

一种基于模糊控制的智能家庭能量管理系统

李德智^{1,2}, 董明宇^{1,2}, 尹忠东³, 李晓强⁴, 林 攀³

(1. 需求侧多能互补优化与供需互动技术北京市重点实验室, 北京 100192; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;
3. 华北电力大学, 北京 102206; 4. 国家电网公司, 北京 100031)

Smart Home Energy Management System Based on Fuzzy Control

LI Dezhi^{1,2}, DONG Mingyu^{1,2}, YIN Zhongdong³, LI Xiaoqiang⁴, LIN Zhi³

(1. Beijing Key Laboratory of Demand Side Multi-energy Carriers Optimization and Interaction Technique, Beijing 100192, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

摘 要: 随着全球能源和环境问题的日益严峻, 基于可再生能源的分布式电源已成为目前各国的发展重点。在分布式电源日益增长和智能电网的大前提下, 智能家庭能量管理系统作为大电网智慧分布在各个家庭的代理终端, 势必会得到大力推广。本文首先介绍了智能家庭能量管理系统及其关键技术, 并提出了目前较实际的拓扑及其控制逻辑。基于此控制逻辑, 本文提出了不需要额外预测输入的模糊控制来优化家庭能量分配的控制方法, 并利用实时仿真技术验证了控制方法的可行性。

关键词: 家庭能量管理系统; 分布式智慧; 模糊控制

Abstract: As the global energy and environmental problem becomes increasingly serious, distributed generation based on renewable energy has become the developing focus of many countries. Under the background of the smart grid and growing number of distributed generations, home energy management system(HEMS) as an agent of smart grid will be distributed in various households, which is bound to be vigorously promoted. The intelligent home energy management system and its key technology are introduced in this paper, and a relatively practical topology and its control logic are put forward. Based on this logic, a control method, in which fuzzy control method without additional predictive data is used to optimize the household energy distribution, is proposed in this paper. In the end, the feasibility of this method is verified by real-time simulation.

Keywords: home energy management system; distributed

grid intelligence; fuzzy control

0 引 言

智能电网(Smart Grid)的概念最初起源于美国, 美国电科院(EPRI)最早于 2000 年提出了这个概念, 并认为是 21 世纪电网的主要发展态势^[1]。2009 年以来, 欧盟、美国、中国及其他一些国家根据本地区的特点, 制定了各自的智能电网发展路线, 并启动了研发和示范项目。如今, 智能电网发展已步入关键时期。欧美国家在政府资金支持下开展的研发和示范项目大部分已完成, 需要总结成熟技术、提出合理的市场机制和商业模式, 建立各方普遍认可的标准体系, 以激励电力公司和其他私有资金投入以及用户的积极参与, 为智能电网技术的大范围推广实施扫清障碍^[2]。如果将智能电网称作“电网 2.0”, 那么能源互联网可理解为“电网 3.0”, 能源互联网除了具有智能电网诸如自愈、安全可靠、经济高效、兼容、与用户友好互动等特点外, 也在智能电网技术的基础上进行了升级与拓展^[3]。在由美国北卡州立大学提出的未来电网 FREEDM(Future Renewable Electric Energy Delivery and Management)系统中, 为了加速消纳分布式电源, 针对居民侧用户提出了以家庭为单位与智能电网的接口, 也可以称为分布式智慧(Distributed Intelligence)^[4], 或是本文所提到的智能家庭能量管理系统(HEMS, Home Energy Management System)。智能家庭能量管理系统作为拥有智能信息感知能力的电网末梢, 将大力推动电网发展。智

基金项目: 北京市科学技术委员会 2017 年度创新基地培育与发展专项(Z171100002217071); 中国电力科学院研究院创新基金项目(YD83-17-002)

能电网技术也为智能家庭能量管理系统带来新的发展,在各种传感器、通讯网络的技术支持下,可以实现家用电器的监控及投切^[5],为家庭内能流优化、新能源就地消纳打下了基础。文献[6]指出,美国的用电组成中72%的电能消耗在居民用户和商业用户中,并且其中至少30%的电量是浪费的。因此,承担着削峰填谷、完成用户侧需求响应等重要任务的智能家庭能量管理系统是改变能源现状和用户能源消费模式的重要手段之一。

目前,家庭能量管理方面存在着不同处理方法。文献[7]根据设备的优先级进行开断,对电网需求做出响应,其缺点在于不能响应目前主流的电价型需求响应信号。文献[8]根据分层组控制方法对家庭电器的投切进行控制,但是其目的为防止家庭总负荷超出额定值,并未进行能流优化。文献[9-11]在对负荷进行分类时提出了可调负荷的概念,并且采用了混合整数线性规划(MILP, Mixed Integer Linear Programming)来进行能量管理。但从我国目前的情况来看,大部分系统无权对负荷进行直接功率调节,而且在目前大部分家用电器设备尚无相关数据接口标准的前提下,能量管理系统对此类信息的交换较为困难,因此直接通过系统对可调负荷进行控制是比较难实现的,大部分负荷还需要依赖外部设备进行控制与监控。文献[12]采用模糊数学的方法来描述用户的舒适程度,并且提出了以用户舒适度为导向的评价方法。

本文结合我国国情及实际情况,提出了一种可行的家庭能量管理系统拓扑,并且在此基础上,利用不需要提供预测信息的模糊控制方法来对系统的能流进行实时控制,最后使用真实数据对该方法进行实时仿真模拟,并验证了该方法的有效性。

1 智能家庭能量管理的现状及关键技术

目前来说,智能家庭能量管理的控制方法主要有3种:混合整数线性规划(MILP),连续松弛(CR, Continuous Relaxation)以及模糊控制(FLC, Fuzzy Logic Controller)^[13]。

混合整数线性规划需要大量的预测数据,例如实时电价日前预报、负荷预测、可再生能源的出力预测等。混合整数线性规划的效果取决于预测的准确程度,在预测准确的前提下,其效果应是最好的。

混合整数线性规划由于存在计算复杂度高,计算时间长的问题,即便目前存在着一些解决办法,但因为方法过于昂贵,不适用于工程实际与商业应用^[13]。

连续松弛法作为混合整数线性规划的代替方法,很好地降低了混合整数线性规划的复杂度。简单来说,连续松弛法将混合整数线性规划方法看作取值连续的普通线性规划,牺牲一定性能来节省计算时间。但连续松弛法与混合整数线性规划一样依赖外部输入的预测数据,因此连续松弛法同样存在着抗干扰能力差的问题。

相较于上述两种方法,模糊控制最大的优点在于它不依赖于外部输入的预测数据,这也使得模糊控制更加稳定有效,而且对计算能力的需求也是最小的。同时,模糊控制能够量化用户的口头语言,使得不了解家庭系统内电气参数的用户也能很好地使用该系统。目前,欧洲能源公司E.ON已经开展了采用模糊控制的智能家庭能量管理器的试点项目。

在现阶段推广智能家庭能量管理系统主要有以下几个关键技术需要突破^[14]:

① 即插即用接口(PnP, Plug and Play)。智能家庭能量管理系统需要一个类似USB的标准即插即用接口,使得任何接入电网的设备身份能被迅速识别,并且能被分类成负荷、储能以及电源。同时,根据电网的发展趋势,这种即插即用接口不但能工作在目前的交流工况下,也需要支持将来的直流工况。

② 能量路由器。智能家庭能量管理系统中的能量路由器能够监控实时数据并且给出控制信号。目前来看,由能量路由器给出的控制只能控制部分设备的通断,而无权进行对类似于光伏的MPPT系统或是热水器温度系统等内部控制系统进行直接调整。能量路由器主要包括了整个系统的电路拓扑以及控制方法,也是本文着重介绍的部分。能量路由器中应包含信息路由器部分,其主要提供系统内通讯骨架线路与对用户友好的人机交互界面及操作系统,同时需要考虑与未来与其他用户的能量路由器协调通讯。

2 智能家庭能量管理系统的拓扑及控制逻辑

2.1 智能家庭能量管理系统的电路拓扑

基于目前实际,我们所提出的智能家庭能量管理系统的电路拓扑如图1所示。由于现存负荷大部

分为交流负荷，系统内所有负荷都放在交流侧，能有效加快负荷身份识别；而在直流侧连接家庭的储能设备与分布式电源。由于系统中存在交流母线和直流母线，仅需要稍加修改就能适应未来有可能出现的直流负荷、直流配网、交直流配网等。

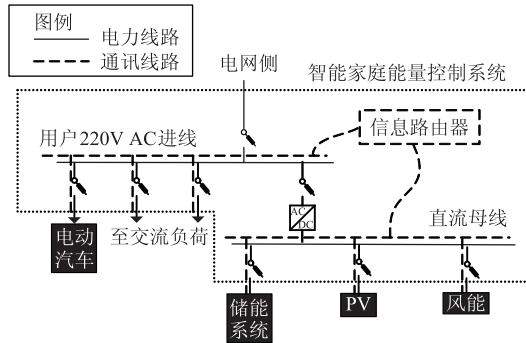


图 1 智能家庭能量管理拓扑结构

Fig. 1 Topology of home energy management system

智能家庭能量管理系统首先由外部电网的入户 220V 交流供电，入户线路上的可控开关负责控制系统工作在孤岛运行状态。系统中每条支路都安有可控开关，能量路由器可通过控制开关来投切设备或切除故障支路；同时通过电力电子换流器控制交流母线与直流母线间的能流传输与方向，从而控制整个系统与外界的能量交换。智能家庭能量管理系统需要是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统，所以完整的系统内除了图中的负荷、储能和电源等一次装置以外，还包含了监控、保护装置、通讯线路和控制系统等组成的二次设备。智能家庭能量管理系统的目的在于实现分布式电源和负荷的灵活调整与高效应用，解决数量庞大、形式多样的分布式电源消纳问题。

2.2 智能家庭能量管理系统的控制逻辑

在上文提出的智能家庭能量管理系统中，能流交换主要集中在分布式电源、外部电网、家庭负荷与家庭储能之间。对于整个家庭系统来说，其目的是在尽可能消纳更多的新能源的同时保证家庭运行成本的最小，表示为具体函数为

$$\lambda = \min\left(\int_0^T P_{in}(t)\delta(T)dt\right) \quad (1)$$

式中： P_{in} 为家庭向电网购入的功率； δ 为实时电价函数； T 为全部运行时间。

对于普通用户来说，最关心的还是电费问题，本节主要通过语言描述几种较有代表性情况下家庭

系统如何通过控制家庭能流减少家庭整体运行成本，并作为之后编写规则引擎的参考。同时，由于家庭分布式电源容量配置较小，在规则编制中我们更鼓励自发自用就地消纳。

① 当家庭内分布式电源发电量 P_{DG} 比家庭内负荷需求 P_L 高时，也就是 $P_{DG} - P_L > 0$ 时，家庭系统主要由分布式电源出力供电，此时换流器工作在逆变状态。为提高家庭内系统的可靠性仍保持与电网相连，当家庭储能 SOC 未达到较饱和状态且上网电价较低，多余电量通过家庭储能吸收；当家庭储能 SOC 未达到较饱和状态且上网电价较低，多余电量采用余量上网。

② 当 $P_{DG} - P_L > 0$ 时，如果此时家庭储能 SOC 已经饱和，则考虑余量上网，此时换流器工作在逆变状态，为家庭系统反送电量得到补贴。

③ 当 $P_{DG} - P_L < 0$ 时，系统考虑并网运行，如果此时储能 SOC 水平较低且电网电价也较低，可以考虑大量购入电网电量，此时换流器工作在整流状态，让储能设备储存低价的电量。

④ 家庭净负荷 $P_{DG} - P_L < 0$ 时，如果此时电价较低，但储能 SOC 较高，家庭购电较工况 3 减少，此时换流器工作在逆变状态，使得储能工作在放电状态。

⑤ 家庭净负荷 $P_{DG} - P_L < 0$ 时，如果此时储能 SOC 与电价都较高，可以考虑让换流器工作在逆变状态使得储能设备使用自身储存的低价电能提供一部分负荷功率，因此系统购电量能够得到减少。

⑥ 家庭净负荷 $P_{DG} - P_L < 0$ 时，如果此时电价较高，但储能 SOC 低，此时减少储能放电速度；当储能 SOC 过低时，为防止深放电，则被迫转向充电状态。

3 基于模糊控制的智能家庭能量控制策略

鉴于提出的智能家庭能量控制系统的硬件结构所涉及元件在不同家庭中的精确建模不尽相同，并且大部分用户不了解这些详细数据，我们采取模糊控制来协调家庭内的能量分配。模糊控制良好的鲁棒性可以很好地克服实际硬件中的随机噪声，由于不需要额外的预测数据输入，实时性也较强^[15]。

模糊控制的主要过程如图 2 所示。



图2 模糊控制流程

Fig. 2 Flow chart of fuzzy control

从前文控制逻辑来看,系统从外吸收功率(P_{in})主要与家庭净负荷(P_{net})、家庭储能 SOC 与实时电价(Price)相关。

3.1 系统变量及其隶属函数

基于模糊控制的智能家庭能量控制系统主要有3个输入变量:净负荷、储能 SOC 及实时电价;以及一个输出变量:购入功率。

本文将输入变量依据大小分为5个层次,以实时电价为例,将电价分为较低、低、正常、高以及较高。图3~图6为各个变量的隶属函数。

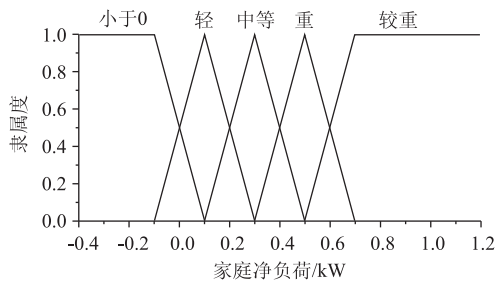


图3 家庭净负荷的隶属函数

Fig. 3 The membership functions of net load

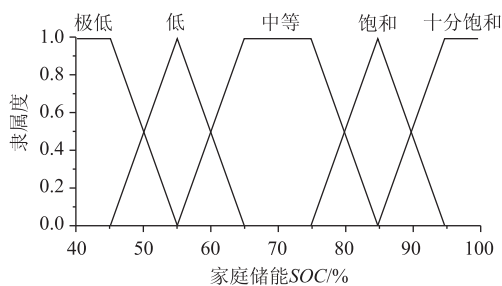


图4 家庭储能 SOC 的隶属函数

Fig. 4 The membership functions of the SOC of home energy storage

图7为电价与储能 SOC 为变量的曲面视图,可以看到曲面连续且较为光滑,控制性能较好。

要注意的是图8~图11中输出变量购入功率也是分为6个层次:分别为余量上网、无、少、中等、多与极多。为了在解模糊过程中在特定情况下稳定判断为断网运行,“无”的隶属函数与Y轴重合。

3.2 规则引擎的建立

由于输入变量有家庭净负荷、家庭储能 SOC

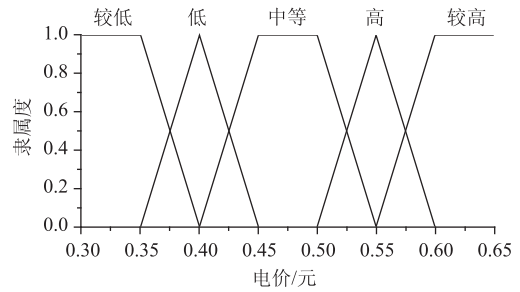


图5 实时电价的隶属函数

Fig. 5 The membership functions of real time electricity price

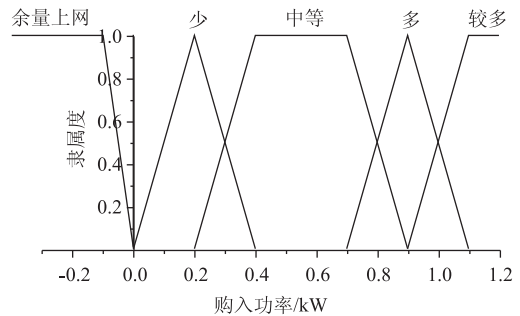


图6 系统购入功率的隶属函数

Fig. 6 The membership functions of purchased grid power

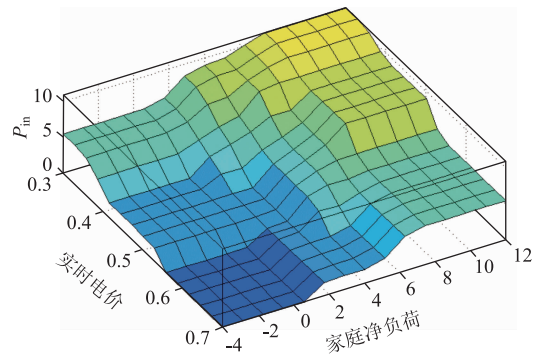


图7 推理逻辑的曲面视图

Fig. 7 Curved surface of the rule engine

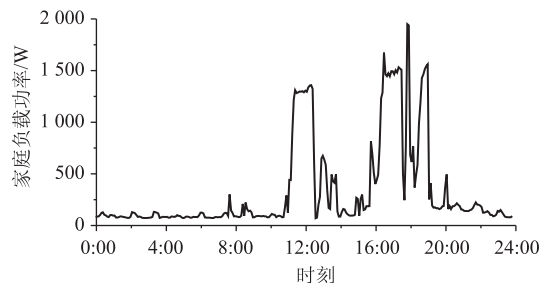


图8 家庭负荷曲线

Fig. 8 Load curve of a random household

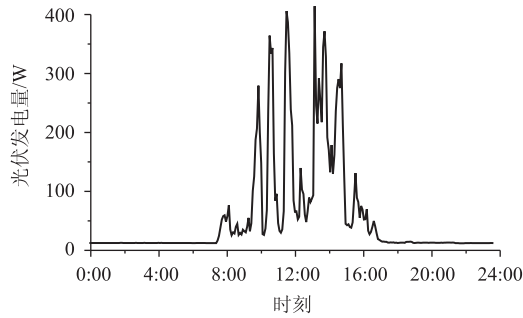


图 9 光伏发电量

Fig. 9 Photovoltaic output of a random household

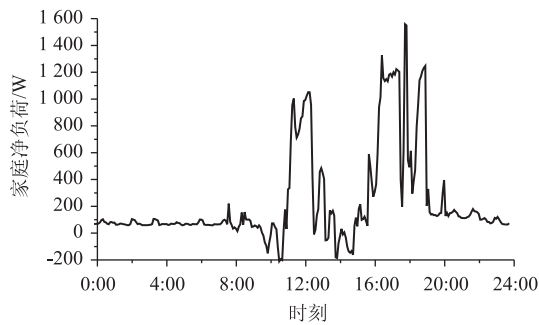


图 10 家庭净负荷

Fig. 10 Net load of a random household

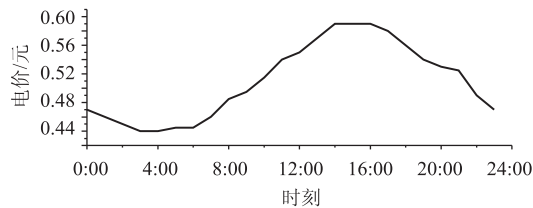


图 11 实时电价

Fig. 11 The input real time electricity price

以及实时电价 3 种，且每种变量被分为 5 个层次，所以最终组合方式有 $5^3 = 125$ 种，其详细规则如表 1~表 5 所示。

表 1 电价较低时的购入电量

家庭负荷	储能 SOC				
	极低	低	中等	饱和	十分饱和
小于 0	多	多	中等	少	余量上网
轻	多	多	中等	少	无
中等	较多	较多	多	中等	少
重	较多	较多	多	多	中等
较重	较多	较多	较多	多	中等

表 2 电价低时的购入电量

家庭负荷	储能 SOC				
	极低	低	中等	饱和	十分饱和
小于 0	多	中等	少	无	余量上网
轻	多	中等	少	少	无
中等	较多	多	中等	少	无
重	较多	较多	多	中等	少
较重	较多	较多	多	中等	少

表 3 电价中等时的购入电量

家庭负荷	储能 SOC				
	极低	低	中等	饱和	十分饱和
小于 0	中等	少	少	无	余量上网
轻	中等	中等	少	少	无
中等	多	中等	少	少	无
重	较多	多	中等	少	无
较重	较多	较多	多	中等	无

表 4 电价高时的购入电量

家庭负荷	储能 SOC				
	极低	低	中等	饱和	十分饱和
小于 0	少	少	无	余量上网	余量上网
轻	少	少	无	无	无
中等	中等	少	少	无	无
重	多	中等	中等	少	无
较重	较多	多	中等	少	无

表 5 电价较高时的购入电量

家庭负荷	储能 SOC				
	极低	低	中等	饱和	十分饱和
小于 0	少	无	无	余量上网	余量上网
轻	少	无	无	无	余量上网
中等	中等	少	少	无	无
重	多	中等	少	无	无
较重	较多	多	中等	少	无

4 仿真模拟

本文以来自澳大利亚珀斯市中一户带光伏逆变器的居民用户的日负荷数据与光伏发电量来计算家

庭净负荷,数据来源为PVOutput网站。电价数据为美国爱克斯龙旗下ComED公司所提供的日前电价预测曲线经处理之后的结果。

模糊控制器的隶属函数与规则引擎同前文所述,本文中模糊控制器中采用最大隶属原则,解模糊时采用重心法。储能设备初始SOC设为75%,容量为10kWh,充放电效率为85%,其主要模型如下:

$$SOC_{\min} \leq SOC_{\text{bat}} \leq SOC_{\max} \quad (2)$$

$$P_{\min} \leq P_{\text{ESS}} \leq P_{\max} \quad (3)$$

式中: SOC_{bat} 为家庭储能电池SOC, SOC_{\min} 与 SOC_{\max} 为电池充电的SOC上限与下限,在本文设置的规则引擎中,SOC将限制在50%~90%中。 P_{ESS} 为储能的充放电功率, P_{\min} 与 P_{\max} 为储能充放电功率的最大值,本文中取家庭净负荷隶属函数中自变量的最大值,即 $\pm 1.2\text{kW}$ 。

为了更好地模拟真实场景,我们采用与严格符合现实时钟的MT 9000实时仿真器作为模糊控制器,从上位机PC下发响应的家庭净功率与实时电价信号。具体实验框图如图12所示。

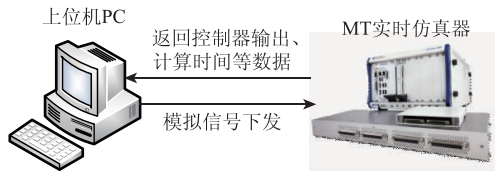


图12 实验设计图

Fig. 12 Simulation experiment design

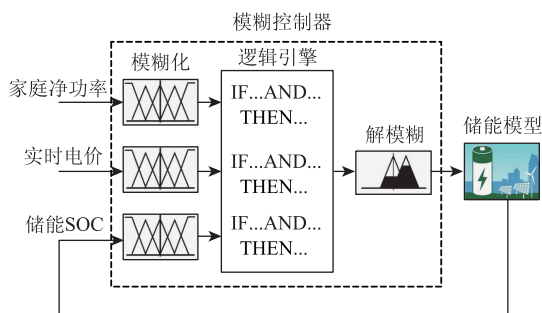


图13 模糊控制的闭环结构

Fig. 13 Close-loop structure of the fuzzy control

上位机PC发送模拟信号的程序采用LabView编写,MT实时仿真器运行的程序使用Labview RT进行编写,模拟数据的离散点之间采用样条插值进行补充。为了更好地模拟现场工况,所有数据

交互与控制模拟模块仅采用控制器的一核进行计算。

图14和图15为得到的结果。

从图15可以看出,智能家庭能量管理系统在0:00~10:00内利用外部低电价时段来购入廉价电力,在11:00~14:00与15:00~20:00这两段用电高峰,同时也是电价较高的时段内,通过释放储能内的低价电能,来减少系统对外部功率的需求,以此来减少家庭的电费开销,并且减少电网用电高峰时的负荷,完成自动需求响应。由于智能家庭能量管理系统将储能SOC在50%~60%之间视为SOC水平低,系统在用电高峰期间也能防止电池深放电。在21:00过后,实时电价开始下降,智能家庭能量管理系统开始向外部购电,在一天结束后储能设备SOC回到高的状态。

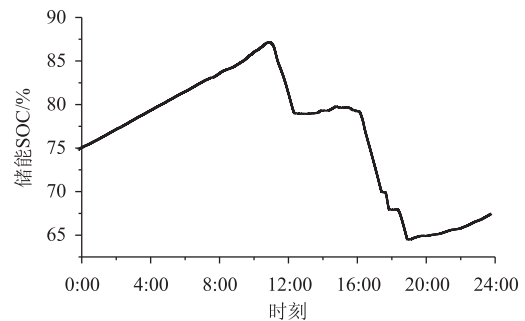


图14 家庭储能SOC曲线

Fig. 14 The SOC curve of home energy storage

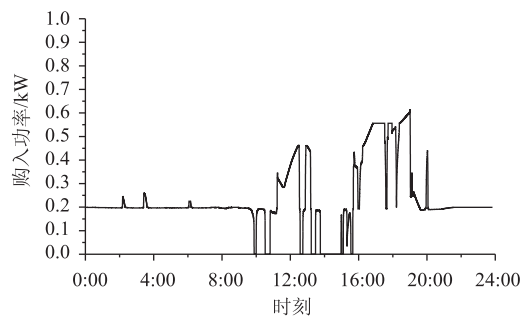


图15 家庭购入功率

Fig. 15 The purchased power of the household

通过仿真计算可以发现,原先家庭不采用智能能量管理系统时,一天家庭系统运行成本为3.207元;应用了上述能量管理系统时,全天电费为2.791元。适当调整家庭储能容量,系统将有更好的表现效果。表6为不同储能容量对家庭电费的影响。

表 6 家庭储能容量与电费的关系

Tab. 6 The relationship of electric bill and storage capacity

储能容量/kWh	全天运行成本/元
不使用能量管理系统	3.207
1.2	3.150
3.0	2.980
4.5	2.857
10	2.791

由于模糊控制器除模糊化和去模糊化，主要做出判断的逻辑引擎使用的是查表法，所以整体响应时间是有保障的。图 16 为在 MT 实时仿真器上每次循环花费的时间，MT 实时仿真器与现实严格时钟的误差可控制在微秒内。

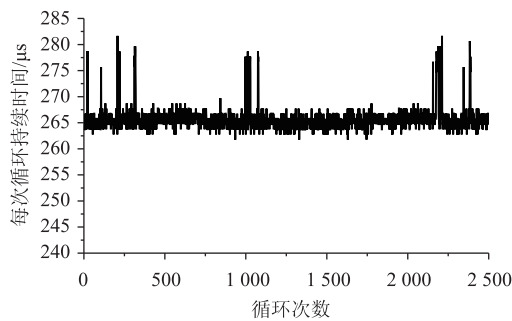


图 16 每次循环使用时间

Fig. 16 Time consumption of every loop

从图 16 可以看出，在单核上运行数据采集与模糊控制器每次响应时间在 $265\mu\text{s}$ 左右，整体计算资源使用较少，完全满足实际应用的要求。

同时，如果合理地调整隶属函数，也可做到优化家庭电费的作用。对于用户来说，可以自行根据经验对电价的隶属函数进行调整。在上述例子中，由于电价仅在 $0.40\sim 0.60$ 元/kWh 之间波动，如果将图 3 的隶属函数按比例放在该区间内，在家庭储能容量为 3kWh 的情况下，可以将电费减少到 2.946 元；或者用户按照生活经验，合理调整认为便宜或昂贵的电价范围，也可以做到更有效的优化。

采用 i7 四代处理器 8G 内存电脑对带 10kWh 储能的相同场景进行全天家庭能量管理优化的离线仿真，可以得到如下结果。

表 7 为预测值与实际值完全一样时的仿真结果，可以看出此时线性规划代表的最优化算法在优化效果上是稍微优于模糊控制的方法，但计算成本提高不少。

表 7 不同优化策略下的优化效果

Tab. 7 Optimizations of different optimizing strategy

家庭能量管理策略	全天运行成本/元	计算时间/s
不使用能量管理系统	3.207	—
线性规划	2.653	279.362
本文所采用的模糊控制	2.791	14.773

表 8 为在预测值中加入不同幅值的服从正太分布的随机误差后不同算法下的优化效果，可以看到虽然通过添加随机误差的方式产生的实际值与预测值的趋势还是相似的，峰谷出现的时段也基本相同，但随着实际输入与预测值的偏差增大，线性规划的优化效果比起模糊控制优势逐渐减少，当最后偏差值过大时，优化效果已经不如模糊控制，可以看出模糊控制更具稳定性。

表 8 随机波动下不同策略的优化效果

Tab. 8 Optimizations of different optimizing strategy under random fluctuation

随机波动程度/%	未经优化家庭成本/元	线性规划	模糊控制
± 10	3.196 7	2.666 9	2.860 0
± 30	3.067 8	2.850 5	2.823 3
± 50	3.403 2	3.105 6	2.939 7

5 结束语

本文经过对家庭能量管理系统与目前电力系统的现状分析，提出了一套具有实用价值的智能家庭能量控制系统拓扑及其控制方法。经过实际数据的仿真实验验证，结论表明该方法简单有效，有比较好的应用前景，可以有效地帮助用户自动进行电网互动，指导用户改变能源消费组成并减少电费开支。

参 考 文 献

- [1] 胡学浩. 智能电网——未来电网的发展态势 [J]. 电网技术, 2009, 33(14): 1-5.
HU Xuehao. Smart grid—a development trend of future power grid [J]. Power System Technology,

- 2009, 33(14): 1-5.
- [2] 张东霞, 姚良忠, 马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 1-14.
ZHANG Dongxia, YAO Liangzhong, MA Wenyan. Development strategies of smart grid in China and abroad [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 1-14.
- [3] 张国荣, 陈夏冉. 能源互联网未来发展综述[J]. 电力自动化设备, 2017(1): 1-7.
ZHANG Guorong, CHEN Xiaran. Future development of energy internet [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017(1): 1-7.
- [4] HUANG A. FREEDM system—a vision for the future grid [C] // Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2010: 1-4.
- [5] 魏懿. 基于需求响应的智能家庭能量管理研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2015.
- [6] STAMMINGER R, Broil G, Pakula C, et al. Synergy potential of smart appliances [J]. Report of the Smart—A project, 2008.
- [7] PIPATTANASOMPORN M, KUZLU M, RAHMAN S. An algorithm for intelligent home energy management and demand response analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2166-2173.
- [8] DU Pengwei, LU Ning. Appliance commitment for household load scheduling [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 411-419.
- [9] YIN Zhaojing, CHE Yanbo, HE Wei. A hierarchical group control method of electrical loads in smart home [C] // International Conference on Power Electronics Systems and Applications. IEEE, 2016: 1-6.
- [10] ZHANG Y, ZHANG T, WANG R, et al. An innovative real-time price based distributed optimal energy management of multi-microgrids in a smart distribution system [C] // Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT-Asia), 2016 IEEE. IEEE, 2016: 341-346.
- [11] BEAUDIN M, ZAREIPOUR H. Home energy management systems: a review of modelling and complexity [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 45: 318-335.
- [12] MOHSENZADEH A, SHARIATKHAH M H, HAGHIFAM M R. Applying fuzzy techniques to model customer comfort in a smart home control system [C] // International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. IET, 2013: 1-4.
- [13] WU Z, ZHANG X P, BRANDT J, et al. Three control approaches for optimized energy flow with home energy management system [J]. IEEE Power & Energy Technology Systems Journal, 2015, 2(1): 21-31.
- [14] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (freedm) system: the energy internet [J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 99(1): 133-148.
- [15] YAO L, LAI C C, LIM W H. Home energy management system based on photovoltaic system [C] // IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems. IEEE, 2015: 644-650.

收稿日期: 2017-11-15

作者简介:

李德智(1982—), 男, 硕士, 高级经济师, 研究方向为智能用电与需求响应, E-mail: lidezhi@epri.sgcc.com.cn;

董明宇(1988—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为智能用电技术, E-mail: dongmingyu@epri.sgcc.com.cn;

尹忠东(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为柔性输电技术和电能质量分析与控制技术, E-mail: yzd@ncepu.edu.cn.

(责任编辑: 林海文)