

12-12-2019

Multi Objective Flexible Load Scheduling in Smart Home Based on Grey Wolf Algorithm

Bao Yi

1. Hangzhou Telek Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;;

Dai Bo

2. State Grid Corporation of China at Hangzhou, Hangzhou 310007, China;;

Zhijia Wang

1. Hangzhou Telek Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;;

Wanliang Wang

3. Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Multi Objective Flexible Load Scheduling in Smart Home Based on Grey Wolf Algorithm

Abstract

Abstract: A three level electricity price model is designed based on the electricity consumption. A comfort model of multi parameters is designed for optimizing the grid load control of temperature and the humidity, light intensity and human activity. Grey wolf algorithm is used to solve the multi-objective problem. The grey wolf algorithm has its superiority in solving high dimensional and multi peak of complex function problems. Theoretical and experimental analysis shows that the grey wolf algorithm in accuracy and stability is better than particle swarm optimization algorithm and differential evolution algorithm. The simulation results show that the proposed algorithm can make user comfort and reduce the power consumption.

Keywords

grey wolf algorithm, multi objective, flexible load, smart grid, smart home

Recommended Citation

Bao Yi, Dai Bo, Wang Zhihua, Wang Wanliang. Multi Objective Flexible Load Scheduling in Smart Home Based on Grey Wolf Algorithm[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(6): 1216-1222.

基于灰狼算法的多目标智能家居负荷控制算法

鲍毅¹, 戴波², 汪志华¹, 王万良³

(1. 杭州天丽科技有限公司, 浙江 杭州 310012; 2. 国家电网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007;
3. 浙江工业大学计算机学院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为实现智能家居负荷智能控制, 以电器用电量为依据, 设计三级电价模型。设计多参数舒适度模型, 将开关电器和温度控制电器分类建模, 以智能设备收集的温湿度、光照强度、人体活动情况数据为基础进行负荷优化控制。采用灰狼算法对多目标问题进行求解, 灰狼算法在求解高维、多峰的复杂函数问题有其优越性, 理论和实验分析都证明灰狼算法在求解精度和稳定性均优于粒子群算法和差分进化算法等。经过实验仿真分析, 提出的算法能够兼顾用户舒适度的同时有效降低电器用电量。

关键词: 灰狼算法; 多目标; 柔性负荷; 智能电网; 智能家居

中图分类号: TP3-0 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 06-1216-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0188

Multi Objective Flexible Load Scheduling in Smart Home Based on Grey Wolf Algorithm

Bao Yi¹, Dai Bo², Wang Zhihua¹, Wang Wanliang³

(1. Hangzhou Telek Technology Co., Ltd., Hangzhou 310012, China; 2. State Grid Corporation of China at Hangzhou, Hangzhou 310007, China;
3. Computer Science & Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: A three level electricity price model is designed based on the electricity consumption. A comfort model of multi parameters is designed for optimizing the grid load control of temperature and the humidity, light intensity and human activity. Grey wolf algorithm is used to solve the multi-objective problem. The grey wolf algorithm has its superiority in solving high dimensional and multi peak of complex function problems. Theoretical and experimental analysis shows that the grey wolf algorithm in accuracy and stability is better than particle swarm optimization algorithm and differential evolution algorithm. The simulation results show that the proposed algorithm can make user comfort and reduce the power consumption.

Keywords: grey wolf algorithm; multi objective; flexible load; smart grid; smart home

引言

随着科技和时代的发展, 电网的智能化程度越来越高, 智能电网的建设促使电力控制进入了一个

新的时代^[1], 尤其是一些柔性负荷控制技术的发展, 如实时电价、直接负荷控制和可中断负荷控制技术^[2-3], 使电网的安全性得到增强的同时取得良好的经济效益。但是上述的几种方法控制手段比较单一, 并且都是从上至下的控制方法, 没有很好的体现智能电网的双向性和互动性^[4]。因此, 如何通过现有的互联网技术, 智能家居技术等获取用户数据, 实现双向的带有互动性的柔性负荷调控也是现在国内外研究者研究的重点之一^[5]。



收稿日期: 2017-06-01 修回日期: 2017-07-10;
基金项目: 国家电网公司科技项目(SGZJ0000BGJS1500460);
作者简介: 鲍毅(1982-), 男, 浙江杭州, 本科, 工程师, 研究方向为电力自动化、需求响应; 戴波(1969-), 男, 浙江杭州, 本科, 高工, 研究方向为电力系统及其自动化; 汪志华(1986-), 女, 浙江杭州, 硕士, 工程师, 研究方向为需求侧管理。

<http://www.china-simulation.com>

• 1216 •

目前, 已经有一些研究利用遗传算法、粒子群算法、微分进化算法等群智能优化算法针对电力负荷模型与时间、电价、用户舒适度等存在的联系进行研究, 寻找高效安全的柔性负荷控制方法。文献[6]提出了一种多时间尺度负荷协调调度策略, 通过对风力发电的不确定性进行建模, 针对不同时间尺度进行负荷调度, 从而达到提高电网稳定性的目的; 文献[7]建立了一种需求侧负荷电价模型, 通过改进的遗传算法实现了平衡用电供需要求和最小化用电成本双重目标的规划问题。但是没有对用户电器使用习惯进行考虑, 存在用户舒适度降低的问题; 文献[8]针对空调进行多目标调度, 在根据室外温度预测值和实时电价信号等参数最小化电价基础上, 增加用户舒适度目标, 使用改进的粒子群算法进行多目标模型的求解, 实现优化电价和兼顾用户舒适度的多目标控制机制。但没有对峰谷电价进行考虑, 且使用的粒子群算法在求解精度和稳定性方面表现不佳。另外, 随着智能家居和云计算技术的发展, 柔性负荷的分布式架构因为可以摆脱地理限制得到越来越多的应用, 也可以将大量的电器连入到系统中, 使得负荷控制更加有效; 智能家居设备可以提供更多的环境参数使负荷控制更加精准。

因此, 本文提出一种分布式控制架构, 采用一种智能传感设备收集用电设备的负荷信息、室内温度、光线强度、人体活动情况等, 结合提出的三级电价模型和多参数舒适度模型, 以电价和人体舒适度为目标, 采用改进的灰狼算法^[9]对该多目标优化控制模型进行求解。

1 分布式控制架构

负荷控制架构主要有集中式控制架构和分布式控制架构。其中集中式架构是由调度中心发起控制信息, 对用电设备进行调控, 但不适用于大规模的用电网络中; 分布式架构可以通过网络的方式对不同设备进行控制, 其优势在于可以摆脱地理位置的限制, 实现远距离的设备控制, 但也需要面对控

制不稳定、控制设备冲突等问题, 在设计的过程中需要根据具体环境和设备负荷类型进行动态调整。文献[10]提出了利用智能电表对家庭用户的电力负荷进行监控。但是该设备智能电表只能控制用电设备的通断, 能够控制的电器数量也十分有限; 文献[11]设计了一种嵌入用电设备内部的控制器以实现分布式控制, 但是需要对原有电器进行大幅度的改造, 在实际的应用中效率较低。

因此, 为了克服上述的缺点, 本文设计采用了一种智能开关, 能够在不改造原有的用电设备的情况下, 通过红外、通断完成对单个或多个用电设备的控制。在智能开关中增加了多种智能传感器, 用于监测用电设备的负荷, 并可收集环境的温度、光照情况、人体活动情况。同时, 设备中内置 WIFI 模块, 连入互联网后可进行远程控制和集中控制。在该智能开关的基础上, 本文设计了一套三层智能家居分布式负荷控制系统如图 1 所示。

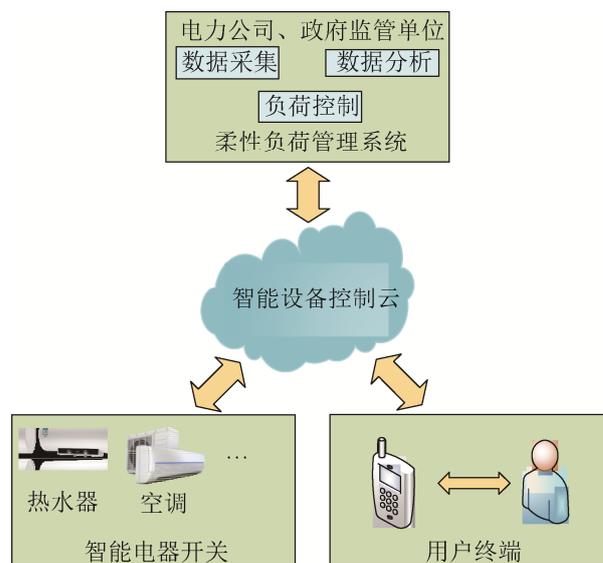


图 1 智能家居分布式控制系统

Fig. 1 Distributed control system in smart home

设计的分布式控制系统主要分 3 层, 包括响应层、智能设备控制云、控制层。其中响应层包含智能电器开关和用户终端, 智能电器开关安装有红外控制装置, 可以实现对如空调、热水器、电视等电器的操作, 内置的智能传感器可以同时监测电器用

电负荷、室内温度、光照情况和人体活动情况，智能电器开关通过联网的方式可以进行远程控制，用户可以通过智能手机或平板电脑对电器终端进行控制；智能设备控制云主要分为 3 部分，其中用户数据区用于存储使用智能设备的用户数据，远程设备可以通过验证该部分的数据信息实现对智能电器开关的控制。设备数据区用以存储来自智能电器开关的数据，为负荷控制算法的运算提供数据。云数据区数据获取来自互联网的数据信息，比如实时的天气情况、其他地区的用电情况等。控制层为柔性负荷管理系统，主要进行负荷预测、需求响应、智能决策等操作，通过有效数据和设计的灰狼算法进行柔性符合控制。

2 多目标模型

2.1 三级电价模型

合理的电价模型能够有效帮助管理者减少高峰用电、提高负荷因数、节约电力成本的同时，帮助用户节约用电费用。最佳的电价模型是根据实际电力需求和电力中各类能源的比例进行实时电价调整，即实时电价^[12]。但是在实际的操作过程中，由于各方面的限制，很难直接进行实时电价的制定，过于碎片化的定价策略反而会产生一些不良反应，甚至导致用电成本的迅猛增长。根据采用的分布式负荷控制架构，结合智能开关的功能和特点，保证合理定价的同时不让定价策略不过于碎片化，本文设计一种小时级的三级电价模型，分别对高峰时段、低峰时段、静默时段进行分级定价，其模型如下：

$$O^h(C_e^h) = \begin{cases} \alpha^h, & \text{if } 0 \leq C_e^h \leq \delta_1^h \\ \beta^h, & \text{if } \delta_1^h < C_e^h \leq \delta_2^h \\ \gamma^h, & \text{if } C_e^h > \delta_2^h \end{cases} \quad (1)$$

式中： $O^h(C_e^h)$ 为定价函数， h 为 0~24 h 之间的时间， C_e^h 为某一用户所有用电设备的用电总和，计算方法如下：

$$C_e^h = \sum_{i=1}^n d_i^h \quad (2)$$

式中： n 表示用户拥有的用电设备数； d_i^h 表示每个用电设备某时刻的用电量； δ_1^h 和 δ_2^h 是分级用电门限值； α^h ， β^h 和 γ^h 分别是三级用电价格。

另外，由于系统会根据设备用电情况进行实时变动，分级电价无法无缝切换，即存在一部分误差，该误差模型为：

$$C_e^h = \sum_{i=1}^n \lambda_i^h d_i^h \quad (3)$$

式中： λ_i^h 为每个设备在 h 时间的延迟系数，且 $\lambda \geq 0$ 。

综上所述，可以得到完整的电价模型：

$$E = \sum_{h=1}^H \left(O^h \left(\sum_{i=1}^n d_i^h \right) \sum_{i=1}^n d_i^h + O^h \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i^h d_i^h \right) \sum_{i=1}^n \lambda_i^h d_i^h \right) \quad (4)$$

2.2 多参数舒适度模型

设计的智能开关获取的可用参数有室内外温度、光照情况、人体活动情况，其中室内外温度以正常温度表示，光照情况通过 5 级光照强度表示：

$$L = [5, 4, 3, 2, 1] \quad (5)$$

其中，数值越大表示光线强度越大，人体活动情况通过存在与否表示：

$$\Lambda = \begin{cases} 0, & \text{if 有人} \\ 1, & \text{if 无人} \end{cases} \quad (6)$$

人体对电器的舒适度主要包括两部分，一种是对例如电视机、照明等的开关舒适度，一种是对空调、热水器等的控温舒适度。首先，针对开关类电器模型，通过判断在过去半个小时内光线和人体活动情况进行选择通断，模型如下：

$$\mu_i^h = \begin{cases} 0, & \text{if } \int_{h-0.5}^h L_i^h \Lambda_i^h < \varepsilon \\ 1, & \text{if } \int_{h-0.5}^h L_i^h \Lambda_i^h > \varepsilon \end{cases} \quad (7)$$

式中： μ_i^h 表示 h 时刻电器的开关情况； ε 为门限值。因此，开关电器的舒适度参数可表示为：

$$t_k = \sum_{i=1}^m \sum_{h=0}^H 0.5 \mu_i^h \quad (8)$$

式中: m 为开关电器数量, 由于电器的开关会引起用户的舒适度降低, 开关次数越多, 用户的舒适度越低。

针对温度控制电器, 通过引入舒适度指标对其进行控制, 设电器设定温度为 T_i^h , 室内温度为 T_{in}^h , 室外温度为 T_{out}^h , 并设定人体舒适上限温度为 ΔT_1 , 下限温度为 ΔT_2 , 所以确定其舒适度函数如下:

$$\phi_i^h = \begin{cases} T_i^h - T_{in}^h - \omega_i (T_{out}^h - T_{in}^h), \\ \text{if } T_{in}^h < T_i^h - \Delta T_2 \\ 0, \text{if } T_i^h - \Delta T \leq T_{in}^h \leq T_i^h + \Delta T_1 \\ T_{in}^h - T_i^h - \omega_i (T_{out}^h - T_{in}^h), \\ \text{if } T_{in}^h > T_i^h + \Delta T_1 \end{cases} \quad (9)$$

另外, 通过人体感应器等也可对舒适度进行优化, 可对温度控制电器同样进行通断的设置, 在半小时内没有检测到人体活动时进行关闭设置, 其函数如下:

$$v_i^h = \begin{cases} 0, \text{if } \int_{h-0.5}^h \Lambda_i^h < \sigma \\ 1, \text{if } \int_{h-0.5}^h \Lambda_i^h > \sigma \end{cases} \quad (10)$$

式中: v_i^h 为电器开关情况; σ 为人体活动情况门限值。因此, 温度控制电器的舒适度参数可表示为:

$$t_c = \sum_{i=1}^{n-m} \sum_{h=0}^H 0.5 v_i^h \phi_i^h \quad (11)$$

因此, 整体的多参数舒适度模型可表示为:

$$t_k + t_c = \sum_{i=1}^m \sum_{h=0}^H 0.5 \mu_i^h + \sum_{i=1}^{n-m} \sum_{h=0}^H 0.5 v_i^h \phi_i^h \quad (12)$$

2.3 电价及舒适度多目标模型

在得到上述的电价和舒适度模型后, 以最小化目标函数(4)(12)为目的, 得到电价及舒适度多目标模型表达可如公式(13)所示。

$$Q_k = \min(E) + \min(t_k + t_c) = \min \left(\sum_{h=1}^H \left(\mathcal{O}^h \left(\sum_{i=1}^n d_i^h \right) \sum_{i=1}^n d_i^h + \mathcal{O}^h \left(\sum_{i=1}^n \lambda_i^h d_i^h \right) \sum_{i=1}^n \lambda_i^h d_i^h \right) \right) + \min \left(\sum_{i=1}^m \sum_{h=0}^H 0.5 \mu_i^h + \sum_{i=1}^{n-m} \sum_{h=0}^H 0.5 v_i^h \phi_i^h \right) \quad (13)$$

3 灰狼算法求解多目标负荷控制

灰狼算法(Grey Wolf Optimizer)^[9]在 2014 年由 Mirjalili 提出的。该算法的主要灵感来源是灰狼群体的领到和狩猎技术。如图 2 是灰狼群体的等级模型, 其中 α 称为头狼, 是整个灰狼群体的领导者, 对应模型中的最佳解决方案。 β 是 α 下属的灰狼, 协助 α 进行决策, 同时 β 可以指挥下属的普通狼 δ , ω 为最低层的狼, 帮助上层的灰狼进行决策和捕食。

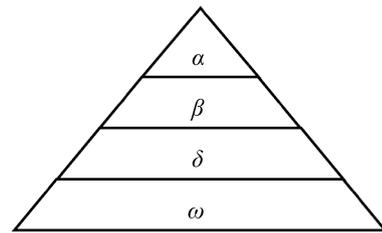


图 2 灰狼群体的等级划分
Fig. 2 Hierarchy of the grey wolf group

为了更好地理解灰狼算法工作的机理, 其数学模型可以表示成:

$$\bar{D} = |\bar{C} \cdot \bar{X}_p(t) - \bar{X}(t)| \quad (14)$$

$$\bar{X}(t+1) = \bar{X}_p(t) - \bar{A} \times \bar{D} \quad (15)$$

式中: t 表示当前迭代的次数; \bar{X}_p 是猎物的位置向量; \bar{X} 是灰狼的位置向量; \bar{A} 和 \bar{C} 是影响因子向量, 可分别表示为:

$$\bar{A} = 2\bar{a} \cdot \bar{r}_1 - \bar{a} \quad (16)$$

$$\bar{C} = 2 \cdot \bar{r}_2 \quad (17)$$

式中: \bar{a} 根据迭代的次数从 2 到 0 线性下降; \bar{r}_1 和 \bar{r}_2 是 0 到 1 的随机数。

灰狼算法的最终目的是为了寻求最优解。这种算法不仅能够获取前 3 个最好的解, 并且可以迫使搜索代理更新他们的位置, 即让低层灰狼不断寻找猎物的最优解, 以下的过程很好的解释了灰狼算法最优解寻找过程:

$$\bar{D}_\alpha = |\bar{C}_1 \cdot \bar{X}_\alpha - \bar{X}| \quad (18)$$

$$\bar{D}_\beta = |\bar{C}_2 \cdot \bar{X}_\beta - \bar{X}| \quad (19)$$

$$\bar{D}_\delta = |\bar{C}_3 \cdot \bar{X}_\delta - \bar{X}| \quad (20)$$

$$\bar{X}_1 = \bar{X}_\alpha - \bar{A}_1 \cdot \bar{D}_\alpha \quad (21)$$

$$\bar{X}_2 = \bar{X}_\beta - \bar{A}_2 \cdot \bar{D}_\beta \quad (22)$$

$$\bar{X}_3 = \bar{X}_\delta - \bar{A}_3 \cdot \bar{D}_\delta \quad (23)$$

$$\bar{X}(t+1) = (\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3) / 3 \quad (24)$$

灰狼算法的搜索性由因子 \bar{A} 保证, 通过大于 1 或者小于 -1 的随机数迫使搜索算子分开寻找猎物。而算法的另一个因子 \bar{C} 作为一个权重因子, 用来标记搜索的方向。特别的是, 相对于 \bar{A} 来说 \bar{C} 不是线性下降, 而是通过随机值来保证不产生局部最优解。灰狼算法的具体算法流程如图 3 所示。

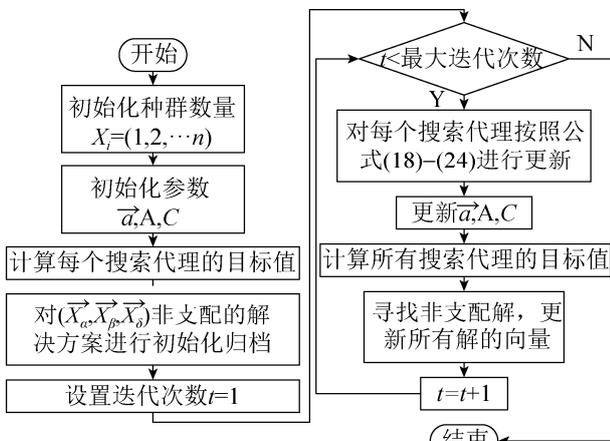


图3 灰狼算法运行算法流程

Fig. 3 Process of grey wolf algorithm

4 仿真与实验

4.1 实验环境及条件

为了验证本文提出的多目标模型和灰狼算法求解负荷控制的有效性, 使用 Matlab 进行了仿真实验, 计算机环境为 Windows 7(64 bit), 硬件配置为 Intel i7-6700HQ, 内存大小为 8G。并将设置好的分布式控制系统, 实地进行数据采集和实验。

4.2 实验数据

实验数据主要来自某地区多个家庭用户 2016 年 7、8 月的真实电力负荷信息、室内外温度、房间内光照情况、人体活动情况等。其中, 一部分用户为对比用户, 不采用设计的多目标负荷控制算法对电力负荷进行优化控制, 一部分用户为实验用

户, 配置了分布式控制系统和相应的算法。

4.3 仿真结果

本文对电价单目标和电价、舒适度双目标两种情况下进行了实验仿真。图 4 对单目标、多目标两种情况下对用户用电负荷数据进行的仿真对比, 可以看出两种方法都有效降低了用电的负荷量, 有效节约了电能。从图 4 可以看出, 随着时间的变化, 电力负荷会出现明显的波动, 符合用户的日常用电习惯; 其中多目标控制降低的用电负荷低于电价单目标降低的用电负荷, 因为多目标控制同时需要兼顾用户的舒适度, 这需要通过增加电费为代价, 例如减少电器开关次数、提高空调温度等; 在部分的用电高峰, 算法能够更加有效控制负荷, 降低能耗。图 5 为单目标和多目标对人体舒适度的对比分析, 可以看出, 多目标控制相比于电价单目标控制更能保证用户的舒适度。

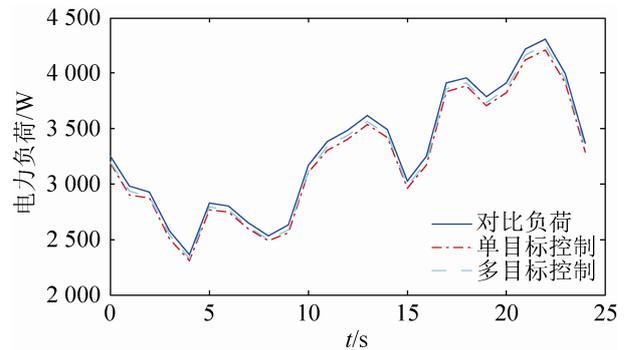


图4 用电负荷仿真图

Fig. 4 Simulation of power load

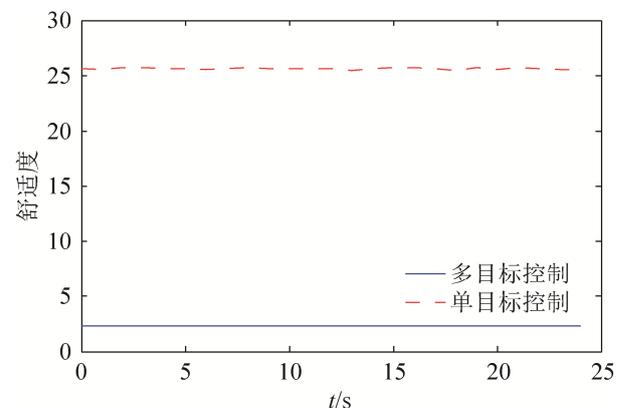


图5 舒适度仿真图

Fig. 5 Simulation of comfort

表 1 给出了不同控制方法的平均数据仿真结果, 可以得出, 单目标控制方法以将平均负荷从 3.29 kW 降低到 2.42 kW, 而多目标控制将平均用电负荷从 3.29 kW 降低到 2.83 kW。在单目标进行控制时, 平均人体舒适度的因子为 2.3, 而在使用多目标控制后人体舒适度得到了很高的提升, 平均舒适度为 25.7。

表 1 不同控制方法的仿真结果

Tab. 1 Simulation results of different control methods

控制模式	平均负荷/kW	舒适度
无	3.29	0
单目标控制	2.42	2.3
多目标控制	2.83	25.7

4.4 实验对比

目前已经有部分的研究对一些电器进行了智能优化控制, 本节将本文提出的算法与其他算法进行比较。文献[7]提出一种针对空调的多目标控制算法(MOCA_CS 算法), 通过电价、室内外温度对空调进行多目标求解, 并使用改进的粒子群算法进行求解。图 6 是本算法和 MOCA_CS 算法在多目标的情况的用电负荷对比图, 从图 6 可看到本算法要对对电力负荷的控制优于 MOCA_CS 算法。

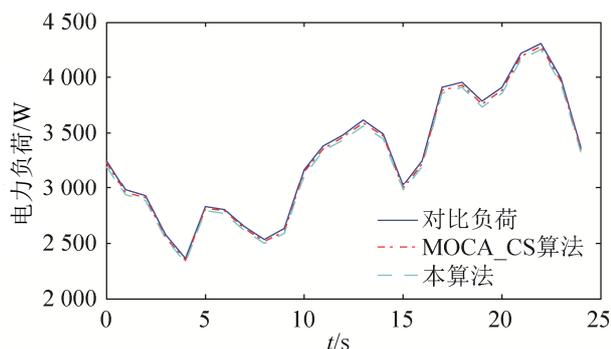


图 6 本算法与 MOCA_CS 算法多目标控制对比

Fig. 6 Multi-objective control comparison with MOCA_CS algorithm

图 7 是本算法和 MOCA_CS 算法在单目标的情况的用电负荷对比图, 从图 7 无法明显判断两者算法的优劣。因此, 在表 2 中将两种算法不同目标的平均负荷降低量和平均舒适度作为参考结果, 可

以从表中看出, 本文算法在各方面都要优于 MOCA_CS 算法。一方面, 本文算法在定价模型方面, 根据实时的用电负荷进行建模; 另一方面, 本文算法考虑了更多的参数, 包括光照强度、人体活动情况等, 并对开关电器和温度控制电器进行分别的建模分析, 所以拥有更好的节能效果和用户舒适度。

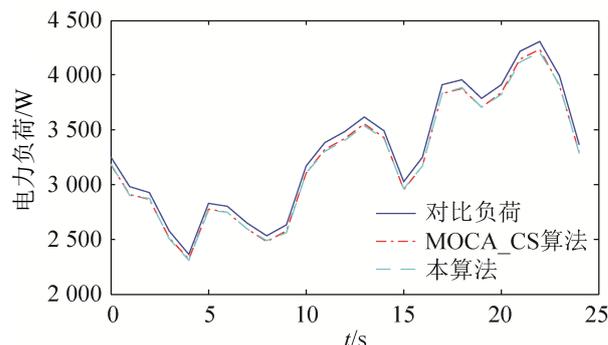


图 7 本算法与 MOCA_CS 算法单目标控制对比

Fig. 7 Single-objective control comparison with MOCA_CS algorithm

表 2 本算法与 MOCA_CS 算法对比结果

Tab. 2 Comparison with MOCA_CS algorithm /%

控制模式	用电量降低百分比	舒适度提高
本算法多目标	14.05	91.05
本算法单目标	22.35	
MOCA_CS 算法多目标	6.74	87.72
MOCA_CS 算法单目标	20.07	

5 结论

柔性负荷控制的发展, 改变了常规跟踪负荷变化的运行模式, 结合现有的计算机网络技术、智能开关和智能传感设备可以有效控制电网运行状态。本文设计了三层架构的分布式控制模型, 设计的智能开关能够收集环境数据用以智能柔性符合控制。本文设计了基于电价和多参数舒适度的多目标模型, 利用更多从智能传感设备获得的参数进行多目标优化, 并采用灰狼算法进行求解。在多目标优化中, 相比其他算法多考虑了室内外温度、光照情况、人体活动情况等。

实验结果表明: 相比与传统的控制方法和单目

标控制方法, 本文提出的方法可以降低用电成本的同时满足用户的舒适度要求; 相比一些单一参数优化的多目标方法, 本文提出的方法能够实现更好的经济效益, 提高用户的舒适度。

参考文献:

- [1] Heleno M, Matos M A, Lopes J A P, et al. Estimating the flexible residential load using appliances availability[C]// Power Engineering and Optimization Conference. IEEE, 2014: 352-357.
- [2] 高雪莹, 唐昊, 苗刚中, 等. 储能系统能量调度与需求响应联合优化控制[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(5): 1165-1172.
Gao Xueying, Tang Hao, Miao Gangzhong, et al. Joint optimization control of energy storage system management and demand response[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(5): 1165-1172.
- [3] 高元海, 王淳, 游宇堃, 等. 满足辐射状约束的编码和遗传算子及其在配电网重构中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(1): 234-242.
Gao Yuanhai, Wang Chun, You Yukun, et al. Coding and genetic operators of satisfying network radial constraint and application in distribution network reconfiguration[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2016, 36(1): 234-242.
- [4] Laki E, Arta G, Gubina A F. Agent-based modeling of the demand-side system reserve provision [J]. Electric Power Systems Research (S0378-7796), 2015, 124: 85-91.
- [5] 王远, 陶焯, 袁军, 等. 一种基于 HBase 的智能电网时序大数据处理方法[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(3): 559-568.
Wang Yuan, Tao Ye, Yuan Jun, et al. Approach to process smart grid time-serial big data on HBase[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(3): 559-568.
- [6] 杨胜春, 刘建涛, 姚建国, 等. 多时间尺度协调的柔性负荷互动响应调度模型与策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3664-3673.
Yang Shengchun, Liu Jiantao, Yao Jianguo, et al. Model and strategy for multi-time scale coordinated flexible load interactive scheduling[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2014, 34(22): 3664-3673.
- [7] 阮冰洁, 杨强, 颜文骏. 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): 857-862.
Ruan Bingjie, Yang Qiang, Yan Wenjun. Demand response under real-time price for domestic energy system[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(6): 857-862.
- [8] 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.
- [9] Mirjalili S, Mirjalili S M, Lewis A. Grey Wolf Optimizer[J]. Advances in Engineering Software (S0965-9978), 2014, 69(3): 46-61.
- [10] Logenthiran T, Srinivasan D, Shun T Z. Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization [J]. IEEE Transactions on Smart Grid (S1949-3053), 2012, 3(3): 1244-1252.
- [11] Luo F, Zhao J, Wang H, et al. Direct load control by distributed imperialist competitive algorithm[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy (S2196-5625), 2014, 2(4): 385-395.
- [12] Liu G, Tomsovic K. A full demand response model in co-optimized energy and reserve market[J]. Electric Power Systems Research (S0378-7796), 2014, 111(2): 62-70.