

# 智能电网环境下家庭能源管理系统优化调度算法

张延宇<sup>1,2,3</sup>, 曾鹏<sup>1</sup>, 臧传治<sup>1</sup>

(1. 网络化控制系统重点实验室, 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 河南大学计算机与信息工程学院, 河南 开封 475004; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 在智能电网环境下, 提出了一种家庭能源管理系统框架和优化调度算法。根据室外温度预测值、可再生能源功率输出预测值、日前电价信号和用户偏好, 算法对可调度用电负载、电动汽车、储能系统的运行进行优化调度从而最小化用户用电费用。算法考虑了电动汽车在高电价时段通过 V2H(vehicle to home, V2H)功能向负载供电的情形, 采用情景分析法处理室外温度和可再生能源功率输出预测的不确定性。通过仿真实验验证了算法性能, 结果表明与只对负载或家庭能源管理系统部分组成部件进行优化调度的算法相比, 所提算法显著降低了用电费用。

**关键词:** 智能电网; 需求响应; 家庭能源管理系统; 粒子群算法; V2H

## A scheduling algorithm for home energy management system in smart grid

ZHANG Yanyu<sup>1,2,3</sup>, ZENG Peng<sup>1</sup>, ZANG Chuanzhi<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Networked Control System, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** To minimize electricity fee of a residential user, a framework and a scheduling algorithm for home energy management system (HEMS) in smart grid are proposed. The algorithm controls loads, plug-in hybrid electric vehicle(PHEV), and energy storage system according to predicted outdoor temperature, renewable resource power output, day-ahead electricity price, and user preferences. In this algorithm, the PHEV can supply stored power to other loads through V2H(vehicle to home, V2H) in high electricity price periods. Scenario analysis technique is utilized to cope with the uncertainty due to the error of predicted outdoor temperature and renewable resource power output. The effectiveness of the algorithm is verified by simulation, and simulation results show that compared to other algorithms which only control loads or parts of HEMS, it can reduce the electricity fee significantly.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA040103), National Natural Science Foundation of China (No. 61233007 and No. 61300215), and Important National Science and Technology Specific Project (No. 2013ZX03005004).

**Key words:** smart grid; demand response; home energy management system; particle swarm optimization; V2H

中图分类号: TM73

文章编号: 1674-3415(2016)02-0018-09

## 0 引言

智能电网环境下, 居民侧用户由单纯的电能消费者变成了电能的“生产消费者”(prosumer)。利用智能电网中双向的能量流和信息流, 通过家庭能源管理系统(Home Energy Management System, HEMS)

用户可以将本地分布式电源(风力发电、光伏发电、储能系统等)多余的电能卖给电网, 主动参与电网的运行。除了提高用电效率, 实现节能减排外, HEMS还能够为需求响应的实施和风电、光伏发电等可再生能源及电动汽车安全接入电网提供支持<sup>[1-2]</sup>。优化调度算法是 HEMS 的核心, 它是当前研究的热点问题之一。

文献[3-6]研究了动态电价机制下对空调系统进行优化调度最小化用电费用的问题, 但没有考虑空调系统和其他用电设备之间的相互影响。文献[7-9]

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划资助项目(863 计划)(2011AA040103); 国家自然科学基金资助项目(61233007, 61300215); 国家科技重大专项基金资助项目(2013ZX03005004)

研究了 HEMS 控制下电动汽车的最优充电策略, 仅把电动汽车作为负载来处理, 没有考虑高电价时段电动汽车通过 vehicle-to-home(V2H)功能向家庭环境内其他用电设备提供电能的情况。文献[10]对未来时段的电价进行预测, 基于预测结果对家庭环境内的负载进行调度来最小化用户用电时间和服务等待时间, 同样只把电动汽车作为负载来处理。文献[11]研究了动态电价机制下通过对空调系统和电动汽车的充/放电进行联合调度来最小化用电费用, 但没有考虑可再生能源的影响。

与上述研究不同, 本文提出了一种新的家庭能源管理系统框架, 统一分析用电负载、电动汽车、储能系统、可再生能源和电网之间的能量流动关系, 考虑了电动汽车的 V2H 功能。在日前电价(day-ahead price)机制下, 建立了以最小化用电费用为目标的优化模型, 提出了一种智能电网环境下的家庭能源管理系统优化调度算法, 并通过仿真实验验证算法的有效性。

## 1 智能电网环境下家庭能源管理系统构成

智能电网环境下家庭能源管理系统示意图如图 1 所示, 包括用电负载、电动汽车、储能系统、可再生能源(风力发电系统、光伏发电系统)、控制器、智能电表等几部分。

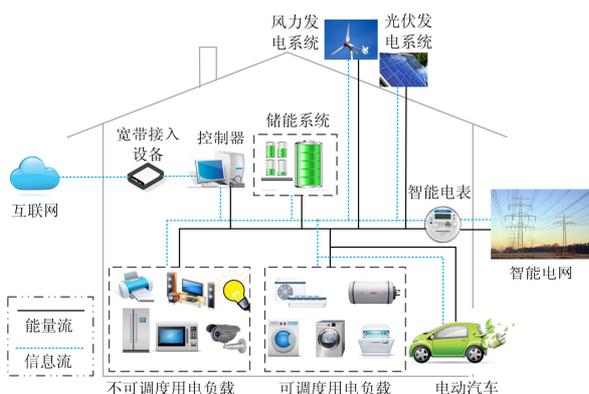


图 1 家庭能源管理系统示意图

Fig. 1 Diagram of home energy management system

不可调度负载指对这些用电设备进行调度会严重影响用户的舒适度; 对于可调度负载, 在满足用户舒适度的前提下可以对其运行进行调度, 这是在居民侧实现需求响应的主要手段。

储能系统用于平抑可再生能源系统的出力波动, 同时可以在低电价时段从电网买电, 然后在高电价时段供给负载使用或者卖给电网来获取收益。

智能电表是 HEMS 和外部智能电网之间的接

口, 实现双向的信息交换和双向能量流动与计量。电力公司通过智能电表向用户发布电价信号和需求响应控制信号, 同时接收用户上传的用电信息。

控制器是 HEMS 的核心, 它通过家域网(home area network)与 HEMS 的其他组成部分进行通信, 并且通过宽带接入设备与互联网相连, 获取调度时段内的天气预报信息, 并利用相应的预测算法对可再生能源的出力状况进行预测。控制器执行优化调度算法对可调度负载、电动汽车、储能系统的运行进行控制。

HEMS 各组成部分之间及它与外部电网之间的能量流动关系如图 2 所示, 图中箭头表示能量流动的方向, 箭头上的符号表示时隙  $t$  内传输电功率(kW)的大小, 取值不小于零。

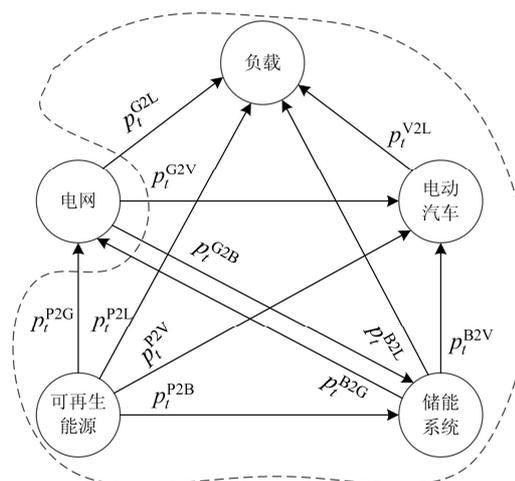


图 2 家庭能源管理系统能量流图

Fig. 2 Power distribution relationship of home energy management system

## 2 优化调度模型

### 2.1 可调度负载模型及运行约束条件

#### 1) 空调系统

在空调系统的作用下室内温度的高低与室外温度、空调特性、房屋的结构和建筑材料有关。室内温度模型<sup>[12]</sup>如式(1)所示。

$$T_{t+1}^{\text{Room}} = T_t^{\text{Room}} + \Delta t \cdot \frac{G_t}{\Delta c} + \Delta t \cdot \frac{C_{\text{HVAC}}}{\Delta c} \cdot s_t^{\text{HVAC}} \quad (1)$$

式中:  $t$  为时隙序号;  $\Delta t$  为单个时隙长度(h);  $T_t^{\text{Room}}$ 、 $T_{t+1}^{\text{Room}}$  分别表示时隙  $t$  和  $t+1$  内室内温度;  $s_t^{\text{HVAC}}$  表示时隙  $t$  内空调系统的工作状态, 1 表示工作, 0 表示停止运行; 其他参数的意义及确定方法参见文献[12]。该模型假设空调系统运行时其功率等于额定功率。空调系统运行过程中, 室内温度要保持在用

户预先设定的范围内, 如式(2)所示。

$$T_{\min}^{\text{Room}} \leq T_t^{\text{Room}} \leq T_{\max}^{\text{Room}} \quad (2)$$

## 2) 电热水器

热水的温度与入水阀的水温、环境温度、热水的流量、热水器的结构、构成材料、额定功率等因素有关。计算热水器内热水温度的模型<sup>[13]</sup>如式(3)所示。

$$T_{t+1}^{\text{Water}} = T_t^{\text{Water}} \cdot e^{-\left(\frac{1}{R_t \cdot C}\right) \cdot \Delta t} + \{G^{\text{EWH}} \cdot R_t' \cdot T_t^{\text{EWH,env}} + B_t \cdot R_t' \cdot T_t^{\text{EWH,in}} + Q_t \cdot R_t'\} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{1}{R_t \cdot C}\right) \cdot \Delta t}\right] \quad (3)$$

式中:  $T_t^{\text{Water}}$ 、 $T_t^{\text{EWH,env}}$ 、 $T_t^{\text{EWH,in}}$  分别为时隙  $t$  内的热水温度、环境温度和入水阀水温; 其他参数的意义及确定方法参见文献[13]。该模型假设热水器工作在开关状态下, 若时隙  $t$  内热水器的工作状态  $s_t^{\text{EWH}}$  为 1, 则热水器的耗电功率等于额定功率  $P^{\text{EWH}}$ , 否则为零。在调度区间内, 热水温度保持在用户预先设定的范围内, 如式(4)所示。

$$T_{\min}^{\text{Water}} \leq T_t^{\text{Water}} \leq T_{\max}^{\text{Water}} \quad (4)$$

## 3) 电动汽车

简单起见, 假设电动汽车以恒功率模式充电, 放电功率可在容许范围内连续变化, 充/放电状态下电动汽车电池的荷电状态(state of charge, SOC)分别按式(5)、式(6)计算, 同时调度区间内满足约束条件式(7)~式(11)。

$$S_{oc,t+1}^{\text{PHEV}} = S_{oc,t}^{\text{PHEV}} + p_t^{\text{PHEV,ch}} \cdot \Delta t \cdot \eta_{\text{ch}}^{\text{PHEV}} / C_{\text{PHEV}} \quad (5)$$

$$S_{oc,t+1}^{\text{PHEV}} = S_{oc,t}^{\text{PHEV}} - (p_t^{\text{PHEV,disch}} \cdot \Delta t) / (C_{\text{PHEV}} \cdot \eta_{\text{disch}}^{\text{PHEV}}) \quad (6)$$

$$p_t^{\text{PHEV,ch}} = p_t^{\text{P2V}} + p_t^{\text{B2V}} + p_t^{\text{G2V}} = s_t^{\text{PHEV,ch}} \cdot P^{\text{PHEV}} \quad (7)$$

$$0 \leq p_t^{\text{PHEV,disch}} = p_t^{\text{V2L}} \leq P_{\max}^{\text{PHEV,disch}} \quad (8)$$

$$p_t^{\text{PHEV,ch}} \cdot p_t^{\text{PHEV,disch}} = 0 \quad (9)$$

$$S_{oc,\min}^{\text{PHEV}} \leq S_{oc,t}^{\text{PHEV}} \leq S_{oc,\max}^{\text{PHEV}} \quad (10)$$

$$S_{oc,\text{set}}^{\text{PHEV}} \leq S_{oc,\text{end}}^{\text{PHEV}} \leq S_{oc,\max}^{\text{PHEV}} \quad (11)$$

式中:  $S_{oc,t}^{\text{PHEV}}$ 、 $p_t^{\text{PHEV,ch}}$ 、 $p_t^{\text{PHEV,disch}}$  分别表示时隙  $t$  内电动汽车的 SOC、充电功率和放电功率;  $C_{\text{PHEV}}$  为电动汽车电池额定容量;  $\eta_{\text{ch}}^{\text{PHEV}}$  为充电效率;  $\eta_{\text{disch}}^{\text{PHEV}}$  为放电效率;  $P^{\text{PHEV}}$ 、 $P_{\max}^{\text{PHEV,disch}}$  分别表示额定充电功率和最大允许放电功率;  $S_{oc,\text{set}}^{\text{PHEV}}$ 、 $S_{oc,\text{end}}^{\text{PHEV}}$  分别表示用户设定的调度结束时电动汽车 SOC、调度结束实际 SOC;  $S_{oc,\min}^{\text{PHEV}}$ 、 $S_{oc,\max}^{\text{PHEV}}$  分别表示最小允许 SOC 和最大允许 SOC;  $s_t^{\text{PHEV,ch}}$  为时隙  $t$  内电动汽车充电状态, 1 表示充电, 0 表示未充电。

## 4) 储能系统

储能系统由一组电池构成, 其模型与电动汽车类似, 处于充/放电状态的电池 SOC 分别由式(12)、式(13)计算, 并且工作过程中满足约束式(14)~式(17)。

$$S_{oc,t+1}^{\text{Bat}} = S_{oc,t}^{\text{Bat}} + p_t^{\text{Bat,ch}} \cdot \Delta t \cdot \eta_{\text{ch}}^{\text{Bat}} / C_{\text{Bat}} \quad (12)$$

$$S_{oc,t+1}^{\text{Bat}} = S_{oc,t}^{\text{Bat}} - (p_t^{\text{Bat,disch}} \cdot \Delta t) / (C_{\text{Bat}} \cdot \eta_{\text{disch}}^{\text{Bat}}) \quad (13)$$

$$0 \leq p_t^{\text{Bat,ch}} = p_t^{\text{P2B}} + p_t^{\text{G2B}} \leq p_{\max}^{\text{Bat,ch}} \quad (14)$$

$$0 \leq p_t^{\text{Bat,disch}} = p_t^{\text{B2L}} + p_t^{\text{B2V}} + p_t^{\text{B2G}} \leq p_{\max}^{\text{Bat,disch}} \quad (15)$$

$$S_{oc,\min}^{\text{Bat}} \leq S_{oc,t}^{\text{Bat}} \leq S_{oc,\max}^{\text{Bat}} \quad (16)$$

$$p_t^{\text{Bat,ch}} \cdot p_t^{\text{Bat,disch}} = 0 \quad (17)$$

式中, 各符号的意义与电动汽车模型对应符号的意义类似, 不再赘述。

## 5) 可调度不可中断设备

洗衣机(washing machine, WM)、干衣机(clothes dryer, CD)和洗碗机(dishwasher, DW)为可调度不可中断负载, 当它们被用户启动后, 必须保持工作状态直到任务结束。本文所建模型忽略了这些设备在不同的任务阶段功率的不同, 假设在整个工作过程中功率都等于额定功率。

设  $a \in \{\text{WM}, \text{CD}, \text{DW}\}$ , 则时隙  $t$  内设备  $a$  的耗电功率  $p_t^a$  由式(18)确定。

$$p_t^a = \begin{cases} P^a & N_{\text{start}}^a \leq t \leq N_{\text{start}}^a + N_{\text{stask}}^a - 1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $P^a$  为设备  $a$  的额定功率;  $N_{\text{start}}^a$  为设备任务启动时隙序号;  $N_{\text{stask}}^a$  为设备完成指定任务所需的总时隙数。

除上述约束条件外, 用电负载还要满足式(19)所示的供需平衡约束条件。

$$\sum_{a \in A} p_t^a + p_t^{\text{G2V}} + p_t^{\text{P2V}} + p_t^{\text{B2V}} + p_t^{\text{CL}} = p_t^{\text{P2L}} + p_t^{\text{B2L}} + p_t^{\text{V2L}} + p_t^{\text{G2L}} \quad (19)$$

式中:  $A = \{\text{HVAC}, \text{EWH}, \text{WM}, \text{CD}, \text{DW}\}$ ;  $p_t^{\text{CL}}$  表示时隙  $t$  内所有不可调度负载的功率之和。

## 2.2 调度模型

记优化调度区间为  $T$ , 将其均分为时长为  $\Delta t$  的  $n$  个时隙。整个调度区间内用户的净用电费用等于用户从电网购买电能的费用、储能系统折旧费用和电动汽车 V2H 功能引起的电池折旧费用之和减去用户在高电价时段向电网卖电获得的收益, 如式(20)所示。

$$C_{\text{total}} = \sum_{s_1 \in S_{\text{temp}}} \sum_{s_2 \in S_{\text{gen}}} p^{s_1} p^{s_2} (C_{\text{buy}}^{s_1 s_2} + C_{\text{Bat}}^{s_1 s_2} + C_{\text{PHEV}}^{s_1 s_2} - R_{\text{sell}}^{s_1 s_2}) \quad (20)$$

$$C_{\text{buy}}^{s_1, s_2} = \sum_{t=1}^n \left[ \left( p_t^{\text{G2L}, s_1, s_2} + p_t^{\text{G2B}, s_1, s_2} + p_t^{\text{G2V}, s_1, s_2} \right) \cdot \Delta t \cdot c_t^{\text{grid}} \right] \quad (21)$$

$$C_{\text{Bat}}^{s_1, s_2} = \sum_{t=1}^n \left[ \left( p_t^{\text{P2B}, s_1, s_2} + p_t^{\text{G2B}, s_1, s_2} + p_t^{\text{B2L}, s_1, s_2} + p_t^{\text{B2G}, s_1, s_2} + p_t^{\text{B2V}, s_1, s_2} \right) \cdot \Delta t \cdot c_{\text{Bat, deg}} \right] \quad (22)$$

$$C_{\text{PHEV}}^{s_1, s_2} = \sum_{t=t_{\text{plug}}}^n \left[ \left( p_t^{\text{G2V}, s_1, s_2} + p_t^{\text{P2V}, s_1, s_2} + p_t^{\text{B2V}, s_1, s_2} + p_t^{\text{V2L}, s_1, s_2} \right) \cdot \Delta t \cdot c_{\text{PHEV, deg}} \right] - (S_{\text{oc, end}}^{\text{PHEV}} - S_{\text{oc, plug}}^{\text{PHEV}}) \cdot C_{\text{PHEV}} \cdot c_{\text{PHEV, deg}} \quad (23)$$

$$R_{\text{sell}}^{s_1, s_2} = \sum_{t=1}^n \left[ \left( p_t^{\text{P2G}, s_1, s_2} + p_t^{\text{B2G}, s_1, s_2} \right) \cdot \Delta t \cdot c_t^{\text{sell}} \right] \quad (24)$$

式(20)考虑了室外温度和可再生能源出力预测误差给优化问题引入的不确定性, 并采用情景分析法来描述这种不确定性。 $s_1$ 是室外温度情景集合 $s_{\text{temp}}$ 中的一个随机情景, 其发生概率为 $p^{s_1}$ ;  $s_2$ 是可再生能源出力情景集合中的一个随机情景, 其发生概率为 $p^{s_2}$ ;  $c_t^{\text{grid}}$ 、 $c_t^{\text{sell}}$ 分别表示时隙 $t$ 内从电网买电和向电网卖电的价格;  $t_{\text{plug}}$ 、 $S_{\text{oc, plug}}^{\text{PHEV}}$ 分别表示电动汽车接入电网时的时隙序号和SOC;  $c_{\text{Bat, deg}}$ 、 $c_{\text{PHEV, deg}}$ 分别表示储能系统和电动汽车电池的折旧系数(元/kW·h), 计算方法如文献[14]所示。

智能电网环境下家庭能源管理系统优化调度模型如式(25)所示。

$$\begin{cases} \min C_{\text{total}} \\ \text{s.t.} \\ \text{式(2), 式(4), 式(7)–式(11), 式(14)–式(17), 式(19)} \end{cases} \quad (25)$$

### 3 算法设计

#### 3.1 不同情形下的能量分配方法

在调度过程中, 根据电动汽车是否与 HEMS 系统相连及当前的 SOC 值, 它与 HEMS 系统中其他部分之间的能量交换关系分为 3 种情形: 1) 没有与 HEMS 系统相连, 与其他部分没有能量交换关系; 2) 与 HEMS 系统相连, 只能作为负载; 3) 与 HEMS 系统相连, 既可作为负载也可作为电源。

每个时隙内, 按图 3 所示流程确定电动汽车具体处于哪种情形。 $N_{\text{ch}, t}^{\text{PHEV}}$ 表示电动汽车从时隙 $t$ 的荷电状态 $S_{\text{oc}, t}^{\text{PHEV}}$ 充电到指定状态 $S_{\text{oc, set}}^{\text{PHEV}}$ 所需要的时隙数, 由式(26)确定。

$$N_{\text{ch}, t}^{\text{PHEV}} = \begin{cases} 0 & S_{\text{oc}, t}^{\text{PHEV}} \geq S_{\text{oc, set}}^{\text{PHEV}} \\ \lceil (S_{\text{oc, set}}^{\text{PHEV}} - S_{\text{oc}, t}^{\text{PHEV}}) \cdot C_{\text{PHEV}} / (p^{\text{PHEV}} \cdot \Delta t \cdot \eta_{\text{ch}}^{\text{PHEV}}) \rceil & S_{\text{oc}, t}^{\text{PHEV}} < S_{\text{oc, set}}^{\text{PHEV}} \end{cases} \quad (26)$$

式中,  $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整操作。

情形 1 下, 每个时隙 $t$ 内按图 4 所示的流程确定负载、电动汽车、储能系统、可再生能源和电网之间的能量流动关系。图中,  $\sum_a p_t^a$ 为时隙 $t$ 内所有用电负载的总功率;  $c_t^{\text{Bat, sell}}$ 、 $c_t^{\text{Bat, buy}}$ 分别表示时隙 $t$ 允许用户将储能系统中的电能卖给电网时的电网电价最低值和允许用户从电网购买电能储存在储能系统的电网电价最高值, 分别由式(27)、式(28)确定它们的大小。

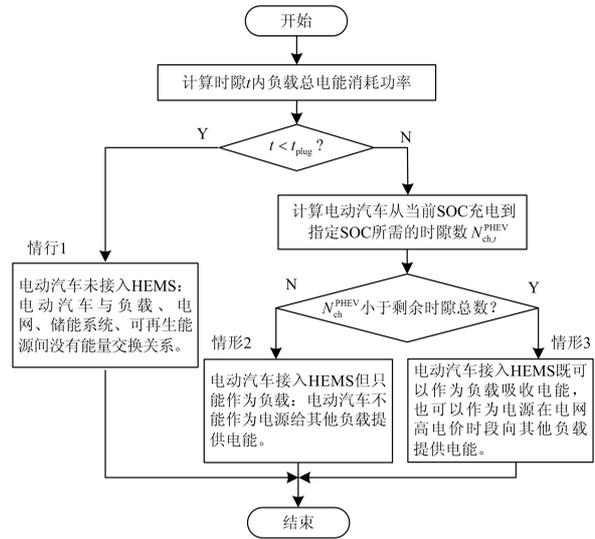


图 3 电动汽车能量交换情形图

Fig. 3 Scenarios of power relationship between electric vehicle and HEMS

$$c_t^{\text{Bat, sell}} = \beta^{\text{sell}} \cdot \max \{ c_1^{\text{grid}}, c_2^{\text{grid}}, \dots, c_n^{\text{grid}} \} \quad (27)$$

$$c_t^{\text{Bat, buy}} = \beta^{\text{buy}} \cdot \max \{ c_t^{\text{grid}}, c_{t+1}^{\text{grid}}, \dots, c_n^{\text{grid}} \} \quad (28)$$

式中,  $0 < \beta^{\text{sell}} < 1$ 、 $0 < \beta^{\text{buy}} < 1$ 为算法参数。

$\Delta S_{\text{oc1}}^{\text{Bat}}$ 、 $\Delta S_{\text{oc2}}^{\text{Bat}}$ 是为了防止储能系统在 SOC 允许范围的边界处充电/放电引起 SOC 越界而引入的参数, 其值分别由式(29)、式(30)确定。

$$\Delta S_{\text{oc1}}^{\text{Bat}} = p_{\text{max}}^{\text{Bat, ch}} \cdot \Delta t \cdot \eta_{\text{ch}}^{\text{Bat}} / C_{\text{Bat}} \quad (29)$$

$$\Delta S_{\text{oc2}}^{\text{Bat}} = p_{\text{max}}^{\text{Bat, disch}} \cdot \Delta t / (C_{\text{Bat}} \cdot \eta_{\text{disch}}^{\text{Bat}}) \quad (30)$$

能量分配过程中, 优先将储能系统中的电能供给负载使用,  $S_{\text{oc}, t}^{\text{Bat, th}}$ 是为防止储能系统将电能过量卖给电网而造成负载供给不足而引入的阈值, 由式(31)确定其值。

$$S_{\text{oc}, t}^{\text{Bat, th}} = S_{\text{oc, min}}^{\text{Bat}} + (E_t^{\text{B2L}} + E_t^{\text{B2V}}) / C_{\text{Bat}} \quad (31)$$

$$E_t^{\text{B2L}} = \sum_{i=t}^n \min \left[ \max \left( p_i^{\text{gen}} - \sum_a p_i^a, 0 \right), p_{\text{max}}^{\text{Bat, disch}} \right] \cdot \Delta t \quad (32)$$

$$E_t^{B2V} = N_{ch}^{PHEV} \cdot \min(P^{PHEV}, p_{max}^{Bat,disch}) \cdot \Delta t \quad (33)$$

式中,  $E_t^{B2L}$ 、 $E_t^{B2V}$  分别表示从当前时隙  $t$  到调度结束需要储能系统供给负载和电动汽车的电能。若计算的  $S_{oc,t}^{Bat,th}$  大于  $S_{oc,max}^{Bat}$ , 令  $S_{oc,t}^{Bat,th} = S_{oc,max}^{Bat}$ 。

分析图 4 所示的流程图可知, 上述能量分配方法能够确保式(25)所示模型中的约束条件式(7)一式(11)、式(14)一式(17)、式(19)得到满足。

受篇幅所限, 情形 2 和情形 3 下的能量分配方法不再给出。

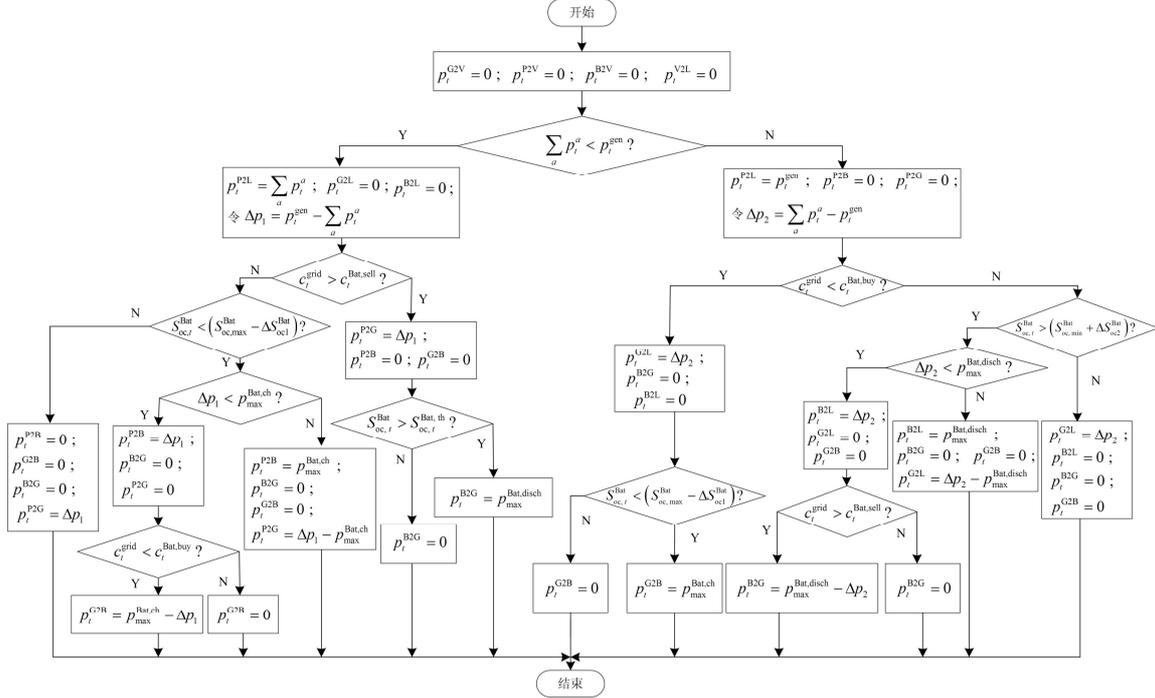


图 4 情景 1 能量分配流程图

Fig. 4 Flowchart of power distribution for scenario 1

### 3.2 算法步骤

调度算法根据室外温度预测值、可再生能源的功率输出预测值、日前电价信号和用户偏好设置(比如室内温度、热水温度等)对可调度负载的运行状态进行调度, 从而在满足用户舒适度的前提下, 最小化用户的总用电费用。

采用罚函数法将式(25)所示的约束优化模型转换为无约束优化模型, 罚函数及转换后的模型分别如式(34)、式(35)所示。式(34)只考虑了约束条件式(2)、式(4), 其他约束条件由算法中的能量分配方法保证得到满足; 式(35)中  $M$  为一个足够大的正常数。

$$v_{total} = \sum_{s_1 \in S_{temp}} \sum_{s_2 \in S_{gen}} p^s p^{s_2} \cdot \left\{ \sum_{t=1}^n \left[ \frac{\max(0, T_t^{Room} - T_{max}^{Room}, T_{min}^{Room} - T_t^{Room})}{T_{max}^{Room} - T_{min}^{Room}} \right] + \sum_{t=1}^n \left[ \frac{\max(0, T_t^{Water} - T_{max}^{Water}, T_{min}^{Water} - T_t^{Water})}{T_{max}^{Water} - T_{min}^{Water}} \right] \right\} \quad (34)$$

$$\min C_{final} = C_{total} + M \cdot v_{total} \quad (35)$$

粒子群算法由于算法简单、全局搜索能力强、鲁棒性高等优点, 得到了广泛应用<sup>[15-22]</sup>。因此, 本文采用文献[6]提出的一种改进粒子群算法对模型(35)进行求解, 提出一种基于粒子群算法的 HEMS 优化调度算法。该调度算法以每个时隙空调系统和热水器的工作状态及洗衣机、干衣机和洗碗机的任务启动时刻为决策变量, 并按图 5 所示进行编码, 图中前  $2n$  个变量为取值 0 和 1 的二值变量, 其余变量为正整数变量。



图 5 算法粒子编码方法

Fig. 5 Encoding method for particles in the algorithm

智能电网环境下家庭能源管理系统优化调度算法的具体步骤如下。

1) 读取电价信号  $\mathbf{P}_e = [p_1, p_2, \dots, p_n]$ 、室外温度预测值  $\mathbf{T}^{\text{out}} = [T_1^{\text{out}}, T_2^{\text{out}}, \dots, T_n^{\text{out}}]$ 、可再生能源功率输出预测值  $\mathbf{P}^{\text{gen}} = [p_1^{\text{gen}}, p_2^{\text{gen}}, \dots, p_n^{\text{gen}}]$ , 根据情景分析法, 生成室外温度情景集合  $S_{\text{temp}}$  和可再生能源功率输出情景集合  $S_{\text{gen}}$ 。

2) 设置粒子群算法的参数: 种群规模  $N_p$ 、最大迭代次数  $k_{\text{max}}$ 、最小惯性权重  $w_{\text{min}}$ 、最大惯性权重  $w_{\text{max}}$ 、学习因子  $c_1$ 、 $c_2$  等。

3) 设置用户偏好参数:  $T_{\text{min}}^{\text{Room}}$ 、 $T_{\text{max}}^{\text{Room}}$ 、 $T_{\text{min}}^{\text{Water}}$ 、 $T_{\text{max}}^{\text{Water}}$ 、 $S_{\text{oc, min}}^{\text{PHEV}}$ 、 $S_{\text{oc, max}}^{\text{PHEV}}$ 、 $S_{\text{oc, set}}^{\text{PHEV}}$ 、 $S_{\text{oc, min}}^{\text{Bat}}$ 、 $S_{\text{oc, max}}^{\text{Bat}}$  以及可调度不可中断设备的允许调度区间等。

4) 初始化粒子群

首先对种群中的每个粒子  $i$  执行操作:

a) 初始化位置向量  $\mathbf{X}^i$ 、速度向量  $\mathbf{V}^i$ 、个体最优位置向量  $\mathbf{P}_{\text{best}}^i$ 。

b) 根据位置向量  $\mathbf{X}^i$  计算每种情景下每个时隙内总负载功率, 然后根据 3.1 节给出的能量分配方法确定每个时隙内用电负载、电动汽车、可再生能源、储能系统和电网之间的能量交换量。

c) 据式(35)计算粒子的目标函数值, 该值越小, 粒子的适应度值越高。

然后, 根据适应度值确定全局最优位置向量  $\mathbf{P}_g$ , 清零算法循环计数器  $k$ 。

5) 进入主循环, 执行以下操作:

a) 据式(36)<sup>[23]</sup>计算本次循环惯性权重  $w(k)$ 。

$$w(k) = w_{\text{max}} - k(w_{\text{max}} - w_{\text{min}}) / k_{\text{max}} \quad (36)$$

b) 据式(37)更新粒子速度向量  $\mathbf{V}^i$ 。

$$v_{i,j}(k+1) = w(k)v_{i,j}(k) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(k)] + c_2 r_2 [p_{g,j} - x_{i,j}(k)] \quad (37)$$

式中,  $r_1$  和  $r_2$  是区间  $[0, 1]$  上均匀分布的随机数。

c) 更新位置向量  $\mathbf{X}^i$ , 前  $2n$  个二进制变量依式(38)<sup>[24]</sup>更新, 最后 3 个变量按式(39)更新。

$$x_{i,j}(k+1) = \begin{cases} 1 & \text{rand}() < 1 / (1 + e^{-v_{i,j}(k+1)}) \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (38)$$

$$x_{i,j}(k+1) = x_{i,j}(k) + \lfloor v_{i,j}(k+1) \rfloor \quad (39)$$

式中:  $\text{rand}()$  表示区间  $[0.0, 1.0]$  上均匀分布的随机数; 符号  $\lfloor \cdot \rfloor$  表示向下取整操作。

d) 据 3.1 节给出的能量分配方法确定每个时隙内用电负载、电动汽车、可再生能源、储能系统和电网之间的能量交换量。

e) 据式(35)计算粒子的目标函数值, 该值越小,

粒子的适应度值越高, 并据式(40)更新粒子的个体最优位置向量。

$$\mathbf{P}_{\text{best}}^i(k+1) = \begin{cases} \mathbf{X}^i(k+1), & f_{\text{it}}(\mathbf{X}^i(k+1)) > f_{\text{it}}(\mathbf{P}_{\text{best}}^i(k)) \\ \mathbf{P}_{\text{best}}^i(k), & f_{\text{it}}(\mathbf{X}^i(k+1)) \leq f_{\text{it}}(\mathbf{P}_{\text{best}}^i(k)) \end{cases} \quad (40)$$

式中,  $f_{\text{it}}()$  表示适应度函数。

对种群中的每个粒子完成操作 a)–e) 后, 执行以下操作:

f) 按式(41)更新全局最优位置向量  $\mathbf{P}_g$ 。

$$\mathbf{P}_g(k+1) = \arg \{ \max_{1 \leq i \leq N_p} [f_{\text{it}}(\mathbf{P}_{\text{best}}^i(k+1))] \} \quad (41)$$

g) 按文献[6]的方法识别种群中陷入局部最优的最坏粒子并重新初始化它, 从而避免算法早熟收敛, 提高算法性能。

h) 算法循环次数计数器加 1:  $k = k + 1$ , 若  $k < k_{\text{max}}$ , 转步骤 5 a); 否则, 转步骤 6)。

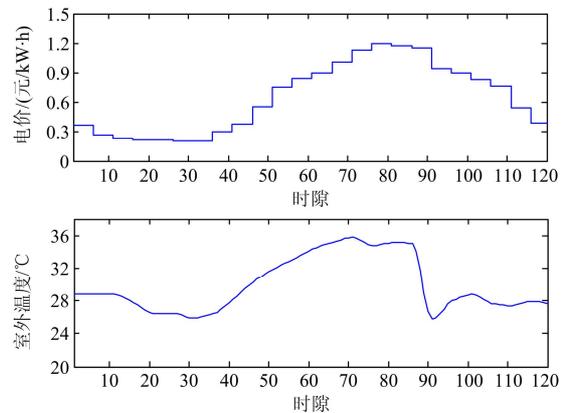
6) 主循环结束,  $\mathbf{P}_g$  即为调度模型式(25)的最优决策向量, 在调度区间内依此对空调系统、热水器、洗衣机、干衣机和洗碗机的运行进行调度, 并在每个时隙中根据 3.1 节所示的能量分配方法确定 HMES 各组成部分之间及它们与电网之间的能量分配值。

## 4 仿真实验与结果分析

为了验证算法性能, 在 Microsoft Visual Studio 2008 环境下采用 C 语言开发了仿真程序, 进行数字仿真。所用硬件环境为惠普 ProBook 6470b 笔记本, Intel® Core™ i7-3540b@3.00 GHz, 8.00 GB RAM。

### 4.1 输入数据及参数设置

调度区间时长 1 天, 均分为时长为 0.2 h 的 120 个时隙, 即  $\Delta t = 0.2, n = 120$ 。假设用户安装有容量为 5.75 kW 的光伏发电系统, 调度区间内电价信号、室外温度预测值和光伏系统功率输出值输入数据如图 6 所示。



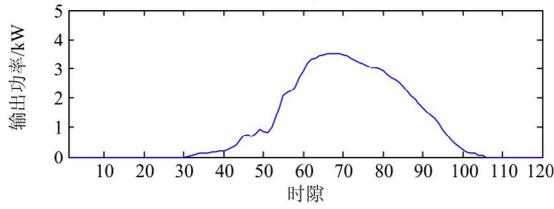


图 6 仿真输入数据

Fig. 6 Input data for simulation

空调系统参数同文献[25], 额定功率 2.352 kW,  $T_{\min}^{\text{Room}}$ 、 $T_{\max}^{\text{Room}}$  分别为 23℃和 26℃。热水器额定功率 4.5 kW,  $T_i^{\text{EWH, in}}$ 、 $T_{\min}^{\text{Water}}$ 、 $T_{\max}^{\text{Water}}$  分别为 15.5℃、42℃、50℃, 环境温度  $T_i^{\text{EWH, env}} = T_i^{\text{Room}}$ 。电动汽车参数同文献[26],  $C_{\text{PHEV}}$  为 16 kW·h,  $t_{\text{plug}}$ 、 $S_{\text{oc, plug}}^{\text{PHEV}}$ 、 $S_{\text{oc, set}}^{\text{PHEV}}$ 、 $S_{\text{oc, min}}^{\text{PHEV}}$ 、 $S_{\text{oc, max}}^{\text{PHEV}}$ 、 $\eta_{\text{ch}}^{\text{PHEV}}$ 、 $\eta_{\text{disch}}^{\text{PHEV}}$  分别为 90、0.5、0.9、0.2、1.0、0.95 和 0.95,  $P^{\text{PHEV}}$  为 3.3 kW,  $P_{\text{max}}^{\text{PHEV, disch}}$  为 3.3 kW。储能系统  $C_{\text{Bat}}$  为 13.44 kW·h, 最大充/放电功率为 2 kW, 充/放电效率为 0.95,  $S_{\text{oc, min}}^{\text{Bat}}$  和  $S_{\text{oc, max}}^{\text{Bat}}$  分别为 0.2、1.0。洗衣机额定功率 0.5 kW, 工作时长 1 h, 调度区间 9:00—19:00; 干衣机额定功率为 4 kW, 工作时长 2 h, 调度区间 19:00—24:00; 洗碗机额定功率 1 kW, 工作时长 1 h, 调度区间 9:00—21:00。

粒子群算法参数  $N_p$ 、 $k_{\max}$ 、 $w_{\min}$ 、 $w_{\max}$ 、 $c_1$  和  $c_2$  分别为 30、3000、0.2、0.9、2 和 2。能量分配过程中参数  $\beta^{\text{sell}}$ 、 $\beta^{\text{buy}}$  分别取值 0.8 和 0.6。

#### 4.2 结果分析

一个调度周期内, 仿真实验结果如表 1 所示, 为了比较算法性能, 表 1 中同时列出了其他情形下的仿真结果。考虑到算法的随机性, 表 1 所列结果是每种算法分别独立运行 30 次的平均结果。

表 1 仿真实验结果

Table 1 Simulation results

实验情形	购电成本/元	储能系统折旧成本/元	电动汽车折旧成本/元	卖电收益/元	净费用/元
本文算法	14.86	4.15	0.36	17.67	1.70
比较情形 1	27.09	-	-	-	27.09
比较情形 2	9.11	4.23	-	-	13.34
比较情形 3	15.33	4.27	-	17.08	2.52

比较情形 1 只对负载进行调度, 用户没有光伏系统和储能系统, 电动汽车只作为负载使用; 比较情形 2 在情形 1 的基础上增加了光伏系统和储能系统, 但储能系统只用于平抑光伏系统的出力波动, 且用户没有向电网卖电的能力; 比较情形 3 与本文

算法的区别是电动汽车没有 V2H 的功能。

由表 1 可知, 由于情形 1 中用户的电能全部从电网购买, 其用电费用高于其他 3 种情况, 这表明在智能电网的动态电价机制下安装可再生能源系统和储能系统可以有效降低用户的用电费用。由于情形 3 具有向电网卖电的能力, 提高了光伏系统的利用率, 并且它可以在低电价时段从电网购电, 然后在高电价时段供给负载使用或者卖给电网来获取收益, 因此, 与情形 2 相比, 其净用电费用减少了 81.11%。

与 3 种比较情形相比, 本文算法的净用电费用最低, 为 1.70 元, 这是因为它不仅具有比较情形 3 的所有优点, 而且本文算法考虑了电动汽车的 V2H 功能, 电动汽车可以在高电价时段向其他用电负载放电, 减少了高电价时段从电网的购电量, 有利于减少用户的用电费用。与情形 1、情形 2、情形 3 相比, 本文算法分别减少净用电费用 93.72%、87.25%和 32.54%。

上述分析表明, 在智能电网环境下充分利用动态电价、可再生能源、储能系统、向电网卖电的能力及电动汽车的 V2H 功能, 将 HEMS 的各组成部分作为一个整体来调度可有效降低用户的用电费用。

在一次调度过程中, 电动汽车接入 HEMS 后其充/放电功率及 SOC 值如图 7 所示。图中负功率表示电动汽车通过 V2H 功能向其他用电负载放电。

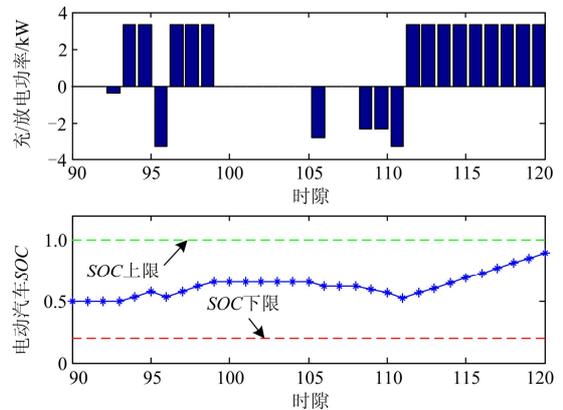


图 7 电动汽车充/放电功率及 SOC

Fig. 7 Charging/discharging power and SOC of electric vehicle

由图 7 可知, 电动汽车的 SOC 在整个调度区间内均在安全范围内, 调度结束后其 SOC 值为 0.906 达到了用户预先设定的目标值  $S_{\text{oc, set}}^{\text{PHEV}} = 0.9$ 。

由于本文所提算法是一种随机优化算法, 为了验证算法的鲁棒性, 将算法独立运行 30 次, 记录每次运行的时间和用户净用电费用, 得到统计数据如

表 2 所示。可见, 本文算法具有较好的鲁棒性, 并且算法执行时间短, 能够满足实际应用需求。

表 2 运行时间和净用电费用统计数据

Table 2 Statistics of runtime and net electricity fee

指标	均值	标准差
运行时间/s	206.39	0.57
净用电费用/元	1.70	0.23

## 5 结语

智能电网环境下居民侧用户作为电能的“生产消费者”, 用户除了用电负载外, 还具有电动汽车、可再生能源和储能系统, 这些设备之间的相互作用, 以及它们和电网之间的能量交换关系都影响着用户用电策略的选择和最终的用电成本。本文提出算法在统一框架下考虑了它们之间的能量交换关系, 并对其运行进行优化调度, 并且在该框架下电动汽车具有 V2H 功能。仿真结果表明, 本文算法能够显著降低用户用电费用, 同时该算法也有利于在智能电网环境下在居民侧实施需求响应, 并为可再生能源和电动汽车安全接入电网提供支持。

## 参考文献

- [1] HAZAS M, FRIDAY A, SCOTT J. Look back before leaping forward: four decades of domestic energy inquiry[J]. IEEE Pervasive Computing, 2011, 10(1): 13-19.
- [2] 张延宇, 曾鹏, 臧传治. 智能电网环境下家庭能源管理系统研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 143-154.  
ZHANG Yanyu, ZENG Peng, ZANG Chuazhi. Review of home energy management system in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 143-154.
- [3] NOH S J, YUN J A, KIM K H. An efficient building air conditioning system control under real-time pricing[C] // IEEE 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection(APAP). Beijing: IEEE Beijing Section, Tsinghua University, 2011: 1283-1286.
- [4] THOMAS A G, JAHANGIRI P, WU D, et al. Intelligent residential air-conditioning system with smart-grid functionality[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 2240-2251.
- [5] MOLINA D, LU C, SHERMAN V, et al. Model predictive and genetic algorithm-based optimization of residential temperature control in the presence of time-varying electricity prices[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2013, 49(3): 1137-1145.
- [6] 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.
- [7] JIAN L, XUE H, XU G. Regulated charging of plug-in hybrid electric vehicles for minimizing load variance in household smart micro-grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3218-3226.
- [8] WI Y M, LEE J U, JOO S K. Electric vehicle charging method for smart homes/buildings with a photovoltaic system[J]. IEEE Transaction on Consumer Electronics, 2013, 59(2): 323-328.
- [9] BERTHOLD F, BLUNIER B, BOUQUAIN D, et al. Offline and online optimization of plug-in hybrid electric vehicle energy usage (home-to-vehicle and vehicle-to-home)[C] // Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Dearborn: IEEE Industry Applications Society, IEEE Power & Energy Society, IEEE Power Electronics Society, 2012: 1-6.
- [10] MOHSENIAN-RAD A H, LEON-GARCIA A. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 120-133.
- [11] NGUYEN D T, LE L B. Joint optimization of electric vehicle and home energy scheduling considering user comfort preference[J]. IEEE Transaction on Smart Grid, 2014, 5(1): 188-199.
- [12] 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.
- [13] POURMOUSAVI S A, PATRICK S N, NEHRIR M H. Real-time demand response through aggregate electric water heaters for load shifting and balancing wind generation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 769-778.
- [14] SU W, WANG J, ROH J. Stochastic energy scheduling in micro-grids with intermittent renewable energy resources[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1876-1883.
- [15] 段培永, 刘聪聪, 段晨旭, 等. 基于粒子群优化的室内

- 动态热舒适度控制方法[J]. 信息与控制, 2013, 42(1): 100-110.
- DUAN Peiyong, LIU Congcong, DUAN Chenxu, et al. Indoor dynamic thermal comfort control method based on particle swarm optimization[J]. Information and Control, 2013, 42(1): 100-110.
- [16] 周晖, 付娅, 韩盟, 等. 基于粒子群算法的含大规模风电互联系统的负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 1-7.
- ZHOU Hui, FU Ya, HAN Meng, et al. Load frequency control of power system with large scale of wind power integrated based on particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 1-7.
- [17] 程声烽, 程小华, 杨露. 基于改进粒子群算法的小波神经网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 37-42.
- CHENG Shengfeng, CHENG Xiaohua, YANG Lu. Application of wavelet neural network with improved particle swarm optimization algorithm in power transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 37-42.
- [18] 王永强, 谢军, 律方成. 基于改进粒子群优化稀疏分解的局放信号去噪方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 320-329.
- WANG Yongqiang, XIE Jun, LÜ Fangcheng. PD Signal denoising method based on improved quantum-behaved particle swarm optimization sparse decomposition[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 320-329.
- [19] 苏海滨, 高孟泽, 常海松. 基于粒子群算法的微电网有功无功下垂控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 365-369.
- SU Haibin, GAO Mengze, CHANG Haisong. Microgrid droop control of active and reactive power based on PSO[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 365-369.
- [20] 周超, 田立军. 基于粒子群优化算法的电压暂降监测点优化配置[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 181-187.
- ZHOU Chao, TIAN Lijun. An optimum allocation method of voltage sag monitoring nodes based on particle swarm optimization algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 181-187.
- [21] 周泽远, 苏大威, 汪志成, 等. 基于自适应变异粒子群算法的独立多元互补微网经济环保运行[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(4): 8-14.
- ZHOU Zeyuan, SU Dawei, WANG Zhicheng, et al. Research on economic and environmental optimal operation of standalone multi-element complementary microgrid based on PSO with adaptive mutation[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(4): 8-14.
- [22] 王金全, 黄丽, 杨毅. 基于多目标粒子群算法的微电网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(1): 49-54.
- WANG Jinquan, HUANG Li, YANG Yi. Optimal dispatch of microgrid based on multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(1): 49-54.
- [23] SHI Y, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization[C] // Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation. Washington DC: IEEE Neural Network Council (NNC), Evolutionary Programming Society(EPS), Institution of Electrical Engineers (IEE), 1999: 1945-1950.
- [24] GAING Z. Discrete particle swarm optimization algorithm for unit commitment[C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting. Toronto: IEEE Power Engineering Society, 2003, 1: 418-423.
- [25] PIPATTANASOMPORN M, KUZLU M, RAHMAN S. An algorithm for intelligent home energy management and demand response analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 3(4): 2166-2173.
- [26] SHAO S, PIPATTANASOMPORN M, RAHMAN S. Grid Integration of electric vehicles and demand response with customer choice[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 543-550.

收稿日期: 2015-03-31; 修回日期: 2015-06-11

作者简介:

张延宇(1980-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为智能电网、需求响应、智能计算; E-mail: zyy@henu.edu.cn

曾鹏(1976-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为智能电网、工业无线网络等;

臧传治(1977-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为智能电网、工业无线网络等。

(编辑 周金梅)