

DOI: 10.11992/tis.201705030

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1538.TP.20180127.1542.002.html>

需求侧管理下智能家庭用电多目标优化控制

鲍毅¹, 楼凤丹², 王万良³

(1. 杭州天丽科技有限公司, 浙江 杭州 310051; 2. 国网浙江省电力公司信息通信分公司, 浙江 杭州 310073; 3. 浙江工业大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023)

摘 要: 针对家庭内附加型负载进行需求侧管理, 缓解高峰时刻电网压力, 提出一种智能电网环境的家庭用电控制系统。设计了智能控制器, 可以获取用户家庭负荷信息并为用户提供分时电价计量, 同时便于供电侧直接进行需求侧控制。提出了多目标蜻蜓算法, 针对降低负载功率和减少需求响应延时时间两个目标进行求解, 其迭代速度快, 满足即时响应的需求。500 个家庭的实验结果显示, 家庭用电控制系统合理, 降低了用户用电费用; 算法计算速度快, 响应时间延时少, 有效缓解了高峰时刻的电网负荷。

关键词: 需求侧管理; 智能电网; 多目标决策; 优化控制; 蜻蜓算法; 家庭用电; 智能控制; 负载分类

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2018)01-0125-06

中文引用格式: 鲍毅, 楼凤丹, 王万良. 需求侧管理下智能家庭用电多目标优化控制[J]. 智能系统学报, 2018, 13(1): 125-130.

英文引用格式: BAO Yi, LOU Fengdan, WANG Wanliang. Multiobjective optimization control of intelligent household electricity with demand management[J]. CAAI transactions on intelligent systems, 2018, 13(1): 125-130.

Multiobjective optimization control of intelligent household electricity with demand management

BAO Yi¹, LOU Fengdan², WANG Wanliang³

(1. Hangzhou TianLi Electronic Technology co., LTD, Hangzhou 310051, China; 2. State Network Zhejiang Electric Power Corporation Information Communications Branch, Hangzhou 310073, China; 3. School of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In this paper, we propose a home electricity control system with a smart grid for managing the demand of home appliances and to ease the peak-time grid pressure. We designed an intelligent controller that can obtain user power information and provide users with time-sharing electricity metering, while also being convenient for suppliers to apply the demand management system. To reduce the load power and demand-response delay time, we propose a multi-objective optimization technique. Its convergence rate is rapid and it can satisfy the immediate response requirement. The results for 500 families taking part in the experiment show that the proposed household electricity control system is reasonable, reduces user electricity costs, and reduces the response time delay due to its fast calculation speed, thereby effectively alleviating the peak time of the power grid.

Keywords: demand management; smart grid; multi-objective decision; optimal control; dragonfly algorithm; household electricity; intelligent control; load classification

家庭用电系统作为需求侧的重要组成部分, 其规律性明显, 用户数目众多, 用电总量庞大, 也是电网负荷管理的重要部分。因此, 需求侧响应概念被

越来越多地引入到平衡电网负载中^[1]。现阶段需求响应操作主要可划分为基于价格的方式和基于激励的方式^[2]。基于价格的需求响应主要依靠分时电价策略, 依靠需求侧的主观调节方式来减少电网高峰负荷。基于激励的需求响应是指供电侧制定响应,

收稿日期: 2017-05-22. 网络出版日期: 2018-01-29.

基金项目: 国家电网公司科技项目 (SGZJ0000BGJS1500460).

通信作者: 王万良. E-mail: wangwanliang@zjut.edu.cn.

式, 为了使供电侧 (如电力公司等) 具有即时管理能力, 需要用户与供电侧签订合同, 使供电侧可以通过智能控制器, 直接控制用户家中的部分附加型负载。并且用户可以根据本家庭负载情况, 自主对家庭中多种大功率附加型负载进行权值设置^[11], 权值大的优先级高, 在用电高峰时期到来之前, 供电侧可以对权值较小的负载进行优先降负荷处理。

2.1 附加型负载系统模型

根据家庭用电负载的特点, 选取空调、热水器等附加型负载作为优化控制对象, 设置空调权重为 α_k , 热水器权重为 α_r 。

附加型负载耗电模型^[12-14]为

$$Q_t = (\sum_i \beta_d P_k + \sum_j \beta_e P_r) \cdot q_t \quad (1)$$

式中: P_k 为空调功率, P_r 为热水器功率, i 为空调数量, j 为热水器数量, q_t 为时段 t 内电价, β_d 和 β_e 均为负载的工作指数, Q_t 为时段 t 内附加型负载的耗电所产生的用电费用。该模型同样可以应用到电网系统集中控制中, 对多个家庭的用电负荷进行计量与优化, 同时也便于扩展其他类型的家用电器进行优化运算。其中, 用户家庭中当前用电功率为

$$W_t = \beta_d P_k + \beta_e P_r \quad (2)$$

式中 W_t 为时段 t 内用户的附加型负载总功率。

由于需求侧管理机制直接操作了用户家庭电器情况, 在一定程度上影响了用户体验, 引入最小操作量函数 Z :

$$Z = \Delta W \cdot T \quad (3)$$

$$\Delta W = W_t - W_x \quad (4)$$

式中: W_t 为控制器监测到时段 t 内, 电网负荷逼近高峰时刻需要进行需求管理时的家庭内负荷总功率, W_x 为用户端响应后, 对附加型负载进行调节后的家庭内负荷总功率; T 为响应总时间, 即在响应过程中对用户造成的总影响的时间; Z 为响应过程中, 供电侧为了削峰保护而对需求侧做出的管理后所节约的电能总量, 单位是 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

2.2 多目标蜻蜓算法

目前, 在家庭用电优化控制^[15]中主要采用的方法有粒子群算法^[16]和遗传算法^[17]等, 主要思想均是明确目标函数与约束条件信息, 在全局范围内寻求概率最大的解, 适合解决复杂的非线性寻优问题。但是考虑到需求响应的即时性, 即为了防止电网负荷达到峰顶, 需要在负荷增长的过程中就开始对协议用户进行一定量的响应控制。而粒子群算法和遗传算法均需要较长时间的初始化和迭代过程, 很难达到所要求分钟级别的响应时间, 因此需要计算时间更短、反应速度更快的多目标优化算法。

多目标蜻蜓算法是近年来新提出的一种进化算

法, 其主要灵感来自于蜻蜓在捕食与避敌过程中通过对路径的规划与探索来完成预定目标的特性, 在两者均需要达到最佳的时候选取最近的路径, 在此将捕食与避敌过程分别看成用户总耗电量和所受影响时间两个目标。在算法中, 将一系列过程抽象化为 3 个特征, 即分散、同步、汇聚, 并以数学方式建模。

将上述算法引入系统优化控制模型中, 将附加型负载的数量视为蜻蜓的数量, 耗电量和响应延时间视为捕食与避敌过程, 设定优化个体数量为 m , m 表示为家庭总数。针对系统负载影响最大的空调和热水器等附加型负载进行试验, 目标为耗电量最小和高峰时段需求响应时间最短。根据某用电监管平台数据, 对全天多户家庭负载功率数的平均值进行了统计。为了清晰描述出优化控制过程中的最小化负载数和最小化响应延时间这两个目标参数, 本文将用式 (5)~(11) 来对其进行模拟, 其表达式如下^[18-19]。

1) 分散行为:

$$S_i = - \sum_{j=1}^n X - X_j \quad (5)$$

式中: X 表示当前个体的位置, X_j 表示第 j 个相邻个体的位置, n 为相邻个体的总数。在本控制过程中, X_j 为 j 时段过程中系统的耗电量。

2) 同步行为:

$$A_i = \frac{\sum_{j=1}^n V_j}{N} \quad (6)$$

式中: V_j 表示第 j 个相邻个体的速度, n 为相邻个体的总数, N 为个体总数。在本控制过程中, 将其视为响应时的速度, 即智能控制器调节负载过程的行为。

3) 汇聚行为:

$$C_i = \frac{\sum_{j=1}^n X_j}{N} - X \quad (7)$$

式中: X 表示当前个体的位置, X_j 表示第 j 个相邻个体的位置, n 为相邻个体的总数, N 为个体总数。汇聚行为即表示优化过程中算法的收敛过程。

4) 优化过程:

蜻蜓在捕食过程中, 趋向于食物的定义为

$$F_i = \bar{X} - X \quad (8)$$

式中: X 表示当前个体的位置, \bar{X} 表示食物源的位置。在本控制过程中, 将 F_i 视为响应延时间, 为目标函数之一。

5) 避敌行为:

另一方面, 蜻蜓规避天敌的定义为

$$E_i = \tilde{X} + X \quad (9)$$

式中: X 为当前个体的位置, \tilde{X} 表示当前天敌的位

置。在本控制过程中,将 E_i 视为负载总功率数,为另一个目标函数。为了方便更新个体的位置,算法定义了步伐向量和位置向量,其具体定义为

$$\Delta X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + w\Delta X_t \quad (10)$$

式中: s 表示分散行为的权重, S_i 表示第 i 个个体行进行分散行为, a 表示同步行为的权重, A_i 表示第 i 个个体行进行同步行为, c 表示汇聚行为的权重, C_i 表示第 i 个个体行进行汇聚行为, f 表示食物特征系数, F_i 表示第 i 个个体的食物源, e 表示天敌特征系数, E_i 表示第 i 个个体天敌的位置, w 为迭代权重, t 为迭代计数。此外,位置向量定义为

$$X_{t+1} = X_t + \Delta X_{t+1} \quad (11)$$

综上,该算法可同时以两个目标为收敛条件,比传统优化算法收敛速度快,可以达到及时响应的效果。

具体算法步骤:

- 1) 算法读取当前系统耗电量, $S_t=Q_t$;
- 2) 读取当前系统响应时间, $E_t=Z$;
- 3) 输入待优化数目,初始设为 m , 设置空调和

热水器权值相等, $\alpha_k=\alpha_r$;

4) 根据式 (10)(位置和加速度) 对系统的耗电量和响应时间进行迭代计算,初始化迭代步数为 30;

5) 进行响应管理时刻,优先对权值较小的负载进行处理;

6) 选取收敛标准,当系统整体耗电量降为历史数据的 80% 时,即认为算法运行有效,选取所受影响时间最短的值作为输出结果。

3 仿真实验结果分析

通过对某小区内 500 余户家庭的家电负荷进行实地调查,排除照明设施等保障性负载,仅考虑空调和热水器两种负荷较大的家电。现有参数信息如表 1, 表 1 展示了某小区主要家电负荷信息统计,从中可以看出,虽然空调热水器作为附加型负载,但是居民的日常使用频率依然很高,且电器数量也超过了家庭总数。表 2 展示了该小区的分时电价信息。

表 1 某小区主要家电负荷信息统计

Table 1 Home appliance load information

用电器	总量	高峰时段 使用比例%	平均每天运行 时间 $t < 2$ h 的户数 所占比例%	平均每天运行 时间 $2 \text{ h} < t < 4$ h 的 户数所占比例/%	平均功率/ kW	高峰时段运行 时间 $t < 0.5$ h 的户 数所占比例/%	高峰时段运行 时间 $0.5 \text{ h} < t < 1$ h 户数所占比例/%
空调	768	65.7	23.5	67.4	1.87	53.2	40.5
热水器	513	48.4	13.7	53.8	1.26	61.6	14.9

表 2 分时电价信息

Table 2 Time-sharing electricity price

时段	时段划分	电价/元·度 ⁻¹
平时段	7:00-8:00	0.5
	11:00-15:00	
	22:00-23:00	
尖时段	19:00-22:00	0.9
峰时段	8:00-11:00	0.7
	15:00-19:00	
谷时段	23:00-次日 7:00	0.3

针对电网运行高峰时段,展示出对比响应前后的家庭附加型负载总功率数,如图 3 所示。从图 3 可明显看出,应用了本算法之后,相较于优化前和遗传算法情况,用户用电量的平均功率数有了明显下降。图 3 中“o”型曲线所显示的为优化前的 500 户用户的平均功率数,其分布较散,且均值较大。应用了遗传算法进行优化之后,用户的平均功率数下降了 20.6%,如图中“*”型曲线所示,而本算法则

有较好的处理效果,如图 3 中“+”型曲线所示。同时从用户角度出发,本文计算了高峰时刻用户用电所花费的情况,其对比结果如图 4 所示,图 4 展示了多目标优化后的用户平均花费情况。类似于图 3,图 4 中“o”型曲线为优化前高峰时段用户用电平均花费,“Δ”型曲线为应用遗传算法之后的效果,

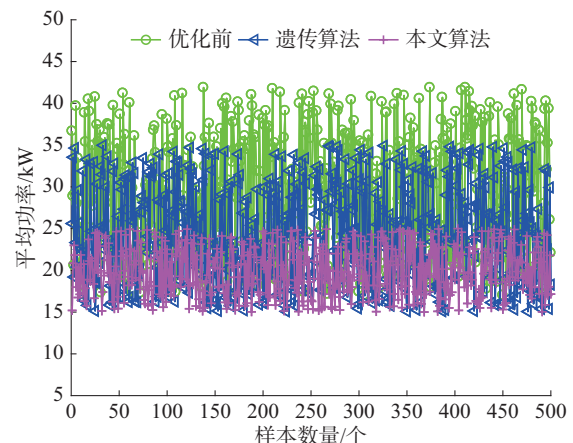


图 3 优化前后平均功率数对比

Fig. 3 Comparison of average power

“+”型曲线为本算法的应用效果,结果显示本算法也帮助用户节约了一定费用。为了展示本算法的运算过程,本文对遗传算法与本算法的延时时间进行了实验并统计了结果,平均延时时间如图5所示。

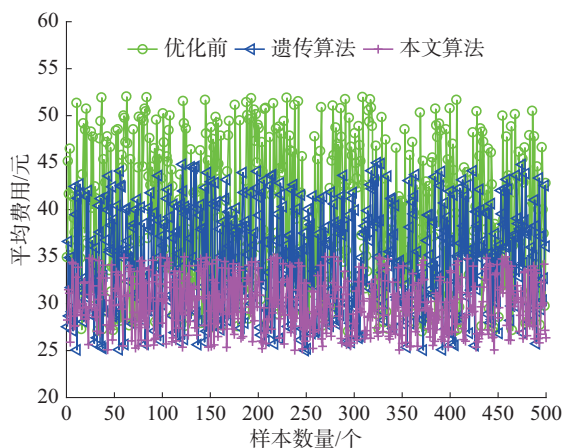


图4 优化前后用户用电花费对比

Fig. 4 Comparison of user electricity consumption

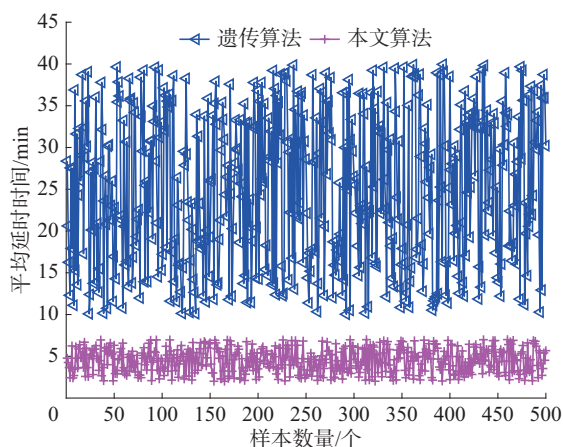


图5 平均延时时间对比

Fig. 5 Comparison of average delay times

从响应的延时时间角度可明显看出,传统遗传算法其响应时间长且波动较大,上下浮动在10~40 min,而实施本文算法之后,由于算法收敛速度快,计算结果迅速,其整体的响应时间在4.5 min上下波动,可以达到及时响应的效果。

针对一天内的高峰时刻电量消耗变化量,本文进行了500户家庭一天内各个时间段的电量消耗量的统计,结果如图6所示。图6显示了500户家庭在一天内各个时刻的平均电能消耗量与应用了遗传算法和本算法之后的效果对比。从图6中优化前的数据可以看出,每小时的平均电能消耗量(kW·h)在6:00之后有了明显的上升趋势,并且在12:00~13:00维持了较高的消耗量,一直持续到晚上21:00开始有了下降趋势。本算法的结果如图6中“+”形曲线所示,可以看出本算法在高峰时期的每小

时耗电量较为平稳,且相较于遗传算法优化结果和未优化前结果,本算法在高峰时期有较好的降负载效果。

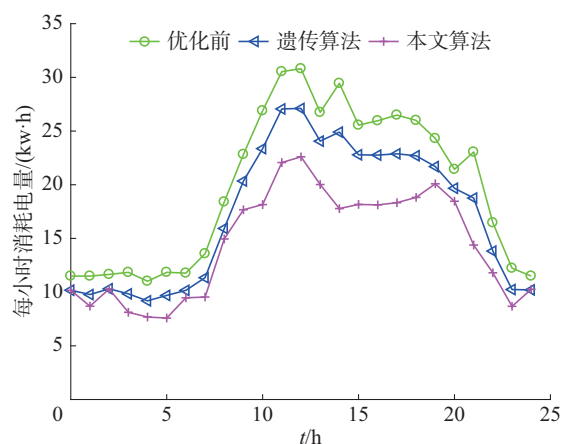


图6 一天内电量消耗情况

Fig. 6 Power consumption during one day

4 结束语

需求侧管理作为一种缓解电网高峰负荷的有效手段,一直以来面对着需求侧用户数量众多、单一耗电量低、应用困难的问题。在智能电网的环境下,在对需求侧众多用户应用了多目标优化算法之后,可以在较短的时间内得出计算结果并通过智能控制器对家庭用电器进行需求侧管理。实验结果显示,对小规模群体用户施行需求侧管理操作可以有效地降低其功率平均数,同时降低了用户的用电费用,进一步可以降低电网负荷,保障电网的稳定性。优化控制过程中引入多目标蜻蜓算法,在约束了系统耗电量降低的最低标准后,实验中算法收敛速度快,可以达到分钟级别的响应效果,适合在实际生活中应用。本实验尚存在一些不足,如尚未对多数小区同时进行需求响应的集中控制,下一阶段的主要目标是针对中大规模的家庭群进行需求响应优化控制。

参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会规划发展部. 2016年电力供需形势分析预测与建议[J]. 中国电力企业管理, 2016(4): 27-29.
China federation of electric power enterprise planning and development. 2016 Analysis and forecast of electricity supply demand and the suggestion[J]. China electric power enterprise management, 2016(4): 27-29.
- [2] SIANO P. Demand response and smart grids—a survey[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2014, 30: 461-478.
- [3] 薛晨, 黎灿兵, 曹一家, 等. 智能电网中的电网友好技术概述及展望[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 102-107.

- XUE Chen, LI Canbing, CAO Yijia, et al. An overview and prospects of grid friendly technology in smart grid[J]. Automation of electric power systems, 2011, 35(15): 102–107.
- [4] GUNGOR V C, SAHIN D, KOCAK T, et al. Smart grid technologies: communication technologies and standards [J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2011, 7(4): 529–539.
- [5] GKATZIKIS L, KOUTSOPOULOS I, SALONIDIS T. The role of aggregators in smart grid demand response markets[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2013, 31(7): 1247–1257.
- [6] IWAYEMI A, YI Peizhong, DONG Xihua, et al. Knowing when to act: an optimal stopping method for smart grid demand response[J]. IEEE network, 2011, 25(5): 44–49.
- [7] 刘壮志, 许柏婷, 牛东晓. 智能电网需求响应与均衡分析发展趋势[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1555–1561.
- LIU Zhuangzhi, XU Baiting, NIU Dongxiao. Development tendency of equilibrium analysis and demand response for smart grid[J]. Power system technology, 2013, 37(6): 1555–1561.
- [8] 王丹, 范孟华, 贾宏杰. 考虑用户舒适约束的家居温控负荷需求响应和能效电厂建模[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2071–2077.
- WANG Dan, FAN Menghua, JIA Hongjie. User comfort constraint demand response for residential thermostatically-controlled loads and efficient power plant modeling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2071–2077.
- [9] SAELE H, GRANDE O S. Demand response from household customers: experiences from a pilot study in norway [J]. IEEE transactions on smart grid, 2011, 2(1): 102–109.
- [10] 陆苏青, 唐楠, 王蓓蓓, 等. 美国需求响应技术和思考(下)[J]. 电力需求侧管理, 2016(1): 60–64.
- LU Suqing, TANG Nan, WANG Beibei, et al. Demand response technology and thinking in America[J]. Power demand side management, 2016(1): 60–64.
- [11] NORRIS S, PENDAKUR K. Imputing rent in consumption measures, with an application to consumption poverty in Canada, 1997–2009[J]. Canadian journal of economics/revue canadienne d'économie, 2013, 46(4): 1537–1570.
- [12] CONSTANTOPOULOS P, SCHWEPPE F C, LARSON R C. Estia: a real-time consumer control scheme for space conditioning usage under spot electricity pricing[J]. Computers and operations research, 1991, 18(8): 751–765.
- [13] LEE J, PARK G L, KIM S W, et al. Power consumption scheduling for peak load reduction in smart grid homes [C]//Proceedings of 2011 ACM Symposium on Applied Computing. TaiChung, China, 2011: 584–588.
- [14] NASIRAGHDAM H, JADID S. Load model effect assessment on optimal distributed generation (DG) sizing and allocation using improved harmony search algorithm[C]//Proceedings of 2013 Smart Grid Conference. Tehran, Iran, 2013: 210–218.
- [15] 张延宇, 曾鹏, 李忠文, 等. 智能电网环境下空调系统多目标优化控制算法[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1819–1826.
- ZHANG Yanyu, ZENG Peng, LI Zhongwen, et al. A multi-objective optimal control algorithm for air Conditioning system in smart grid[J]. Power system technology, 2014, 38(7): 1819–1826.
- [16] XIONG Gang, CHEN Chen, KISHORE S, et al. Smart (in-home) power scheduling for demand response on the smart grid[C]//Proceedings of 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Anaheim, CA, USA, 2011: 1–7.
- [17] MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W S, JATSKEVICH J, et al. Optimal and autonomous incentive-based energy consumption scheduling algorithm for smart grid[C]//Proceedings of 2010 Innovative Smart Grid Technologies. Gaithersburg, MD, USA, 2010: 1–6.
- [18] BASU B, MAHANTI G K. Thinning of concentric two-ring circular array antenna using fire fly algorithm[J]. Scientia iranica, 2012, 19(6): 1802–1809.
- [19] REYNOLDS C W. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model[C]//Proceedings of the 14th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York, NY, USA, 1987: 25–34.

作者简介:



鲍毅, 男, 1982 年生, 本科, 工程师, 高级经理, 主要研究方向为电力自动需求响应。



楼凤丹, 女, 1982 年生, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为电力自动需求响应。



王万良, 男, 1957 年生, 教授, 博士生导师, 博士, 主要研究方向为深度学习、人工智能、网络控制。