 时刻储能系统的充放电功率; η_{ESSC} 和 η_{ESSD} 分别为储能系统的充放电效率; $x_{\text{ESSC}}(t)$ 和 $x_{\text{ESSD}}(t)$ 分别为 t 时刻储能系统的充放电状态, 1 表示充电或者放电, 0 表示不充电或者不放电。

2.3 智能小区用户舒适度模型

2.3.1 温控负荷舒适度模型

温控负荷的舒适度与人体最佳适应温度有关, 负荷温度离人体最佳适应温度越远, 人体的热不适度越高, 温控负荷的热不适模型可表示为

$$U_{\text{wk},i} = \frac{\sum_{t=1}^T |\theta_{i,\text{in}}(t) - \theta_{i,\text{in,best}}(t)| x_i(t)}{\sum_{t=1}^T |\theta_{i,\text{in,max}} - \theta_{i,\text{in,best}}(t)| x_i(t)} \quad (32)$$

式中: $U_{\text{wk},i}$ 为第 i 种温控负荷的用户热不适度, 其值越大代表用户舒适度越低, 取值范围为[0,1]; $\theta_{i,\text{in}}(t)$ 和 $\theta_{i,\text{in,best}}(t)$ 分别表示第 i 种温控负荷的实际温度和人体最佳适应温度; $\theta_{i,\text{in,max}}$ 为第 i 种温控负荷的最大调控温度; $x_i(t)$ 表示第 i 种温控负荷在 t 时刻是否对温度有要求, 1 代表有要求, 0 代表没有要求; T 表示将 24 h 的调度周期平均分为 T 个时间段。

2.3.2 可平移负荷舒适度模型

可平移负荷的用户舒适度与用户延长使用的时间有关, 延长使用时间越长, 用户的舒适度越低, 舒适度模型可表示为

$$U_{\text{sh},i} = \frac{T_{\text{sh},i,\text{de}}}{T_{\text{sh},i,\text{de},\max}} = \frac{\sum_{t=1}^T y_{\text{sh},i}(t)t - \alpha_{\text{sh},i}}{\beta_{\text{sh},i} - \alpha_{\text{sh},i} + 1 - T_{\text{sh},i}} \quad (33)$$

式中: $U_{\text{sh},i}$ 表示第 i 种可平移负荷的舒适度, 其值越大代表用户的舒适度越低, 取值范围为[0,1]; $T_{\text{sh},i,\text{de}}$ 和 $T_{\text{sh},i,\text{de},\max}$ 分别表示第 i 种可平移负荷的实际延长时间和最大延长时间; $\alpha_{\text{sh},i}$ 和 $\beta_{\text{sh},i}$ 分别表示第 i 种可平移负荷允许调度的起止时间; $T_{\text{sh},i}$ 表示第 i 种可平移负荷的运行时间总和; $y_{\text{sh},i}(t)$ 表示第 i 种可平移负荷在 t 时刻是否启动, 1 表示启动, 0 表示未启动。

2.3.3 可中断负荷舒适度模型

可中断负荷总用电时间不变, 中断时间的长短对用户的舒适度产生影响, 借鉴可平移负荷舒适度模型, 中断时间可认为是用户的延长使用时间, 可平移负荷的舒适度模型可表示为

$$U_{\text{tr},i} = \frac{T_{\text{tr},i,\text{de}}}{T_{\text{tr},i,\text{de},\max}} = \frac{\left(\sum_{t=\alpha_{\text{tr},i}}^{\beta_{\text{tr},i}} x_{\text{tr},i}(t)t - \sum_{t=\alpha_{\text{tr},i}}^{\alpha_{\text{tr},i}+T_{\text{tr},i}-1} t \right) / T_{\text{tr},i}}{\beta_{\text{tr},i} - \alpha_{\text{tr},i} + 1 - T_{\text{tr},i}} \quad (34)$$

式中: $U_{\text{tr},i}$ 表示第 i 种可中断负荷的舒适度, 其值越大代表用户的舒适度越低, 取值范围为[0,1]; $T_{\text{tr},i,\text{de}}$ 和 $T_{\text{tr},i,\text{de},\max}$ 分别表示第 i 种可中断负荷的实际延长时间和最大延长时间; $\alpha_{\text{tr},i}$ 和 $\beta_{\text{tr},i}$ 分别表示第 i 种可中断负荷允许调度的起止时间; $T_{\text{tr},i}$ 表示第 i 种可中断负荷的运行时间总和; $x_{\text{tr},i}(t)$ 表示第 i 种可中断负荷 t 时刻是否运行, 1 表示运行, 0 表示不运行。

2.3.4 可削减负荷舒适度模型

可削减负荷的舒适度主要受运行功率的影响, 低功率运行时间越长对用户的舒适度影响越大, 可削减负荷的舒适度模型可表示为

$$U_{\text{cut},k} = \frac{\sum_{t=\alpha_{\text{cut},k}}^{\beta_{\text{cut},k}} x_{\text{cut},\text{down}}(t)}{\beta_{\text{cut},k} - \alpha_{\text{cut},k}} \quad (35)$$

式中: $U_{\text{cut},k}$ 表示可削减负荷运行在第 k 档的舒适度, 其值越大代表用户的舒适度越低, 取值范围为[0,1]; $x_{\text{cut},\text{down}}(t)$ 表示可削减负荷 t 时刻是否低功率运行, 1 表示是, 0 表示否; $\alpha_{\text{cut},k}$ 和 $\beta_{\text{cut},k}$ 分别表示可削减负荷在第 k 档允许调度的起止时间。

2.4 基于调峰贡献度约束的激励模型

为了使智能小区用户在参与需求侧响应时更加贴合电网的期望, 本节从配电网运营商的角度对文献[16]建立的激励模型作进一步改进: 将调峰贡献度指标 $H_{\text{sf}}(P_{\text{total}}(t))$ 引入约束条件, 调峰贡献度指标是对皮尔逊相关系数的线性化改进, 用来反映智能小区用户对电网的调峰贡献度, 其合理性已在文献[16]给出证明, 本文不再赘述。如式(36)所示, 配电

网运营商和智能小区居民在日前签订激励合同, 配电网运营商根据自身需求与小区用户协商确定调峰贡献度指标约束值的大小, 次日根据居民实际响应情况对小区居民进行补偿, 如式(37)所示, 若居民符合合同约定参与响应, 次日获得相应补偿; 若不符合合同约定, 次日获得的补偿费用为0。

$$H_{sf}(P_{total}(t)) = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{total}(t) - \overline{P_{total}})(P_{sys}(t) - \overline{P_{sys}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (P_{sys}(t) - \overline{P_{sys}})^2}} \leq \mu, \mu < 0 \quad (36)$$

$$C_{mot} = \begin{cases} w_{mot} \frac{H_{sf}(P_{total}(t))}{H_{sf,base}}, & H_{sf}(P_{total}(t)) \leq \mu \\ 0, & H_{sf}(P_{total}(t)) > \mu \end{cases} \quad (37)$$

$$H_{sf,base} = \frac{H_{sf}(-P_{sys}(t))}{\max(-P_{sys}(t)) - \min(-P_{sys}(t))} \quad (38)$$

式中: $P_{total}(t)$ 和 $\overline{P_{total}}$ 分别表示用户 t 时刻的功率和用户一天内的平均用电功率; $P_{sys}(t)$ 和 $\overline{P_{sys}}$ 分别表示系统 t 时刻的用电功率和系统一天的平均用电功率; μ 为小区居民平均贡献度指标约束值; C_{mot} 为激励补偿费用; w_{mot} 为激励费率; $H_{sf,base}$ 为调峰贡献度归一化因子; $\max(-P_{sys}(t))$ 、 $\min(-P_{sys}(t))$ 分别为系统用电功率取负后的最大值和最小值。

2.5 目标函数

2.5.1 下层调度目标函数

下层调度的目标是使用户的总成本最低, 变量包括小区用户的舒适度、用电量以及调峰贡献度指标, 可分别表示为

$$\begin{cases} \min(\sum_{t=1}^T (C_{use}(t)\Delta t) + aU_{all} - C_{mot}) \\ C_{use}(t) = C_{price}(t)P_{all}(t) \\ P_{all}(t) = P_{gx}(t) + P_{bp}(t) + P_{dp}(t) + P_{sh}(t) + P_{tr}(t) + \\ P_{cut}(t) + P_{ESSC}(t) - P_{ESSD}(t) - P_{pv}(t) \\ U_{all} = \sum U_{wk,i} + U_{sh,i} + U_{tr,i} + U_{cut,i} \end{cases} \quad (39)$$

式中: $C_{use}(t)$ 表示 t 时刻居民用电成本; $C_{price}(t)$ 表示 t 时刻配电网运营商给出的电价; $P_{all}(t)$ 表示 t 时刻居民总购电功率; $P_{gx}(t)$ 、 $P_{pv}(t)$ 分别表示刚性负荷和光伏发电系统 t 时刻的功率; U_{all} 表示所有居民用电设备的调用舒适度总和; a 为舒适度影响因子, 其大小取决于用户自身对舒适度的需求, 其值越大表示用户对舒适度要求越高; Δt 为调度时间间隔。

2.5.2 上层调度目标函数

上层调度的目标是使配电网运营商的收益最大

化, 变量为配电网运营商发布的电价, 其目标函数以及电价约束条件如式(40)所示。

$$\begin{cases} \max(\sum_{t=1}^T (C_{price}(t)P_{all}(t)\Delta t) - bP_{all}(t) - C_{mot}) \\ C_{price,min} \leq C_{price}(t) \leq C_{price,max} \end{cases} \quad (40)$$

式中: $bP_{all}(t)$ 为机组的运行维护费用, b 为机组单位功率的运行维护费用; $C_{price,max}$ 和 $C_{price,min}$ 分别为配电网运营商售电电价的上下限。

3 智能小区温控负荷调度控制策略模型

温控负荷运行功率较大, 调度时间较其他家庭负荷更为灵活。对定频空调而言, 通过改变设定温度来改变空调运行的开断周期, 从而改变周期内空调平均运行功率的大小; 对变频空调而言, 改变设定温度可以直接改变空调运行功率。基于以上两种空调的特性, 当多个智能小区的空调同时参与调度时, 改变其设定温度的大小势必会造成功率的大幅度波动^[21]。考虑到电热水器的运行功率主要受用户用水行为的影响, 其参与调度主要是通过用户改变自身的用水时间段来完成。因此本节主要针对空调, 假设配电网运营商在智能小区用户端装有终端控制装置, 以改善空调参与调度时的功率跌落为例, 研究两种空调参与调度的控制策略。

3.1 定频空调调度控制策略

为了更好地控制大量分散的智能小区空调负荷, 配电网运营商首先需要将大量空调负荷进行聚合, 聚合模型以及聚合方法参考文献[20]。

定频空调采取的控制策略为设定降负荷准备时间的精准控制策略。该控制策略主要由3部分组成, 包括分组策略、降负荷策略和功率跌落控制策略。

1) 分组策略

分组策略是将聚合的定频空调根据其参数进行分类, 将参数相近的空调归为同一类, 这样可以提高空调聚合小组的聚合精度。本文采用 K-means 聚类法, 该方法具有算法快速、简单, 对大数据集有较高的效率及可伸缩性等优点, 契合空调聚类要求。

本文的聚类依据为对空调运行影响较大的温变参数 RC 和特征温差 QR 。根据 K-means 聚类法的特点, 当聚类分组数量 K 较小时聚类精度就会较低, K 较大时计算复杂程度就会较大, 并且聚类时间较长, 因此, 本文选择空调负荷聚类小组数为 30 组。

2) 降负荷策略

降负荷策略采用变状态的状态队列模型, 其原理为: 定频空调调整设定温度前后的运行周期分别

为 T_0 、 T_1 ，单位为 min，每一个运行周期的开关状态对应一个温度状态，调温前后的温度状态数分别为 L_0 、 L_1 ，且 $L_0 = T_0$ 、 $L_1 = T_1$ 。当聚合小组内的变频空调运行趋于稳定时，可认为聚合小组内的空调负荷均匀分布在 T_0 个温度状态中，此时的状态组数 $M = T_0$ ，调温后状态组数 M 仍然为 T_0 个，运行在 $T_1 (T_1 > T_0)$ 个温度状态中。文献[21]设定调温前 $T_0 = 15$ ，其中开通周期为 6，关断周期为 9；调温后 $T_1 = 20$ ，其中开通周期为 6，关断周期为 14。调温前后变频空调运行占空比分别为 40% 和 30%，可以看出变频空调调温后开通周期变短，变频空调在一个周期内的平均运行功率也随之变低，从而起到降低负荷的作用。假设空调在第 6 min 对设定温度进行调整，其运行状态如附录 A 表 A1 所示。

3) 功率跌落控制策略

功率跌落控制策略分为两阶段：第一阶段为准备时间段，这段时间将原本短时间内调整变频设定温度导致的功率大幅度跌落分散到这段时间内，起到缓冲的作用，这段时间内的控制目标是减小功率跌落的最大值 F_1 ，如式(41)所示；第二阶段为控制时间段，这段时间变频空调已经完成了设定温度的调整，稳定运行在新的设定温度下，这段时间的控制目标是减小变频空调的聚合功率在目标功率上下的波动，如式(41)的 F_2 所示。总目标是使功率跌落最大值和功率波动值之和最小，控制变量为各变频空调小组的设定温度。

$$\begin{cases} \min(F_1 + F_2) \\ F_1 = \max\left(\sum_{t=1}^{t_{s,dp}} \left(\sum_{l=1}^J P_{dp,l}(t) - P_{dp,set}(t)\right)\right), 0 < t \leq t_{s,dp} \\ F_2 = \text{abs}\left(\sum_{t=t_{s,dp}}^{t_{e,dp}} \left(\sum_{l=1}^J P_{dp,l}(t) - P_{dp,set}(t)\right)\right), t_{s,dp} < t \leq t_{e,dp} \\ P_{dp,l}(t) = \begin{cases} r_l^0 P_{dp,l}^{\text{all}}, 0 < t \leq t_{s,dp} \\ r_l^t P_{dp,l}^{\text{all}}, t_{s,dp} < t \leq t_{e,dp} \end{cases} \end{cases} \quad (41)$$

式中： $t_{s,dp}$ 、 $t_{e,dp}$ 分别为变频空调控制的起始时间和结束时间； J 为聚类小组数，本文取 30 组； $\text{abs}(\cdot)$ 表示取绝对值； $P_{dp,set}(t)$ 为空调聚合的目标功率； $P_{dp,l}(t)$ 为变频空调实际聚合功率； r_l^0 、 r_l^t 分别为调节设定温度前后的变频空调运行占空比； $P_{dp,l}^{\text{all}}$ 为第 l 个聚合小组内变频空调运行的功率和。

3.2 变频空调调度控制策略

变频空调的聚合模型参考文献[22-23]，变频空调调节其设定温度会使其从稳态过渡到动态，考虑

到变频空调动态过程较短并且功率跌落值较小，如附录 A 图 A1 所示，因此可直接控制设定温度的变化，使得功率跌落值进一步减小。变频空调控制策略主要由两部分组成，如下所述。

1) 分组控制策略

分组控制策略与变频空调相似，采用 K-means 对变频空调进行聚类，根据其稳态特征参数 A/η_{bp} 和动态特征参数 RC 这两个特征参数将变频空调分为不同的小组，聚类小组数与变频空调分组数相同，均为 30 组。

2) 温度控制策略

温度控制策略主要分为两阶段：第一阶段为过渡期(动态)的功率跌落控制，如式(42)中 F_3 所示，这一阶段的目标是为了减小功率跌落值；第二部分为稳态时的目标功率跟随控制，如式(42)中 F_4 所示，以减小功率波动为目标。总的目标是使动态功率跌落最大值和稳态功率波动值之和最小，控制变量为各变频空调小组的设定温度。

$$\begin{cases} \min(F_3 + F_4) \\ F_3 = \max\left(\sum_{t=t_{s,bp}}^{t_p} \left(\sum_{l=1}^J P_{bp,set}(t) - P_{bp,l}(t)\right)\right), t_{s,bp} < t \leq t_p \\ F_4 = \text{abs}\left(\sum_{t=t_p}^{t_{e,bp}} \left(\sum_{l=1}^J P_{bp,l}(t) - P_{bp,set}(t)\right)\right), t_p < t \leq t_{e,bp} \\ P_{bp,l}(t) = (k+1)P_{bp,l,0}, t_{s,bp} < t \leq t_p \\ P_{bp,l}(t) = (\theta_{\text{out}}(t) - \theta_{bp,set}(t))A/\eta_{bp}, t_p < t \leq t_{e,bp} \end{cases} \quad (42)$$

式中： $t_{s,bp}$ 、 $t_{e,bp}$ 分别为变频空调控制的起始时间和结束时间； t_p 为过渡期的结束时间； $P_{bp,set}(t)$ 为变频空调聚合的目标功率； $P_{bp,l}(t)$ 为变频空调实际聚合功率； $P_{bp,l,0}$ 为第 l 个聚合小组内的变频空调初始运行功率。

以上两种空调控制策略的目标函数皆可采用粒子群算法求解。

4 仿真分析

4.1 仿真参数设定

本文调度模型考虑智能小区居民工作日早出晚归的生活作息，选取当日 14:00—次日 14:00 为一个调度周期，将该时间段内的 24 h 分为 $T = 48$ 段，时间尺度为 0.5 h。假设该智能小区共有 1000 户，居民小区光伏系统出力、储能系统数据、温控负荷参数、其他柔性负荷参数、刚性负荷用电数据以及室外温度及用户用水情况见附录 C。在 Matlab2018b

平台下通过调用 Yalmip/CPELX 工具箱对算例进行求解。本文的控制策略模型假设共有 10 个智能小区同时参与调度, 定频空调和变频空调参与调度的数量均为 10 000 台, 空调参数与调度模型中的参数一致。

4.2 智能小区调度前后居民用电分析

智能小区调度前居民用电情况如图 3 所示, 调度前居民用电高峰集中在当日 18: 30—20: 30。如表 1 所示, 这段时间内的最大用电负荷达到了 4622 kW, 与次日 14: 00 前的最低用电负荷相差 4523.61 kW, 日负荷率为 20.78%。由此看来, 调度前智能小区用户在工作日用电整体呈现峰谷差较大的特点。

为了验证本文第 2 节调度模型的调峰效果, 本节设置舒适度影响因子 $a=100$, 小区居民平均贡献度指标约束值 μ 为 -3.5 , 本文 4.4 节将作具体说明。其调峰效果如图 3 和表 1 所示, 调度后当日 18: 30—20: 30 的最大用电负荷仅 2622 kW, 比调度前降低了 2000 kW, 并且当日 14: 00—次日 14: 00 的最大峰谷差为 3699.61 kW, 比调度前降低了 18.22%, 日负荷率也提高到 28.63%。

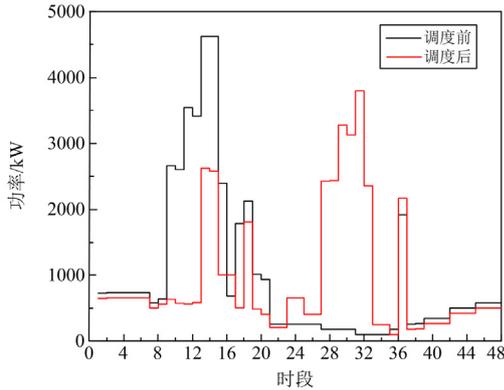


图 3 智能小区调度前后用电负荷图

Fig. 3 Power load before and after intelligent community dispatching

表 1 智能小区调度前后用电特性

Table 1 Power consumption characteristics before and after intelligent community dispatching

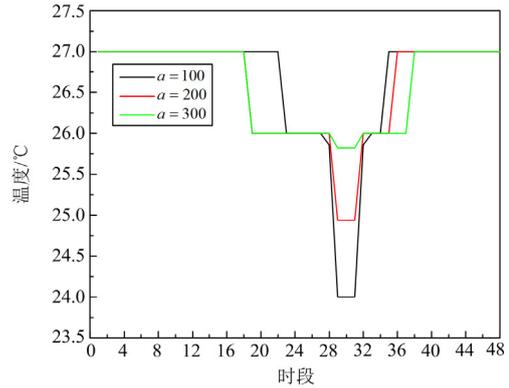
调度情况	日最大负荷/kW	日最大峰谷差/kW	日负荷率/%
调度前	4622	4523.61	20.78
调度后	3798	3699.61	28.63

4.3 用户舒适度对调度模型影响分析

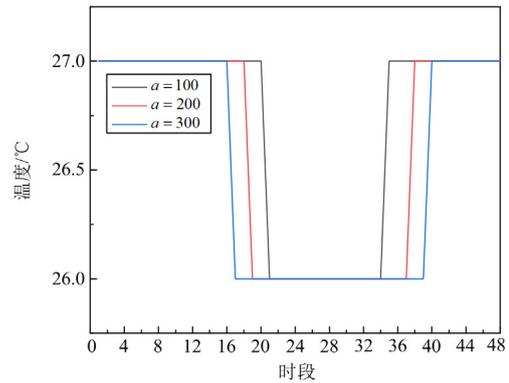
用户舒适度要求的变化对调度模型的影响主要体现在两方面: 1) 用户舒适度的变化对负荷运行状态的影响; 2) 用户舒适度的变化对用户以及配电网运营商成本的影响。分别在 $a=100$ 、 $a=300$ 、

$a=500$ 这 3 种场景下对以上两方面进行分析, 取值依据见附录 C 表 C4。

用户舒适度影响因子对负荷的影响如图 4 所示。以空调为例, 当用户舒适度影响因子越大, 即用户对舒适度的要求越高, 两种空调接受调控的温度范围就越小, 且受调度的时间段也越短。如表 2 所示, 用户对舒适度要求越高, 也就意味着用户接受调度的意愿越低, 因此用户的总成本也随之变高, 配电网运营商的收益也会随之增大。



(a) 变频空调温度变化图



(b) 定频空调温度变化图

图 4 空调温度变化图

Fig. 4 Temperature variation diagram of air conditioning

表 2 不同场景下各方成本及收益

Table 2 Costs and benefits of various parties in different scenarios

场景	场景 1	场景 2	场景 3
配电网运营商收益	4268.29	4286.91	4356.38
用户总成本	7872.03	8514.00	9016.59

元

4.4 调峰贡献度指标约束对调度模型影响分析

为了比较不同调峰贡献度指标约束值对调度模型的影响, 本节同样选取 3 种场景进行分析: 场景 1 不对调峰贡献度指标进行约束, 即文献[16]采取的方法; 场景 2 取调峰贡献度指标约束值 $\mu = -3.5$;

场景 3 取调峰贡献度指标约束值 $\mu = -4$ 。

运行结果如图 5 和表 3 所示，当未对调峰贡献度指标进行约束时，调峰贡献度指标为-2.81，智能小区的日最大负荷为 4148 kW，虽然比调度前的日最大负荷小，但是对电网的调峰贡献度较场景 2 相对较小；场景 3 虽然比场景 2 的峰谷差小，但仅相差 33.41 kW，并且场景 3 的日最大负荷以及补偿费用比场景 2 大，因此本文选择场景 2 的约束值。

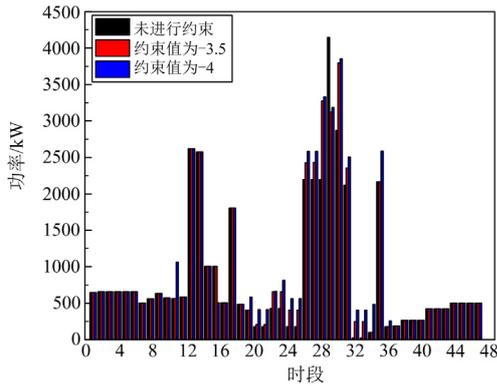


图 5 不同场景下的用电负荷图

Fig. 5 Power load in different scenarios

表 3 不同场景下的负荷特性和补偿价格

Table 3 Load characteristics and compensation prices in different scenarios

场景	场景 1	场景 2	场景 3
日最大负荷/kW	4148	3798	3855
日最大峰谷差/kW	4128	3699.61	3666.20
补偿价格/元	232.89	284.93	325.63

4.5 双层调度模型经济性分析

本节配电网运营商的电价调整范围为 0.9~1.1 倍的初始电价，总平均电价不高于初始电价的平均电价。初始电价如图 6 所示，单层调度仅考虑用户的总成本，不考虑配电网运营商的收益，在整个调度过程中电价不发生改变。而双层调度以配电网运营商的收益为上层，调整电价使自身收益最大化，其电价变化如图 7 所示。两种调度模型的各方收益如表 4 所示，本文建立的双层调度模型在用户成本略微升高的基础上，配电网运营商的收益比单层调度模型的收益提高了 633.95 元，经济优势显著。

4.6 空调控制策略模型分析

本节算例设定空调准备时间为 30 min，多个智能小区的定频空调和变频空调的受调控时间为当日 17:00，室外温度为 35℃。调控结果如图 8 所示，本文提出的控制策略将功率跌落最低值提升到

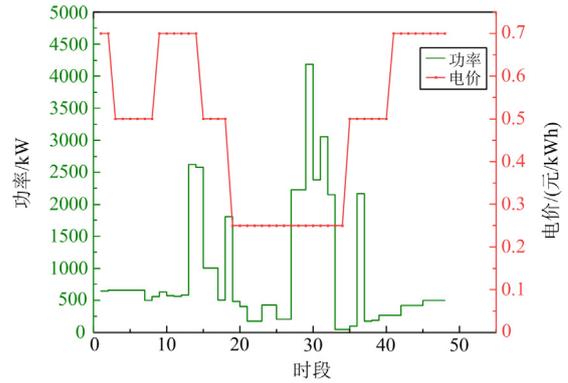


图 6 单层调度功率、电价图

Fig. 6 Single layer dispatch power and electricity price

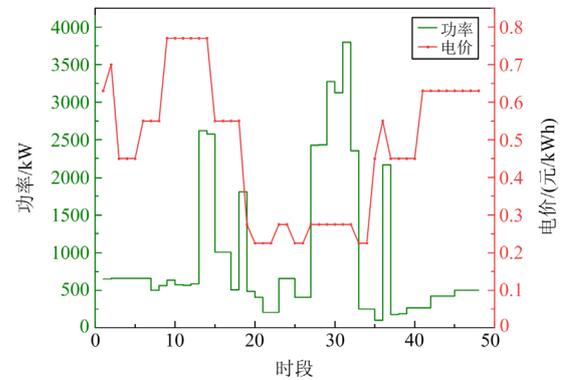


图 7 双层调度功率、电价图

Fig. 7 Double layer dispatch power and electricity price

表 4 不同场景下的用电成本和用电收益

Table 4 Power consumption costs and benefits under different scenarios

调度计划	居民用电成本	配电网运营商收益
单层调度	7845.92	3634.34
双层调度	7872.03	4268.29

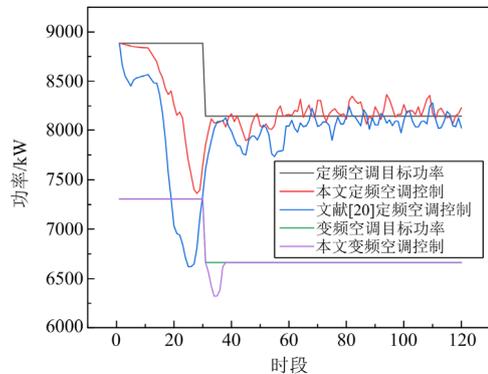


图 8 空调功率控制图

Fig. 8 Air conditioning power control diagram

7363.34 kW, 而文献[20]提出的控制策略功率跌落至 6617.99 kW, 因此本文所提的控制策略在功率跌落改善方面效果更加显著, 并且控制结束后的功率波动也较小。对变频空调而言, 本文提出的直接控制设定温度变化的方法使功率跌落值仅为 341.27 kW, 比定频空调更加稳定。

5 结论

本文针对智能小区参与需求侧响应建立了双层调度模型, 从算例分析结果来看, 该调度模型使配电网运营商收益增加 17.44%的同时居民总成本仅增加了 0.33%, 兼顾了双方的利益。在调度模型中还采用了调峰贡献度指标约束, 采用这种约束能够使用户参与需求侧响应符合配电网运营商的期望, 避免造成响应量较少或者过度响应的局面, 调峰贡

献度指标具体取值由配电网运营商根据自身的需求与智能小区居民商讨决定, 较为灵活。

本文还针对多个智能小区同时参与调度时空调负荷集中调控导致功率跌落的现象分别对定频空调和变频空调提出了两种控制策略: 定频空调的控制策略采用设定降负荷准备时间的精准控制策略, 在原有的技术上对目标函数作出改进, 使得功率跌落最低值提升了 10.12%,; 而变频空调采用直接控制设定温度策略, 功率仅跌落了 5.10%。两种控制策略都有不错的控制效果。

本文的调度模型只考虑智能小区用户工作日的用电情况, 没有考虑用户在周末以及节假日的用电情况, 因此, 今后的工作重点为建立用户在不同时间条件下的调度模型, 并制定相应的控制策略。

附录 A

定频空调调温前后空调状态变化如表 A1 所示。

表 A1 定频空调运行状态

Table A1 Operation status of fixed frequency air conditioning

时间/min	组别-状态															开启总数
1	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-6	7-7	8-8	9-9	10-10	11-11	12-12	13-13	14-14	15-15	6
2	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-1	6
3	1-3	2-4	3-5	4-6	5-7	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12	11-13	12-14	13-15	14-1	15-2	6
4	1-4	2-5	3-6	4-7	5-8	6-9	7-10	8-11	9-12	10-13	11-14	12-15	13-1	14-2	15-3	6
5	1-5	2-6	3-7	4-8	5-9	6-10	7-11	8-12	9-13	10-14	11-15	12-1	13-2	14-3	15-4	6
调温	1-6	2-7	3-8	4-9	5-10	6-11	7-12	8-13	9-14	10-15	11-1	12-2	13-3	14-4	15-5	5
7	1-7	2-8	3-9	4-10	5-11	6-12	7-13	8-14	9-15	10-1	11-2	12-3	13-4	14-5	15-6	4
8	1-8	2-9	3-10	4-11	5-12	6-13	7-14	8-15	9-1	10-2	11-3	12-4	13-5	14-6	15-7	3
9	1-9	2-10	3-11	4-12	5-13	6-14	7-15	8-1	9-2	10-3	11-4	12-5	13-6	14-7	15-8	2
10	1-10	2-11	3-12	4-13	5-14	6-15	7-1	8-2	9-3	10-4	11-5	12-6	13-7	14-8	15-9	1
11	1-11	2-12	3-13	4-14	5-15	6-1	7-2	8-3	9-4	10-5	11-6	12-7	13-8	14-9	15-10	1
12	1-12	2-13	3-14	4-15	5-16	6-2	7-3	8-4	9-5	10-6	11-7	12-8	13-9	14-10	15-11	2
13	1-13	2-14	3-15	4-16	5-17	6-3	7-4	8-5	9-6	10-7	11-8	12-9	13-10	14-11	15-12	3
14	1-14	2-15	3-16	4-17	5-18	6-4	7-5	8-6	9-7	10-8	11-9	12-10	13-11	14-12	15-13	4
15	1-15	2-16	3-17	4-18	5-19	6-5	7-6	8-7	9-8	10-9	11-10	12-11	13-12	14-13	15-14	5
16	1-16	2-17	3-18	4-19	5-20	6-6	7-7	8-8	9-9	10-10	11-11	12-12	13-13	14-14	15-15	6
17	1-17	2-18	3-19	4-20	5-1	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	6
18	1-18	2-19	3-20	4-1	5-2	6-8	7-9	8-10	9-11	10-12	11-13	12-14	13-15	14-16	15-17	6
19	1-19	2-20	3-1	4-2	5-3	6-9	7-10	8-11	9-12	10-13	11-14	12-15	13-16	14-17	15-18	6
20	1-20	2-1	3-2	4-3	5-4	6-10	7-11	8-12	9-13	10-14	11-15	12-16	13-17	14-18	15-19	6
21	1-1	2-2	3-3	4-4	5-5	6-11	7-12	8-13	9-14	10-15	11-16	12-17	13-18	14-19	15-20	6
22	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-12	7-13	8-14	9-15	10-16	11-17	12-18	13-19	14-20	15-1	6
23	1-3	2-4	3-5	4-6	5-7	6-13	7-14	8-15	9-16	10-17	11-18	12-19	13-20	14-1	15-2	6
24	1-4	2-5	3-6	4-7	5-8	6-14	7-15	8-16	9-17	10-18	11-19	12-20	13-1	14-2	15-3	6
25	1-5	2-6	3-7	4-8	5-9	6-15	7-16	8-17	9-18	10-19	11-20	12-1	13-2	14-3	15-4	6
26	1-6	2-7	3-8	4-9	5-10	6-16	7-17	8-18	9-19	10-20	11-1	12-2	13-3	14-4	15-5	5
27	1-7	2-8	3-9	4-10	5-11	6-17	7-18	8-19	9-20	10-1	11-2	12-3	13-4	14-5	15-6	4
28	1-8	2-9	3-10	4-11	5-12	6-18	7-19	8-20	9-1	10-2	11-3	12-4	13-5	14-6	15-7	3
29	1-9	2-10	3-11	4-12	5-13	6-19	7-20	8-1	9-2	10-3	11-4	12-5	13-6	14-7	15-8	2
30	1-10	2-11	3-12	4-13	5-14	6-20	7-1	8-2	9-3	10-4	11-5	12-6	13-7	14-8	15-9	1

变频空调室内温度与空调功率的变化如图 A1 所示。

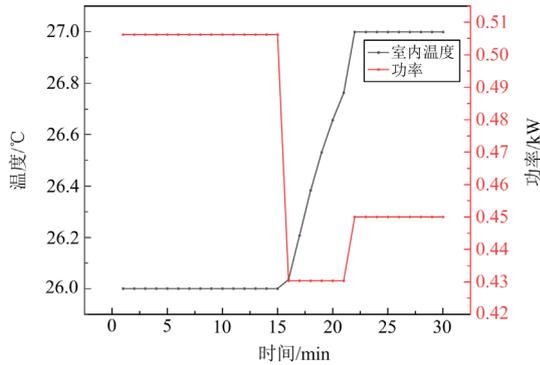


图 A1 变频空调温度功率变化图

Fig. A1 Temperature and power variation diagram of variable frequency air conditioning

附录 B

定频空调平均功率比例因子 α 不同取值时近似功率的误差对比图, 如图 B1 所示。

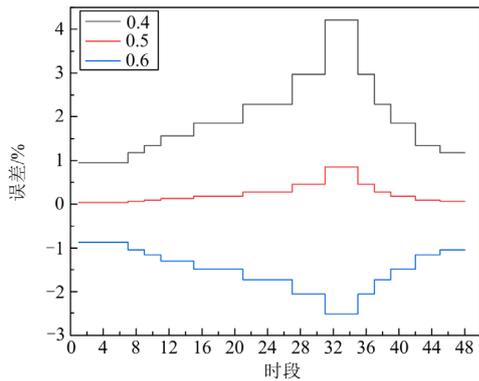


图 B1 不同比例因子功率误差对比图

Fig. B1 Comparison chart of power error for different values of scale factor

附录 C

智能小区储能系统相关参数如表 C1 所示。

表 C1 智能小区储能系统参数

Table C1 Intelligent community energy storage system parameters

参数	值
总额定容量/kWh	270
最大充放电次数	16
充放电效率	0.95
SOC 上限/下限	0.9/0.1

智能小区温控负荷相关参数如表 C2 所示。智能小区其他柔性负荷参数如表 C3 所示。智能小区光伏系统出力预测如图 C1 所示。

表 C2 温控负荷参数

Table C2 Temperature control load parameters

参数	定频空调	变频空调	电热水器
最大功率/kW	2	2	2.5
等效热容/(kWh/°C)	0.18	0.18	0.08
等效热阻/(°C/kW)	6	5.56	332
能效比	2.9	2.9	0.95
温度调整范围/°C	[25,27]	[25,27]	[45,55]
初始温度/°C	26	26	50
调度时间	全天	全天	19:00—24:00
居民拥有率/%	50	80	90
导热系数	—	0.18	—

表 C3 其他柔性负荷相关参数

Table C3 Related parameters of other flexible load

设备	最大功率/kW	调度时间	居民拥有率/%
洗衣机	0.5	19:00—22:00	100
热水壶	1.5	21:00—07:00	90
洗碗机	0.5	20:00—02:00	50
消毒柜	0.3	19:00—07:00	50
烘干机	1.5	22:00—07:00	40
电动汽车	3	18:00—06:00	70
电脑	0.3/0.15	19:00—24:00	100

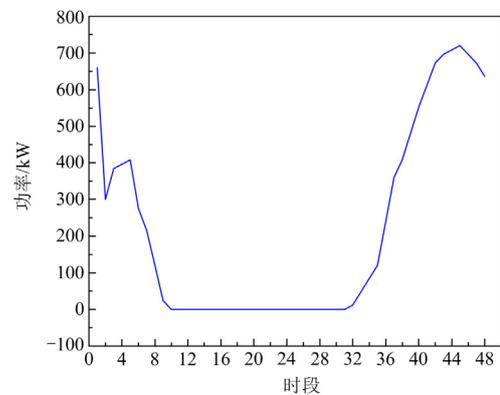


图 C1 智能小区光伏系统出力图

Fig. C1 Output diagram of photovoltaic system in intelligent community

智能小区刚性负荷用电情况如图 C2 所示。

智能小区单用户的平均用水量以及室外温度如图 C3 所示。

舒适度影响因子 a 的不同取值对用户舒适度以及用户成本的影响, 如表 C4 所示。

当 a 的取值为 10~30 时, 此时用户的成本变化率较低且增长较慢, 因此, 在这个范围内改变 a 的值对用户的成本影响较小; 而当 a 取值为 100~500 时, 用户的成本变化率增长较快, 在这个范围内改

变 a 的值对用户成本影响较大, 因此本文选取的值为 100、300、500; 当 a 取值为 1000~2000 时, 用户成本变化率达到 35.18%, 且舒适度占总成本的占比也较大, 所以 a 的取值不宜在这个范围内选取。

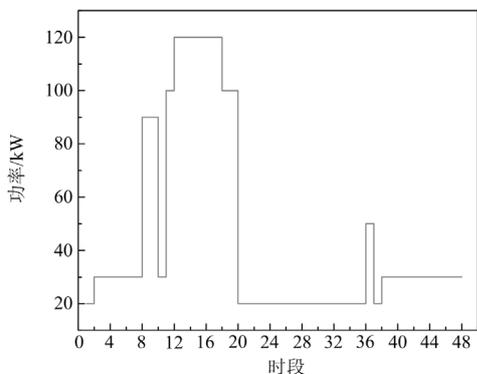


图 C2 智能小区刚性负荷用电

Fig. C2 Rigid load electricity consumption in intelligent community

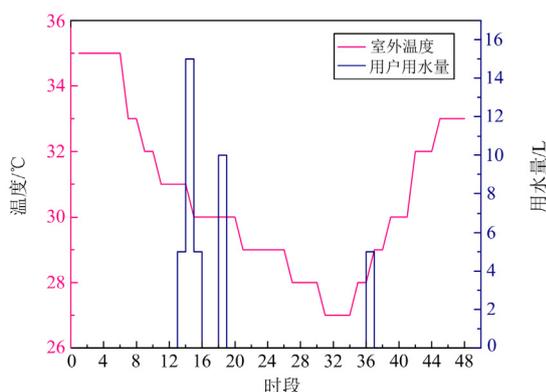


图 C3 智能小区用户平均用水量和室外温度图

Fig. C3 Intelligent community user average water consumption and outdoor temperature

表 C4 用户舒适度因子取值依据

Table C4 Value basis of user comfort factor

舒适度影响因子	用户舒适度	用户总成本/元	成本变化率/%
$a = 10$	$U_{all} = 4.3680$	7538.0754	—
$a = 20$	$U_{all} = 4.1355$	7579.7288	0.55
$a = 30$	$U_{all} = 4.1287$	7619.0651	1.07
$a = 100$	$U_{all} = 3.4647$	7872.0334	—
$a = 300$	$U_{all} = 3.1919$	8514.0059	8.16
$a = 500$	$U_{all} = 2.9158$	9016.5971	14.54
$a = 1000$	$U_{all} = 2.2648$	9828.2234	—
$a = 2000$	$U_{all} = 1.9862$	13 285.3575	35.18

参考文献

[1] 时下. 2022 年全社会用电量增速将总体呈逐季上升态势[J]. 电力系统装备, 2022(3): 6-7.

SHI Xia. The overall growth rate of electricity consumption in society in 2022 will show a quarterly increase trend[J]. Power System Equipment, 2022(3): 6-7.

[2] 王智伟, 张振宇, 李征, 等. 提升高渗透率新能源电网承载能力的 DSSC 优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 179-187.

WANG Zhiwei, ZHANG Zhenyu, LI Zheng, et al. Optimized DSSC configuration to enhance load-carrying capacity of the new energy grid with high permeability[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 179-187.

[3] 陈倩, 王维庆, 王海云. 基于需求侧响应的主动配电网双层优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 1-13.

CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Bi-level optimization model of an active distribution network based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 1-13.

[4] 朱斌, 汪一帆, 孙钢. 基于博弈论的智能电网与需求侧交互管理策略[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 129-136.

ZHU Bin, WANG Yifan, SUN Gang. Game theory based interactive management strategy between smart grid and demand side[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 129-136.

[5] CALLAWAY D S, HISKENS I A. Achieving controllability of electric loads[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 99(1): 184-199.

[6] 李斌, 顾国栋. 江苏电力负荷管理的创新及实践[J]. 电力需求侧管理, 2015, 17(5): 1-4, 10.

LI Bin, GU Guodong. Innovation and practice of Jiangsu's power demand side[J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(5): 1-4, 10.

[7] 章博, 刘晟源, 林振智, 等. 高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 86-94.

ZHANG Bo, LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Distribution network reconfiguration with high penetration of renewable energy considering demand response and soft open point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 86-94.

[8] 朱伟业, 罗毅, 胡博, 等. 考虑采暖建筑用户热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同的电热联合系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 124-135.

ZHU Weiye, LUO Yi, HU Bo, et al. Optimized combined heat and power dispatch considering the coordination of heat load elasticity and time-of-use demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 124-135.

[9] 杨秀, 胡晓龙, 孙改平, 等. 考虑电能共享的楼宇虚拟电厂协调优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1): 96-105.

YANG Xiu, HU Xiaolong, SUN Gaiping, et al. Coordinated optimization scheduling of building virtual power plant considering power sharing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 96-105.

- [10] SHAFIE-KHAH M, JAVADI S, SIANO P, et al. Optimal behavior of smart households facing with both price-based and incentive-based demand response programs[C] // 2017 IEEE Manchester PowerTech, June 18-22, 2017, Manchester, UK: 1-6.
- [11] 吴界辰, 艾欣, 张艳, 等. 配售分离环境下高比例分布式能源园区电能日前优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1709-1719.
WU Jiechen, AI Xin, ZHANG Yan, et al. Day-ahead optimal scheduling for high penetration of distributed energy resources in community under separated distribution and retail operational environment[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1709-1719.
- [12] 王怡岚, 童亦斌, 黄梅, 等. 基于需求侧响应的空调负荷虚拟储能模型研究[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 394-401.
WANG Yilan, TONG Yibin, HUANG Mei, et al. Research on virtual energy storage model of air conditioning loads based on demand response[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 394-401.
- [13] 齐晓琳, 艾欣, 唐亮, 等. 商业大楼中的电动汽车与温控负荷联合优化调度[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(4): 51-58.
QI Xiaolin, AI Xin, TANG Liang, et al. Joint optimal dispatch of electric vehicles and thermostatically-controlled loads in commercial buildings[J]. New Technologies in Electrical Energy, 2017, 36(4): 51-58.
- [14] 武媚, 包宇庆, 张金龙, 等. 计及用户舒适度的电热水器多目标优化控制策略[J]. 电力工程技术, 2019, 38(3): 100-107.
WU Mei, BAO Yuqing, ZHANG Jinlong, et al. Optimized control strategy of the electric water heater considering user comfort[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(3): 100-107.
- [15] 周晓. 需求响应在大型智能商业楼宇能量管理中的应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
ZHOU Xiao. Research on the application of demand response in energy management of large intelligent commercial buildings[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [16] 涂京, 周明, 宋旭帆, 等. 居民用户参与电网调峰激励机制及优化用电策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 443-453.
TU Jing, ZHOU Ming, SONG Xufan, et al. Research on incentive mechanism and optimal power consumption strategy for residential users' participation in peak shaving of power grid[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 443-453.
- [17] 赵冬梅, 宋原, 王云龙, 等. 考虑柔性负荷响应不确定性的多时间尺度协调调度模型[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(22): 21-30.
ZHAO Dongmei, SONG Yuan, WANG Yunlong, et al. Coordinated scheduling model with multiple time scales considering response uncertainty of flexible load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(22): 21-30.
- [18] 陈中, 李云倩, 冷钊莹, 等. 典型家用大功率负载精细化建模及能量管理策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 135-143.
CHEN Zhong, LI Yunqian, LENG Zhaoying, et al. Coordinated control strategy of multi-DC emergency power support to improve frequency stability of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 135-143.
- [19] 周磊, 李扬, 高赐威. 聚合空调负荷的温度调节方法改进及控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5579-5589.
ZHOU Lei, LI Yang, GAO Ciwei. Improvement of temperature adjusting method for aggregated air-conditioning loads and its control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5579-5589.
- [20] 杨秀, 傅广努, 刘方, 等. 考虑多重因素的空调负荷聚合响应潜力评估及控制策略研究[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 699-714.
YANG Xiu, FU Guangnu, LIU Fang, et al. Potential evaluation and control strategy of air conditioning load aggregation response considering multiple factors[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 699-714.
- [21] 姜婷玉, 鞠平, 王冲. 考虑用户调节行为随机性的空调负荷聚合功率模型[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(3): 105-113.
JIANG Tingyu, JU Ping, WANG Chong. Aggregated power model of air-conditioning load considering stochastic adjustment behaviors of consumers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3): 105-113.
- [22] 傅广努. 空调负荷聚合响应潜力及控制策略研究[D]. 上海: 上海电力大学, 2022.
FU Guangnu. Study on the response potential and control strategy of air conditioning load aggregation[D]. Shanghai: Shanghai Electric Power University, 2022.
- [23] 陈健, 张维桐, 张逸成, 等. 考虑不同空调负荷特性的微网双层优化调度[J]. 电网技术, 2018, 42(5): 1424-1431.
CHEN Jian, ZHANG Weitong, ZHANG Yicheng, et al. Bi-level optimal dispatch of microgrid considering different air-conditioning load characteristics[J]. Power System Technology, 2018, 42(5): 1424-1431.

收稿日期: 2023-04-25; 修回日期: 2023-06-21

作者简介:

杨秀(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为分布式发电与微电网的运行与仿真; E-mail: yangxiu721102@126.com

卢炜(1998—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力需求侧响应。E-mail: 1468243607@qq.com

(编辑 许威)