



基于非侵入式负荷监测的家庭智慧用能管理研究

丁迅 张忠 夏兆俊 范洋洋 张颖 孔亮

Research on the Home Intelligent Energy Management System Based on Noninvasive Load Monitoring

DING Xun, ZHANG Zhong, XIA Zhaojun, FAN Yangyang, ZHANG Ying, KONG Liang

引用本文:

丁迅, 张忠, 夏兆俊, 等. 基于非侵入式负荷监测的家庭智慧用能管理研究[J]. 现代电力, 2022, 39(4): 496–504. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0140

DING Xun, ZHANG Zhong, XIA Zhaojun, et al. Research on the Home Intelligent Energy Management System Based on Noninvasive Load Monitoring[J]. *Modern Electric Power*, 2022, 39(4): 496–504. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0140

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0140>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于自适应混沌粒子群算法的冷-热-电联供系统调度策略

An Adaptive Chaotic Particle Swarm Optimization Based Scheduling Strategy for Combined Cooling, Heating and Power System
现代电力. 2020, 37(6): 551–558 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.1070>

考虑储能的地区电网有功和电压联合控制策略研究

Joint Control Strategy Study of Active Power and Voltage in Regional Power Network Considering Energy Storage
现代电力. 2018, 35(6): 1–8 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I6/1>

电力市场背景下基于主从博弈的新能源消纳模型

New energy consumption model based on stackelberg game under the background of electricity market
现代电力. 2020, 37(3): 270–276 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0572>

计及灵活性的配电网储能优化配置

Optimal allocation of energy storage systems considering flexibility in distribution network
现代电力. 2020, 37(4): 341–350 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0087>

一种基于模糊控制的智能家庭能量管理系统

Smart Home Energy Management System Based on Fuzzy Control
现代电力. 2018, 35(6): 39–46 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2018/I6/39>

太阳能光伏-光热联合发电的优化运行模型

Optimal Coordinated Operation Model Considering Photovoltaic Power and Concentrating Solar Power
现代电力. 2020, 37(2): 163–170 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.1003>

基于非侵入式负荷监测的家庭智慧用能管理研究

丁迅, 张忠, 夏兆俊, 范洋洋, 张颖, 孔亮
(国网安徽省电力有限公司马鞍山供电公司, 安徽省 马鞍山市 243000)

Research on the Home Intelligent Energy Management System Based on Noninvasive Load Monitoring

DING Xun, ZHANG Zhong, XIA Zhaojun, FAN Yangyang, ZHANG Ying, KONG Liang
(Ma'anshan Power Supply Company of State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Maanshan 243000, Anhui Province, China)

摘要: 随着多能源网络的融合和能源互联网技术的快速发展, 家庭用能管理在解决各个能源网络节点供需问题上扮演着重要的角色。现有的大多数家庭用能管理针对已知用电负荷进行优化, 未考虑用电设备类型的多样化和用电设备突增的情形。基于非侵入式负荷监测 (Noninvasive Load Monitoring, NILM) 算法可以有效获取家庭用电负荷、规律和用电信息, 为家庭智慧用能管理提供数据支撑。文中以家庭用电成本、温度、时间、舒适度为目标函数建立家庭智慧用能多目标优化模型, 对可控负荷、电动汽车、储能系统进行分析建立数学模型, 利用粒子群算法对模型进行求解。仿真结果表明, 基于 NILM 监测算法, 考虑用电成本和舒适度家庭用电成本降低至 72.5%; 当用户可控用电负荷增加时, NILM 算法可以实时更新控制策略降低用户用电成本; 对不同用户进行多次计算, 净成本和计算时间波动较小, 证明了算法的合理性、可靠性。

关键词: 智慧用能管理; 非侵入式负荷监测; 多目标优化; 粒子群算法

Abstract: With the integration of multi-energy networks and the rapid development of energy Internet technology, household energy management plays an important role in solving the problem of supply and demand of each energy network node. Most of the existing household energy consumption management is optimized for the known power load, while the diversification of the types of electrical equipments and the sudden increase of electrical equipments are not considered. On the basis of the noninvasive load monitoring (abbr. NILM) algorithm, the household load electricity consumption law and information that provide data support for household smart energy management can be effectively obtained. A multi-objective optimization model of smart home energy consumption, in which the household electricity cost, temperature, time and comfort level were taken as objective functions, was established, and the controllable load, EV and energy storage system were analyzed and

corresponding mathematical models were proposed and solved by particle swarm algorithm. Simulation results show that based on NILM algorithm and only considering electricity cost and comfort level, the home power utilization cost can reduced by 72.5%. When user-controllable power load increases, the control strategy can be updated by NILM in realtime to decrease user's electricity utilization cost. Results of multiple calculations for different users show that the net cost and computing time fluctuate slightly, thus the rationality and reliability of the NILM algorithm can meet the requirements of family intelligent energy consumption.

Keywords: intelligent energy management; nonintrusive load monitoring; multi-objective optimization; particle swarm optimization algorithm

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0140

0 引言

家庭智慧用能管理系统调控用户各种负荷的运行情况, 通过用户侧风力发电和光伏发电等分布式电源主动参与电网的运行^[1], 提高用电效率, 有效实现节能减排。随着多能源网络的融合和能源互联网技术的快速发展, 对如何解决各个能源网络节点供需问题, 用户居民家庭能量管理扮演着重要的作用^[2-3], 因此家庭能量管理越来越受到了国内外研究者普遍关注^[4]。

近年来, 研究者主要从用户的用电成本和居住环境等作为目标对家庭用能进行优化运行和控制。文献 [5] 在智能电网的环境下以家庭用户用电成本最小为目标进行家庭用能管理; 文献 [6] 基于物联网和大数据平台对居民用户各负荷进行控制, 并测试其响应时间; 文献 [7] 考虑用电成本

和设备的反应疲劳对随机家庭用能管理进行研究；文献 [8] 考虑光伏、风力发电和蓄电池储能对家庭用电负荷进行优化和能量管理；文献 [9] 基于模型预测控制对家庭能源局域网各个设备进行控制，实现家庭各能源最优管理。上述文献主要以经济性为目标考虑家庭用能管理，并且不同用户每天用电习惯不尽相同，如何获得用户用电行为是控制家庭用能各个设备的关键因素。文献 [10] 主要提出建筑围护结构热动态特性的暖通空调系统模型预测控制方法，以耗能和用户舒适度为目标，达到用户侧用能管理优化的目的；文献 [11] 考虑智能楼宇在不同优化调度策略下对配电网的经济性与安全性影响，通过引入楼宇集群负荷系数，提出考虑负荷系数的集成智能楼宇的主动配电网建模及优化调度方法。以上分别从不同用户住宅结构和配电网考虑用户家庭用能管理，从而没有针对不同家庭各个用电设备的用电运行情况进行考虑。同时当用电负荷改变时，用户也需要调整各个用电设备运行策略。因此家庭智慧用能管理系统需要进一步深入研究和探索。

NILM 只需要在电力供给的入口处安装监测设备对家庭各负荷进行监测，获得每个负荷的类型、运行情况及相关参数等信息，无需在每个用电设备装设用电数据采集器，因此大大减少智慧用能基础设施成本，同时根据用户负荷类型增加用电负荷改变控制策略。针对如何有效和实时获得用户用电行为进行家庭智慧用能管理，本文提出基于 NILM 的家庭智慧用能管理系统的控制算法，并以家庭的用电成本和用户舒适度为目标函数，考虑风机和光伏等可再生能源发电和储能系统加入到能源管理系统中，进行综合控制，针对论文

多目标问题利用粒子群算法进行求解，得到最佳可控负荷和储能系统的控制策略，并考虑增加不同用电设备和不同家庭用户的优化控制策略。

1 基于 NILM 的家庭智慧用能管理系统框架

家庭智慧用能管理系统主要包括光伏发电、风力发电、电动汽车、储能系统、各种用电负荷等设备，如图 1 所示。不同设备运行控制和优化管理通过基于 NILM 的家庭智慧用能管理控制器完成。



图 1 基于 NILM 算法的家庭智慧用能管理系统组成
Fig. 1 Composition of home intelligent energy management system based on NILM algorithm

基于 NILM 的家庭智慧用能管理系统包括 NILM 模块、发电功率预测模块和用电设备调度控制模块，如图 2 所示。

1) NILM 模块。通过智能采集器获得用户的用电信息识别居民用电负荷的类型、启停、运行时间、工作状态等，分析用户的用电行为是家庭

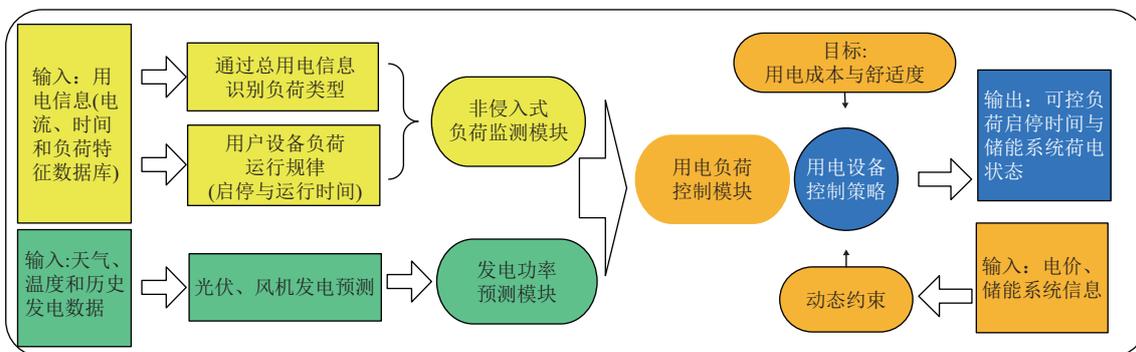


图 2 基于 NILM 算法的家庭智慧用能管理系统基本框架

Fig. 2 Basic framework of home intelligent energy management system based on NILM algorithm

智慧用能管理的基础。

2) 发电功率预测模块。主要通过天气信息和历史发电数据结合相应的算法对风机和光伏的发电功率进行短期预测。

3) 用电设备调度控制模块。根据用户的用电行为,在用电成本最低和尽可能不干扰用户用电方式的情况下,通过优化调度算法得到家庭的可控负荷、电动汽车、储能系统等设备的控制策略。

2 基于NILM家庭智慧用能管理

2.1 NILM 模块

家庭智慧用能管理系统中,NILM模块通过采集用户总用电电流,利用监测算法获得各个用电设备启停情况和用电行为。本文监测算法为卷积神经网络,是本文作者2020年5月在IEEE Transactions on Consumer Electronics 刊出^[12]。处理过程包括事件检测、曲线灰度图转换、负荷电流特征图像数据库和基于卷积神经网络的负荷识别4个主要步骤,处理流程见附录A,附图A1。

1) 事件检测:通过阈值判断得到负荷启停事件发生时间点,并获得电流波形,为负荷监测提供数据基础。

2) 曲线灰度图转化:将事件检测获得电流波形转化为灰度图,作为卷积神经网络的输入层。

3) 负荷电流特征图像数据库的建立:将不同负荷的各种情况的电流波形转化为灰度图,作为卷积神经网络的训练样本。

4) 基于卷积神经网络的负荷监测:利用卷积神经网络对负荷类型进行识别,结果概率最大即为此时事件发生的负荷。

NILM利用用户用电入口处的总用电信息并根据卷积神经网络可以有效获得用户启停时间、运行时间和工作状态等信息。

2.2 家庭智慧用能调度控制模块

家庭智慧用能管理能量流动关系如图3所示。图中:箭头为能量流动的方向; k 表示时刻; $P_{PV,k}$ 表示 k 时刻光伏发电功率; $P_{grid,k}$ 表示 k 时刻用户从电网购入功率; $P_{net,k}$ 表示 k 时刻并入电网功率。

可控负荷包括平移型和温度型负荷;平移型负荷指用电设备开启时间比较随机,同时设备需要的电能相对固定,如洗衣机、洗碗机、消毒柜

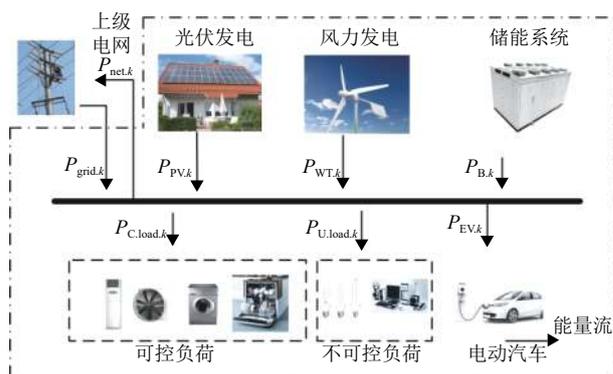


图3 家庭智慧用能管理系统能量流动

Fig. 3 Energy flow diagram of home intelligent energy management system

等用电设备;温度型负荷指运行特性取决于室内和室外的温度差异,负荷的启停与用户自身舒适度相关,如空调和热水器等负荷。

电动汽车可以定义为计划型负荷,运行时间和启停时间可以根据用户自身需求和电价等因素自我调控。不可控负荷指用户家庭刚性或者近似刚性需求的负荷,用电设备具有很强的用电规律,如照明设备、电脑和电视等家庭用电设备。

2.2.1 可控负荷数学模型与约束条件

1) 平移型负荷。

平移型负荷指开启时间可以随机,但必须等待整个工作任务完成后才能关闭。

$$P_{x,k} = \begin{cases} P_x, & k \in [k_{x,start}, k_{x,start} + k_{x,total}] \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_x 为平移型负荷 x 在整个工作任务的平均功率; x 为洗衣机、洗碗机和消毒机等平移型负荷集合; $k_{x,start}$ 为平移型负荷 x 开始运行时间, $k_{x,total}$ 为平移型负荷 x 整个工作任务的工作时间。

2) 空调。

空调运行情况受室内室外温度差、建筑保温材料 and 室内空间大小等因素影响。根据文献^[13]可以得到空调温度变化模型:

$$T_{k+1}^{air} = T_k^{air} + \Delta k \frac{P_k^{air}}{C_{air}} S_k^{air} + \Delta T_{loss} \quad (2)$$

式中: T_{k+1}^{air} 和 T_k^{air} 分别表示第 k 个时间段与第 $k+1$ 个时间段室内温度; Δk 表示单个时间段的时间间隔; P_k^{air} 表示 k 时间的电功率消耗; C_{air} 为比例系数; S_k^{air} 为0-1变量,0表示空调停止运行,1表示开启运行; ΔT_{loss} 表示单个时间间隔由于建筑物等因素提高或降低的温度,空调制冷为正值,制

热为负值，参数及其详细意义参见文献 [13]。同时室内温度要保持在一定范围，即：

$$T_{\min}^{\text{air}} \leq T_k^{\text{air}} \leq T_{\max}^{\text{air}} \quad (3)$$

3) 电热水器。

电热水器根据热量平衡可以有：

$$c\rho VT_{k+1}^{\text{heater}} = (1-\alpha)(\varphi\tau P_k^{\text{heater}}\Delta k S_k^{\text{heater}} + c\rho VT_k^{\text{heater}}) \quad (4)$$

式中： c 为水的比热容； ρ 为水的密度； V 为电热水器的体积； T_{k+1}^{heater} 和 T_k^{heater} 为第 $k+1$ 个时间段与第 k 个时间段的水箱温度； α 为热水器散热系数； φ 为电转化效率； τ 为千瓦时与焦耳的单位转化系数； P_k^{heater} 表示 k 时间的电功率消耗； S_k^{heater} 为0-1变量，0表示电热水器停止运行，1表示电热水器开启运行。热水器内的温度需要保持在一定范围，供用户随时使用，即：

$$T_{\min}^{\text{heater}} \leq T_k^{\text{heater}} \leq T_{\max}^{\text{heater}} \quad (5)$$

4) 电动汽车。

电动汽车可以被看作是储能系统和可控负荷的综合体，作为交通工具，离开和接入到电网具有一定的随机性，其约束条件：

$$E_{\text{EV}}(k+1) = \eta_{\text{EV}} P_{\text{EV},k} \Delta k + E_{\text{EV}}(k) - \varepsilon_{\text{EV}} \Delta k \quad (6)$$

$$P_{\text{EV}\min} \leq P_{\text{EV},k} \leq P_{\text{EV}\max} \quad (7)$$

$$E_{\text{EV}\min} \leq E_{\text{EV}}(k) \leq E_{\text{EV}\max} \quad (8)$$

式中： $k \in [k_1, k_2]$ ， k_1 表示电动汽车开始充电时间； k_2 表示其结束充电时间； η_{EV} 为电动汽车的充放电效率，充电时 $\eta_{\text{EV}} = 1$ ，放电时 $\eta_{\text{EV}} = 0$ ，计算考虑电动汽车仅参与储能而不参与家庭设备用电； $E_{\text{EV}}(k)$ 表示电动汽车 k 时刻的能量； ε_{EV} 表示电动汽车自放电的损耗； $P_{\text{EV}\min}$ 和 $P_{\text{EV}\max}$ 表示最大充电功率和最大放电功率； $E_{\text{EV}\min}$ 和 $E_{\text{EV}\max}$ 表示电动汽车可用容量的上下限。

5) 储能系统。

储能系统的约束与电动汽车的约束相同，考虑电动汽车具有随机性，而储能系统可以按照需求进行控制，其约束条件：

$$E_{\text{B}}(k+1) = \omega_{\text{B}} P_{\text{B},k} \Delta k + E_{\text{B}}(k) - \varepsilon_{\text{B}} \Delta k \quad (9)$$

$$-P_{\text{B}\min} \leq P_{\text{B},k} \leq P_{\text{B}\max} \quad (10)$$

$$E_{\text{B}\min} \leq E_{\text{B}}(k) \leq E_{\text{B}\max} \quad (11)$$

式中： k 表示储能系统运行时段， $k \in 1, 2, \dots, K$ ； ω_{B} 充电时为 $\omega_{\text{B}s}$ ， $\omega_{\text{B}s}$ 为储能系统充电效率； ω_{B} 放电时为 $-\frac{1}{\omega_{\text{Bd}}}$ ， ω_{Bd} 为储能系统放电效率； $E_{\text{B}}(k)$ 表

示储能系统 k 时刻的能量； ε_{B} 表示储能系统自放电的损耗； $P_{\text{B}\min}$ 和 $P_{\text{B}\max}$ 表示最大充电功率和最大放电功率； $E_{\text{B}\min}$ 和 $E_{\text{B}\max}$ 表示储能系统可用容量的上下限。

6) 功率平衡约束：

$$P_{\text{C},\text{load},k} + P_{\text{U},\text{load},k} + P_{\text{EV},k} + \omega_{\text{B}s} P_{\text{B},s,k} + P_{\text{net},k} = P_{\text{PV},k} + P_{\text{WT},k} + \frac{P_{\text{Bd},k}}{\omega_{\text{Bd}}} + P_{\text{grid},k} \quad (12)$$

式中： $P_{\text{C},\text{load},k}$ 为可控负荷 k 时段耗电功率； $P_{\text{U},\text{load},k}$ 为不可控负荷 k 时段耗电功率； $P_{\text{EV},k}$ 为电动汽车 k 时段充电功率； $P_{\text{B},s,k}$ 为蓄能系统 k 时段充电功率； $P_{\text{Bd},k}$ 为 k 时段蓄能系统放电功率； $P_{\text{net},k}$ 表示 k 时刻光伏或者风机上网功率； $P_{\text{PV},k}$ 为光伏 k 时段发电功率， $P_{\text{WT},k}$ 为风机 k 时段发电功率； $P_{\text{grid},k}$ 表示 k 时段用户从电网购电功率。

2.2.2 目标函数

家庭智慧用能管理系统的各个设备的运行计划通过能源管理模型求解确定，本文家庭能量管理模型建立的原则主要包括2个方面。

1) 用户的用电成本最低。降低用电成本是居民使用电能最直接的愿望，同时可以消纳风机和光伏的发电量，达到节能减排的效果。用户用电成本 f_1 由用户购电成本和风机光伏发电收益组成，公式如下：

$$\min f_1 = \sum_{k=1}^T (P_{\text{grid},k} \text{Price}_k - P_{\text{net},k} J_{\text{sub}}) \quad (13)$$

式中： Price_k 表示 k 时刻电价； J_{sub} 为光伏或者风机上网补贴电价。

2) 用户的用电舒适度最高。家庭智慧用能管理系统各设备调度控制计划按照用户使用各个设备的用电习惯，用电舒适度越高，用电体验会随之增大，舒适度包括用电时间安排舒适度和温度舒适度。

时间安排舒适度：用电时间安排对于平移型负荷，存在负荷运行时间提前或者延期的情况，如图4所示。

平移型负荷目标，尽可能按照用户正常使用负荷进行开启和关闭，即目标使平移型负荷开启时间和用户正常使用负荷时间差值尽可能的小，表达式：

$$\min f_2 = \sum_{x=1}^n \left| \frac{s_x - k_x}{k_x^{\max}} \right| \quad (14)$$

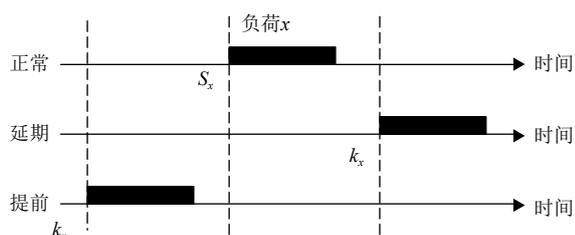


图4 平移型负荷 x 开启时间延期或者提前

Fig. 4 Delay or in advance of the opening time of translational load x

式中： s_x 为家庭智慧用能管理系统控制平移负荷 x 开启时间； k_x 为平移负荷 x 用户正常开启时间； k_x^{\max} 为平移负荷 x 最大允许延迟和提前时间的和。

温度舒适度：温度型负荷可以间歇开启和关闭，如空调和热水器，温度舒适度是温度尽可能小的偏离人体需求温度，表达式：

$$\min f_3 = \sum_{j=1}^m \left| \frac{T_j(k) - T_j^U(k)}{T_j^{\max}} \right| \quad (15)$$

式中： $T_j(k)$ 为 k 时刻第 j 个温度型负荷实现温度； $T_j^U(k)$ 为 k 时刻第 j 个温度型负荷居民设定需求温度； T_j^{\max} 为第 j 个温度型负荷实现温度与设定需求温度居民最大容忍温度。

综上所述，基于 NILM 的家庭智慧用能管理系统的目标函数为：

$$\min f = \{f_1, f_2, f_3\} \quad (16)$$

2.3 发电功率预测模块

光伏发电功率 $P_{PV,k}$ 预测值，通过文献 [14] 主成分分析法和回归分析等数据统计方法进行求解。风机发电功率 $P_{WT,k}$ 预测值，利用文献 [15] 支持向量机和经验模态分解方法进行短期预测。仿真地区风光发电的历史数据对风光发电预测方法进行误差校验，误差小于 5%。

3 家庭智慧用能管理优化调度运行模型

3.1 优化调度模型

基于 NILM 的家庭智慧用能管理系统的目标函数为式 (16)。由于 $f_2, f_3 \in [0, 1]$ ，如果直接求解各个目标函数的最优解，存在 f_2 和 f_3 同时为零，而用户仍为传统的用电习惯，用电成本 f_1 保持不变，因此需要约束 f_2 和 f_3 不能同时为零。

$$\min J = f_1 * (\xi_1 f_1 + \xi_2 f_2) \quad (17)$$

式中： $\xi_{1,2} \in [0, 1]$ ， $\xi_1 + \xi_2 = 1$ ； $f_2 + f_3 > 0$ ，约束条件式 (1)–(12)。

3.2 优化策略

家庭智慧用能管理系统优化策略主要用于各个时刻发电设备和电网出力的确定，对运行费用有着直接影响。考虑用户的使用体验及尽可能使用可再生能源，家用负荷对系统运行可靠性需求较高，从大电网购电是家庭智慧用能管理系统的最终供电方式。考虑风力和光伏发电的随机性，本文设定优化策略：优先考虑光伏和风力发电，最大程度利用可再生能源满足家用负荷的用电需要，当可再生能源不满足负荷的正常需要，判断蓄电池的荷电状态，若满足则采用储能系统供应家庭智慧用能管理系统短时负荷需要，当蓄电池的剩余电量不能满足时，由电网直接供电的时间顺序。

优化模型根据风机、光伏可再生能源功率输出预测值、电价信号、用户偏好的设置，对可控负荷、电动汽车和储能系统进行调度，以满足家庭智慧用能管理系统的目标要求。

3.3 粒子群算法

由于家庭智慧用能管理的维度、变量和约束条件较多，粒子群算法可以很好地解决非线性优化问题。粒子群算法的基本思想：粒子都有它本身的位置与速度，通过目标函数决定当前适应值 [16]。每次迭代时，粒子通过计算自身最优解 P_{best} 及全局最优解 G_{best} 完成更新，粒子 i 在第 k 次迭代第 d 维速度和位置的更新方程为

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + c_1 r_1^k (p_{\text{best}id}^k - x_{id}^k) + c_2 r_2^k (g_{\text{best}id}^k - x_{id}^k) \quad (18)$$

$$x_{id}^{k+1} = x_{id}^k + v_{id}^{k+1} \quad (19)$$

$$w = (w_{\max} - w_{\min})(k_{\max} - k) / k_{\max} + w_{\min} \quad (20)$$

式中： v_{id}^k 为粒子在第 k 次迭代中第 d 维的速度； x_{id}^k 为粒子在第 k 次迭代中第 d 维的位置； w 为惯性权重；学习因子 c_1 和 c_2 为常数，一般取值 2； r_1 和 r_2 为 $[0, 1]$ 之间的随机数； k_{\max} 为最大迭代次数； k 为当前的迭代次数； w_{\max} 和 w_{\min} 分别是初始惯性权重的最大值和最小值。

通过 PSO 求解家庭智慧用能管理优化调度模型，得到家庭各个用电设备优化运行策略，可控负荷、电动汽车和储能系统作为 PSO 算法的决策变量，可控负荷和电动汽车求解量为 0–1 变量，判断对应设备启停时间。

4 算例分析

4.1 NILM 模块

NILM 模块获取用户各个用电负荷启停时间和运行规律，进而得到用户的用电习惯，为家庭智慧用能管理提供数据支撑。本文数据来源沈阳市某小区一居民家庭用电情况，表 1 为家庭用电负荷类型和功率范围。利用文献 [12]NILM 方法得到每天的该户居民各个负荷启停状态和用电量情况。

表 1 家庭用电负荷类型和功率范围

类型	负荷类型	功率范围/W	
不可控负荷	节能灯1	40	
	节能灯2	60	
	电视	140~180	
	电脑	40~90	
	冰箱	15, 60~100	
平移型负荷	洗衣机	300~600	
	消毒柜	600	
可控负荷	计划型负荷	电动汽车	7000
	温度型负荷	空调	1500
		热水器	2000

基于 NILM 可以有效获得用户的用电习惯，本文只对用户的可控负荷进行智能控制，如表 2 所示为可控负荷的最早开始时间、最晚结束时间、可运行时间窗口和运行时间。

表 2 基于 NILM 算法的家庭可控负荷运行数据分析

Table 2 NILM algorithm-based analysis on operating data of household controlled load

可控负荷	最早运行时间	最晚结束时间	可运行时间窗口/h	运行时间/h
洗衣机	9:00	19:00	10	1
消毒柜	8:00	19:00	11	1
电动汽车	0:00	24:00	24	6
空调	0:00	24:00	24	6
热水器	0:00	24:00	24	3

4.2 发电功率预测模块

对光伏、风机发电输出功率的短期准确预测，可以合理调配电网、风机和光伏的用电，降低用电成本，提高用户用电满意度。家庭智慧用能管理设备负荷调度区间时长 1 天，考虑能够实时对

各个负荷和设备进行控制，将仿真间隔设置为时长 1 h，24 个时间间隔。假设用户安装的光伏发电系统容量 5 kW，风机发电系统容量 3 kW，光伏输出功率、风机输出功率见附录 A，附图 A2 所示。

4.3 家庭智慧用能调度控制模块

4.3.1 固定用电负荷优化控制策略

家庭智慧用能调度区间设置总时长 $K = 24$ h，间隔长度 $k = 1$ h，总共 24 个间隔。不可控负荷电脑、电视、冰箱，可控负荷洗衣机，由于运行情况不同功率也不相同，需提前计算第二天各个负荷功率运行情况，本文取平均功率作为输入数据。空调： $T_{\min}^{\text{air}} = 22, T_{\max}^{\text{air}} = 27$ ；电热水器： $T_{\min}^{\text{heater}} = 45, T_{\max}^{\text{heater}} = 100$ ；电热水器初始温度设置为 $T_{k=1}^{\text{heater}} = 45$ ；储能系统容量为 13.44 kWh，最大充放电功率为 2 kW， $\omega_{\text{Bs}} = \omega_{\text{Bd}} = 0.95$ ，蓄电池荷电初始状态为 50%；上网补贴 $J_{\text{sub}} = 0.37$ 元/kWh；PSO 最大迭代次数 1000；速度取值范围为 [0.4, 0.4]； $P_c = 0.7$ ； w_{\max} 和 w_{\min} 分别为 0.2 和 0.9； $\xi_1 = \xi_2 = 0.5$ ；电动汽车在本文计算中只作为负荷性质，而不参与放电供其他负荷使用，电价和室外环境温度见附录 A，附图 A3 所示。

本文研究基于 NILM 的家庭智慧用能管理，根据运行策略，优先使用光伏发电和风机发电，在满足用户用电需求的情况下以用户用电成本和舒适度综合目标最小得到可控负荷和储能系统设备运行结果。为了综合比较算法可靠性，采用 3 种模式进行比较。

模式 0：用电设备正常运行（按照用户以往用电习惯正常运行，不增加控制策略）。

模式 1：考虑用户用电成本和舒适度多目标的控制策略，不含风机光伏发电和储能系统。

模式 2：含风机光伏和储能系统并计及用户用电成本和舒适度的控制策略。

利用 PSO 算法进行求解，采用 MATLAB7.10 编程，计算结果如图 5 所示。根据不同模式下可控负荷功率变化计算购电成本、收益和净成本，结果如表 3 所示。

表 3 数据显示：模式 1、模式 0 均没有光伏风机发电和储能系统参与负荷供电调节，只增加控制策略，发现可以有效节省用户用电成本，成本降低率为 72.5%。模式 2 与模式 0 相比增加光伏风机发电和储能系统参与负荷调节，并考虑用

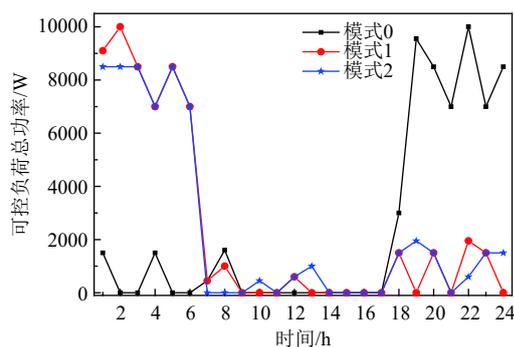


图5 不同模式下可控负荷变化功率曲线

Fig. 5 Power curve of controllable load change under different modes

表3 不同模式下购电成本、收益与净成本

Table 3 Power purchasing cost, revenue and net cost under different modes

模式	从大电网购电成本/元	可再生能源上网收益/元	净成本/元
模式0	47.30	0	47.30
模式1	27.42	0	27.42
模式2	11.87	11.44	0.43

户用电成本和舒适度,成本降低倍数为109倍,当发现光伏和风机发电参与家庭用能时,可以大幅度减少用户用电成本。模式2与模式1均考虑控制策略,但模式2增加光伏风机发电和储能系统,发现成本降低倍数为62.77倍,用户用电成本有效减少。

通过上述分析可以发现,在NILM情况下,获得用户用电信息和用电规律,保证用户用电舒适性,同时增加光伏风机发电和储能系统并综合考虑成本与舒适性,可以有效降低用户用电成本。

根据PSO算法求解得到各个可控负荷控制策略,0表示可控负荷停止运行,1表示可控负荷正在运行。附录A附图A4和附图A5分别为模式1和模式2不同时间可控负荷与电动汽车启停情况,即各个用电设备调度策略输出值。

4.3.2 增加用电负荷时优化控制策略

现有家庭用户用能管理中,大多数只针对固定用电设备,而未考虑用户增加用电设备时如何进行优化控制。本文增加不同类型的用电负荷,并基于NILM进行设备辨识,其负荷识别准确率如图6所示。

图6显示用户临时增加不同类型的用电负荷,NILM算法的准确率均在87%以上,而对于平移型、计划型和温度型3类可控负荷的识别准确率

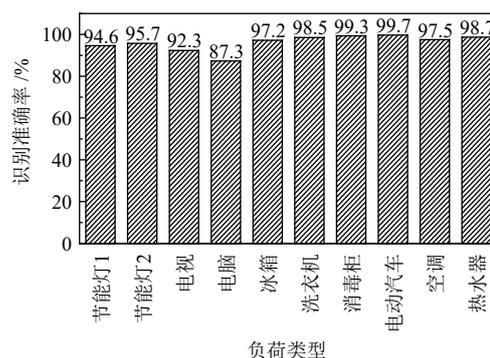


图6 NILM算法的准确率

Fig. 6 Accuracy of NILM algorithm

在97%以上。

本文假设用户临时增加一台空调负荷,其启停规律和运行时间通过NILM算法获得。控制1为增加空调负荷时NILM未介入的设备控制策略,控制2为增加空调负荷时NILM介入优化后的控制策略。其用户可控负荷总功率如图7所示。

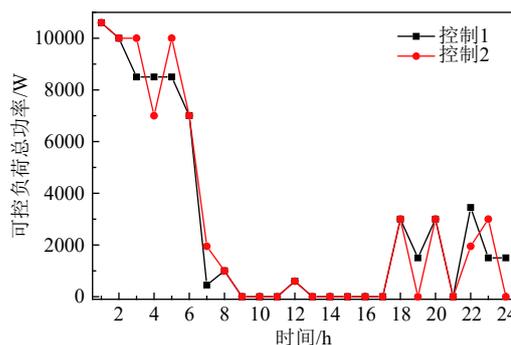


图7 增加用电设备时不同控制策略下功率变化

Fig. 7 Power change under different control strategies when electric equipment is added

根据阶梯电价,计算控制1用电成本34.05元,控制2用电成本32.82元,成本降低率3.75%。增加不同的可控用电负荷,成本均有所降低。即增加可控用电负荷,NILM算法可以实时更新优化控制策略以达到降低用电成本目的。

4.3.3 不同居民用户基于NILM家庭智慧用能管理

考虑利用PSO算法在计算可控负荷0-1变量和储能系统连续变量时具有随机性,为了保证算法的准确性,选取6个家庭居民用户进行试验验证,重复计算10次,数据来源于文献[17],结果如表4所示。

通过表4可以发现,利用PSO算法计算净成本和时间标准差较小,计算时间平均值小于1h,满足负荷控制要求,控制算法计算结果可以作为

表 4 不同用户家庭成本与计算时间统计量
Table 4 Statistics of different users' family costs and computation time

用户	净成本标准差/元	计算时间平均值/s	计算时间标准差/s
用户1	0.57	135.6	4.5
用户2	23.91	604.3	2.3
用户3	1.59	37.5	13.1
用户4	20.76	110.5	6.8
用户5	9.81	50.7	3.5
用户6	10.51	89	7.8
平均值	11.19	171.27	6.33

可控负荷和电动汽车第二天运行计划。

5 结论

NILM 算法可以得到家庭用电负荷、用电规律和用电信息, 为家庭智慧用能管理提供数据支撑。基于用户用电成本和舒适性提出可控负荷的控制策略, 考虑光伏发电、风机发电、储能系统参与负荷和电网的能量交换, 提出家庭智慧用能管理多目标控制算法。仿真结果显示, NILM 算法的家庭用电成本降低 72.5%; 用户用电设备增加时, 可有效降低家庭用电成本; 不同的用户家庭通过调整优化策略、净成本、计算时间就能满足家庭的用能需求。该算法可推广到工业、服务等行业的智慧用电管理中。

(本刊附录请见网络版, 印刷版略)

参考文献

- [1] 张禹森, 孔祥玉, 孙博伟, 等. 基于电力需求响应的多时间尺度家庭能量管理优化策略[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1811-1819.
ZHANG Yusen, KONG Xiangyu, SUN Bowei, *et al.* Multi time scale household energy management optimization strategy based on power demand response[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1811-1819(in Chinese).
- [2] 朱天怡, 艾芊, 贺兴, 等. 基于数据驱动的用能行为分析方法及应用综述[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3497-3507.
ZHU Tianyi, AI Qian, HE Xing, *et al.* Overview of data-driven power consumption behavior analysis method and application[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3497-3507(in Chinese).
- [3] 曹昉, 郭培林, 王科, 等. 室内舒适指数比调整的空调群负荷响应方法[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 152-157.
CAO Fang, GUO Peilin, WANG Ke, *et al.* Load response method of air conditioning groups based on equalize proportion adjustment of indoor comfort index[J]. Electric Power, 2017, 50(11): 152-157(in Chinese).
- [4] 严干贵, 阚天洋, 杨玉龙, 等. 基于深度强化学习的分布式电采暖参与需求响应优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4140-4149.
YAN Gangui, KAN Tianyang, YANG Yulong, *et al.* Distributed electric heating participating in demand response optimization scheduling based on deep reinforcement learning[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4140-4149(in Chinese).
- [5] 张延宇, 曾鹏, 臧传治. 智能电网环境下家庭能源管理系统优化调度算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(02): 18-26.
ZHANG Yanyu, ZENG Peng, ZANG Chuanzhi. Optimal scheduling algorithm of home energy management system in smart grid environment[J]. Power system protection and control, 2016, 44(02): 18-26(in Chinese).
- [6] AL-ALI A R, ZUALKERNAN I A, RASHID M, *et al.* A smart home energy management system using IoT and big data analytics [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2017, 63(4): 426-434. doi: 10.1109/TCE.2017.015014.
- [7] SHAFIE-KHH M, SIANO P. A stochastic home energy management system considering satisfaction cost and response fatigue [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(2): 629-638. doi: 10.1109/TII.2017.2728803.
- [8] Melhem F Y, Grunder O, Hammoudan Z, *et al.* Optimization and energy management in smart home considering photovoltaic, wind, and battery storage system with integration of electric vehicles[J]. IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2017, 40(2): 128-138. doi: 10.1109/CJECE.2017.2716780.
- [9] 张彦, 张涛, 刘亚杰, 等. 基于模型预测控制的家居能源局域网最优能量管理研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3656-3666.
ZHANG Yan, ZHANG Tao, LIU Yajie, *et al.* Study on optimal energy management of home energy LAN based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3656-3666(in Chinese).
- [10] 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.* Predictive control method of HVAC model considering thermal dynamic characteristics of buildings[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 3928-3940(in Chinese).

- [11] 陈厚合, 李泽宁, 靳小龙, 等. 集成智能楼宇的主动配电网建模及优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(22): 6550–6563.
CHEN Houhe, LI Zening, JIN Xiaolong, *et al.* Active distribution network modeling and optimization method for integrated intelligent buildings[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(22): 6550–6563(in Chinese).
- [12] Yang D, Gao X, Kong L, *et al.* An Event-Driven Convolutional Neural Architecture for Non-Intrusive Load Monitoring of Residential Appliance [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 66, no. 2, pp. 173–182, May 2020, DOI: [10.1109/TCE.2020.2977964](https://doi.org/10.1109/TCE.2020.2977964).
- [13] SHAO S, PIPATTANASOMPORN M, RAHMAN S. Development of physical-based demand response-enabled residential load models[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(2): 607–614.
- [14] 刘杰, 陈雪梅, 陆超, 等. 基于数据统计特性考虑误差修正的两阶段光伏功率预测[J]. 电网技术, 2020, 44(08): 2891–2897.
LIU Jie, CHEN Xuemei, LU Chao, *et al.* Two stage photovoltaic power prediction considering error correction based on data statistical characteristics[J]. Power System Technology, 2020, 44(08): 2891–2897(in Chinese).
- [15] 夏书悦, 董心怡. 基于经验模态分解法优化支持向量机模型的日前风电功率组合预测[J]. 电气技术, 2020, 21(03): 11–15.
XIA Shuyue, DONG Xinyi. Power combination prediction of day ahead wind power based on empirical mode decomposition optimization support vector machine model[J]. *Electrical Eechnology*, 2020, 21(03): 11–15(in Chinese).
- [16] 孔亮, 沈力, 赵庆杞, 等. 含光伏发电系统的冷库多目标优化运行研究[J]. 控制工程, 2018, 25(08): 1534–1539.
KONG Liang, SHEN Li, ZHAO Qingqi, *et al.* Study on multi-objective optimal operation of cold storage with photovoltaic power generation system[J]. Control Engineering of China, 2018, 25(08): 1534–1539(in Chinese).
- [17] KOLTER J Z, JOHNSON M J. REDD: A Public Data Set for Energy Disaggregation Research[DB/OL]. [2011], <http://redd.csail.mit.edu>.

收稿日期: 2021-06-07

作者简介:

丁迅(1970), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为需求侧响应、负荷控制与优化, E-mail: 2501800620@qq.com;

张忠(1981), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电网发展规划研究分析和线损管理, E-mail: jianglilwonderful@126.com;

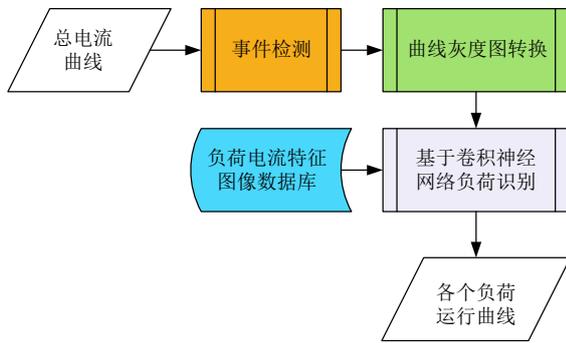
夏兆俊(1988), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统自动化、需求侧管理和配电网负荷优化等, E-mail: 2368450762@qq.com;

范洋洋(1987), 男, 本科, 工程师, 研究方向为非侵入式负荷控制与监测, E-mail: gaopt2004@163.com;

张颖(1975), 女, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统自动化、电气设备监测与分析等, E-mail: 843875669@qq.com;

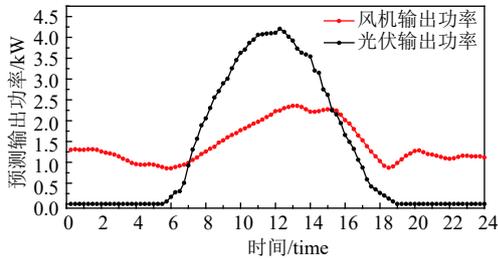
孔亮(1993), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为负荷监控与优化、非侵入式负荷监测等, E-mail: k_liang1993@163.com。

附录 A



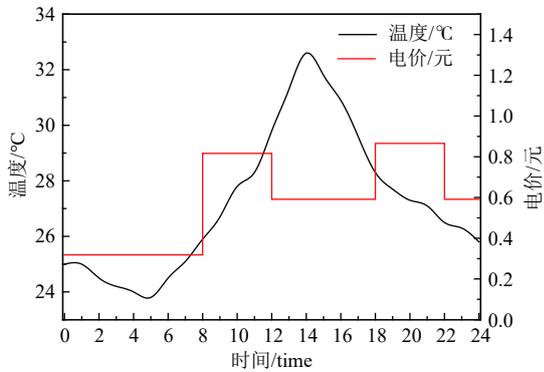
附图 A1 NILM 模块框架

Fig. A1 NILM module framework



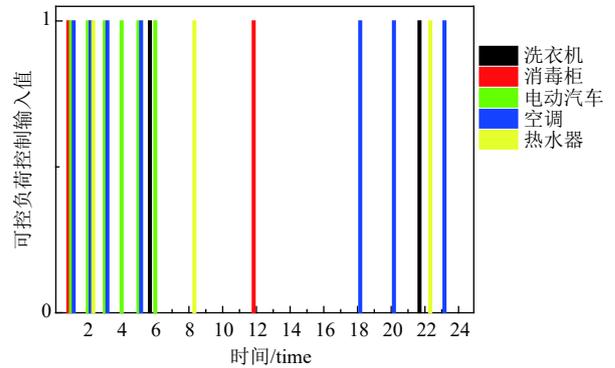
附图 A2 风机和光伏发电输出功率值

Fig. A2 Output power value of WT and PV



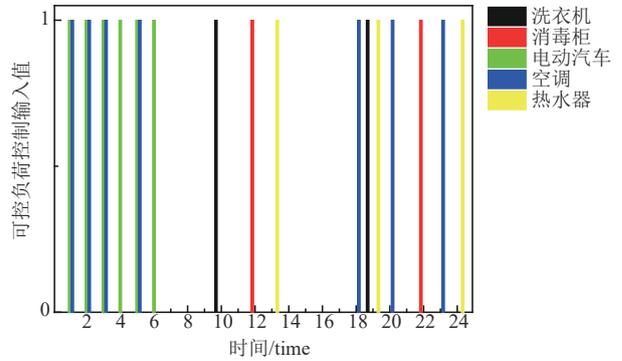
附图 A3 仿真输入环境温度和不同时刻电价

Fig. A3 Simulation input ambient temperature and price at different time



附图 A4 模式 1 可控负荷和电动汽车控制策略输入值

Fig. A4 Input value of control load and electric vehicle control strategy in mode 1



附图 A5 模式 2 可控负荷和电动汽车控制策略输入值

Fig. A5 Input value of control load and electric vehicle control strategy in mode 2