

# 智能电网下用户用电系统多目标调度策略研究\*

徐 辉 张会林 叶玉凤 张志宇

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

**摘要:** 用户用电系统是智能电网在居民侧的延伸,是智能电网领域的研究热点之一。通过对居民主要家电的用电起始时间、用电时长、用电时段数的设计,依据动态电价信息,结合分布式电源、电动汽车向电网反馈电能的能力,对用电负载、光伏电池板以及电动汽车建立数学模型,利用粒子群算法进行寻优求解,对用户用电系统多目标运行进行调度安排,在不影响用户用电舒适度的情况下,给出一种以用电费用最小为目标的用电安排策略。最后经过实例分析,通过仿真结果比较发现,用电安排策略有效的降低了 34.6% 的用电费用,验证了用电安排策略的可行性和经济性,为用户合理用电提供了理论指导。

**关键词:** 智能电网;用电系统;粒子群算法;调度;MATLAB;用电安排策略

**中图分类号:** TM73; TN626 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1050

## Research on multi-objective scheduling strategy for user power system under smart grid

Xu Hui Zhang Huilin Ye Yufeng Zhang Zhiyu

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** User power system is an extension of the smart grid in the residential side, is one of the smart grid research hotspot. Based on the dynamic electricity price information, combined with the distributed power supply, the ability of the electric vehicle to feed back the electric energy to the grid, the paper analyzes the influence of the electricity load, the time of the electricity, Board and electric vehicle are established, the particle swarm optimization algorithm is used to solve the problem, and the multi-objective operation of the user power system is scheduled and arranged. Without affecting the user's electric comfort, a method is proposed to minimize the electricity cost as the goal of electricity scheduling strategy. Finally, through the analysis of examples, the results of MATLAB simulation show that the electricity scheduling strategy effectively reduces the electricity cost of 34.6%, which verifies the feasibility and economy of the electricity arrangement strategy, and provides the theoretical guidance for users to use electricity reasonably.

**Keywords:** smart grid; powered system; particle swarm optimization; scheduling; MATLAB; electricity arrangement strategy

## 1 引言

在智能电网下,电力企业和用户建立双向实时信息互动,使用户参与到电力系统的运行和管理中,智能电网将电能的使用权转移给消费者,由消费者决定如何使用电能,另外,用户可以将本地分布式电源(光伏电池板)、电动汽车多余的电能反馈给电网或用电负载,主动参与电网的运行<sup>[1]</sup>。通过对用户用电系统多目标运行进行调度安排,在不影响用户用电舒适度的前提下,修正其使用和购买电能的方式,

有效降低用户用电费用,使用户获得实实在在的好处,实现电力来源的多样化、多元化,有效缓解能源需求增长、能源紧缺和环境保护之间的矛盾,同时对分布式供能技术以及电动汽车接入技术的发展起到积极的促进作用<sup>[2-3]</sup>。

文献[4]研究了动态电价机制下对空调系统进行调度安排,进而最小化用电费用,但研究目标单一,没有考虑到分布式电源、电动汽车以及其他用电负载对用户的影响。文献[5]研究了家庭能源管理系统下电动汽车的最优充电策略,但仅仅是把电动汽车作为负载来处理,没有考虑到高

收稿日期:2016-12

\* 基金项目:沪江基金(B1402/D1402)资助项目

价时段电动汽车向电网反馈多余的电能。文献[6]研究了在动态电价机制下对家用常见用电负载进行调度安排,但它针对的是传统电网,在这种模式下,用户只能被动的参与电网的运行。

与上述文献不同,本文通过对用户主要用电负载的用电起始时间、用电时长、用电时段数的设计,结合动态电价信息,利用分布式电源、电动汽车向电网反馈电能的能力,在不影响用户生活质量的前提下,对用户用电系统多目标运行进行调度安排,给出一种以用电费用最小为目标的用电优化策略,有效减少用电费用,为用户合理用电提供理论指导。

## 2 用户用电系统多目标调度对用户影响

### 2.1 用户侧分布式电源调度安排对用户的影响

智能电网具有安全水平高,适用能力强的优势,强大的兼容性支持可再生能源的接入和大规模的应用,允许太阳能、风能等清洁能源并网接入,对各种随机性和间歇性能源具有接入和消纳的能力,促进电力供应结构多元化发展,减少石油等能源的消耗<sup>[7]</sup>。分布式电源直接安装在用户端,接近负荷中心,减少了中间输送环节的损耗,能够实现对资源利用的最大化,同时分布式电源可以将电能反馈给电网或者向用户用电系统供电,可以大幅降低用户停电几率,提高用户供电可靠性,同时有效地降低用户用电费用<sup>[8]</sup>。通过对用户侧分布式电源进行调度安排,结合实时电价信息、用电负载用电时间以及电动汽车充放电时间,动态调整分布式电源放电时段,使用户获益最大,从而有效降低用电费用。

### 2.2 电动汽车调度安排对用户的影响

智能电网支持电动汽车等智能充电设备的接入,对于用户来说,电动汽车既可充当负载也可以被看作储能设备。当电动汽车作为负载时,可以通过经济手段和技术手段合理安排电动汽车充电时间,实现有序充电,减少对电网安全的影响<sup>[9]</sup>;当电动汽车作为储能设备时,可以看作独立的发电单元,结合实时动态电价、主要家电用电时间以及分布式电源放电时间,控制电动汽车向电网反馈电能以及向用电系统供电时间,实现电动汽车及储能装置与电网间的信息及能量互动,满足用户多种用电需求。通过对电动汽车进行调度安排,确定电动汽车最优充放电策略和充放电时间,有效降低用户用电费用。

### 2.3 用电负载调度安排对用户的影响

在智能电网下,用户用电负载分为可控负载和不可控负载<sup>[10]</sup>。可控负载运行的开始时间和用电量具有一定的灵活性,用户对其进行优化管理并不会影响用户的舒适度,例如洗衣机,在一定时间区间,用户改变用电时间,并不会打乱用户正常的生活节奏;而不可控负载用户是不能对其进行优化管理,否则将会严重影响用户的舒适度,例如娱乐电器(如电视、电脑等),用户所喜欢的节目播放时

间、工作的临时需要等不确定因素太多,如果进行调度安排的话,将会影响用户的生活质量。依据动态电价信息,结合分布式电源以及电动汽车的特性,在不影响用户生活质量的前提下,通过对可控负载进行调度安排,合理安排用电,有效最小化用电费用。

## 3 用户用电系统调度目标数学模型

### 3.1 光伏电池板数学模型

光伏发电效率高、占地小、节能环保,在大多数城市,用户侧分布式电源都采用光伏电池板,在本文中设定用户采用光伏电池板。光伏发电原理是利用光伏发电板将光能转化成电能,由于功率输出过程比较复杂,不仅和太阳关照强度、射入角、温度等相关,在功率输出时也考虑串联等问题,因此一般将其输出模型进行简化,数学模型如下所示<sup>[11-12]</sup>:

$$P_p = P_{STC} \frac{R_T}{R_{STC}} [1 + k_{PV}(T_c - T_r)] \quad (1)$$

式中:  $P_p$  表示光伏电池板在变化的光照强度和温度下的实际输出功率,  $P_{STC}$  为光伏电池板在标准测试条件下的最大输出功率,单位为 kW;  $R_T$  是实际当中太阳光照强度,  $R_{STC}$  是在标准测试条件下的太阳辐射强度,单位为  $W/m^2$ ;  $k_{PV}$  为功率温度系数,单位为  $\%/^{\circ}C$ ;  $T_r$  是电池板为室温  $25^{\circ}C$  时的温度,  $T_c$  是电池板的实际温度,单位为  $^{\circ}C$ 。

1) 光伏电池板容量平衡约束:

$$W_t^{g,store} = W_{t-1}^{g,store} - W_t^{g,ch} + W_t^{g,ru} \quad (2)$$

$$0 \leq W_t^{g,store} \leq W_e^g \quad (3)$$

式中:  $W_t^{g,ch}$ 、 $W_t^{g,ru}$  表示时段  $t$  光伏电池板输出、输入电容量,  $W_{t-1}^{g,store}$ 、 $W_t^{g,store}$  时段  $t-1$  和  $t$  光伏电池板储存的容量,  $W_e^g$  表示光伏电池板额定容量。

2) 光伏电池板能量流动守恒:

$$W_t^{g,ch} \cdot \eta_{ch}^g = W_t^{g,f} + W_t^{g,d} + W_t^{g,dw} \quad (4)$$

式中:  $W_t^{g,f}$ 、 $W_t^{g,d}$ 、 $W_t^{g,dw}$  分别表示时段  $t$  光伏电池板流向负载、电动汽车和电网的电能,单位为  $kW \cdot h$ ,  $W_t^{d,fu}$ 、 $W_t^{d,dw}$  表示时段  $t$  电动汽车流向负载和电网的电能。

### 3.2 电动汽车数学模型

电动汽车参与电力系统的运行和管理是智能电网的重要特征之一。通过技术手段和经济手段合理安排其充放电时间,确定电动汽车最优充放电策略。数学模型如下所示<sup>[13]</sup>:

$$S_{t+1} = S_t + P_t^{ch} \cdot \Delta t \cdot \eta_{ch}^d / W_e^d \quad (5)$$

$$S_{t+1} = S_t - (P_t^{disch} \cdot \Delta t) / (W_e^d \cdot \eta_{disch}^d) \quad (6)$$

式中:  $S_t$ 、 $S_{t+1}$  表示时段  $t$  和  $t+1$  电动汽车蓄电池的 SOC 值;  $P_t^{ch}$ 、 $P_t^{disch}$  分别表示时段  $t$  电动汽车的充、放功率,单位为 kW;  $\eta_{ch}^d$ 、 $\eta_{disch}^d$  分别表示电动汽车充电和放电的效率;  $W_e^d$  为电动汽车电池的额定容量,单位为  $kW \cdot h$ ;

电动汽车充放电的约束条件如下。

1) 电池充放电状态约束

$$SOC_c \leq S_t \leq SOC_e \quad (7)$$

式中:  $SOC_c$  表示用户要求的荷电状态;  $SOC_e$  表示电池满荷状态。

2) 电池容量平衡约束:

$$W_t^{d,store} = W_{t-1}^{d,store} - W_t^{d,dischar} + W_t^{d,ch} \quad (8)$$

$$0 \leq W_t^{d,store} \leq W_e^d \quad (9)$$

式中:  $W_t^{d,dischar}$ 、 $W_t^{d,ch}$  表示时段  $t$  电池充放电容量;  $W_{t-1}^{d,store}$ 、 $W_t^{d,store}$  时段  $t-1$  和  $t$  电动汽车电池储存的容量。

3) 电动汽车能量流动守恒:

$$W_t^{d,car} = (W_t^{g,d} + W_t^{dw,d}) \cdot \eta_{ch}^d \quad (10)$$

$$W_t^{d,dischar} \cdot \eta_{dischar}^d = W_t^{d,fu} + W_t^{d,dw} \quad (11)$$

式中:  $W_t^{d,car}$  表示时段  $t$  电流向电动汽车的电能,  $\eta_{ch}^d$  表示光伏电池板的输出效率。

### 3.3 用电负载数学模型

用电负载分为可控负载和不可控负载,如果对不可控负载进行调度安排,将会对用户生活质量产生严重的影响,因此不能对其进行调度安排。对于可控负载,其开始运行时间具有一定的灵活性,对其进行调度并不会影响用户的舒适度,通过对可控负载进行调度安排,可以有效地降低用户用电费用。假设在整个工作过程中功率都等于额定功率,可控负载数学模型如下所示<sup>[14]</sup>:

$$P_t = \begin{cases} P, & N_{start} \leq t \leq N_{stop} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $P_t$  表示负载在时段  $t$  的耗电功率,  $P$  表示负载的额定功率,  $N_{start}$  表示负载最大运行区间起始时隙序号,  $N_{stop}$  表示负载最大运行区间运行结束时隙序号。

1) 负载能量流动守恒

$$W_t^{fu} = W_t^{g, fu} + W_t^{d, fu} + W_t^{dw, fu} \quad (13)$$

式中:  $W_t^{fu}$ 、 $W_t^{dw, fu}$  表示时段  $t$  负载消耗的电能和电网流向负载的电能。

## 4 用户用电系统多目标调度模型建立

### 4.1 算法设计

Kennedy 博士和 Eberhart 教授于 1995 年提出的粒子群算法(PSO)是一种随机的、并行的优化算法,其算法简单,容易实现,且不要求被优化函数具有可微、可导、连续等性质,收敛速度较快<sup>[15]</sup>。算法中每个待优化问题的潜在解都是搜索空间中的一个粒子,每个粒子用于描述一个解空间中的备选解,所有粒子组成一个群体,粒子在解空间中根据自身的历史信息 and 群体信息共同决定其“飞翔”的速度和方向,以此来寻找最优解。

PSO 算法中第  $i$  个粒子在时段  $t+1$  的第  $d$  维领域函数计算公式如下<sup>[16]</sup>:

$$\begin{cases} V_{id}^{(t+1)} = \omega \cdot V_{id}^{(t)} + c1 \cdot r1 \cdot (P_{id}^{(t)} - X_{id}^{(t)}) + \\ \quad c2 \cdot r2 \cdot (P_{id}^{(k)} - X_{id}^{(k)}) \\ X_{id}^{(t+1)} = X_{id}^{(t)} + V_{id}^{(t+1)} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $V_{id}^{(t)}$ 、 $V_{id}^{(t+1)}$  表示粒子时段  $t$  和  $t+1$  运动速度向量;

$X_{id}^{(t)}$ 、 $X_{id}^{(t+1)}$  表示粒子时段  $t$  的位置向量,  $c1$ 、 $c2$  表示加速因子,  $r1$ 、 $r2$  表示在  $(0,1)$  的随机数,  $P_{id}^{(t)}$  表示粒子时段  $t$  个体位置最优值。

在领域函数产生新的粒子向量时,还需满足速度向量约束条件:

$$|V_{id}^{(t+1)}| \leq V_{max} \quad (15)$$

式中:  $V_{max}$  表示速度向量限制常数。

PSO 的选择函数定义为:

$$P_{id}^{(t+1)} = \begin{cases} X_{id}^{(t+1)}, & f(X_{id}^{(t+1)}) \leq f(P_{id}^{(t)}) \\ P_{id}^{(t+1)}, & f(X_{id}^{(t+1)}) > f(P_{id}^{(t)}) \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $f(\cdot)$  表示适应度(目标)函数。

### 4.2 用电系统多目标调度模型建立

通过对多个调度目标数学模型分析,建立一个离散时间模型,优化安排时长为一天,假设每小时分为  $n$  个时间段,即每个时间段  $\Delta t = 60/n$  min, 1 d 分为  $24n$  个时间段。例如:把每个小时分为 3 个时间段,则每个时间段为 20 min,每天分为 72 个时间段,即时间段  $s=1,2,3,\dots,72$ 。理论上  $n$  越大,每个时间段越短,模型精度越高,但计算量也越大,因此,实际中  $n$  的数值要综合多种因素决定。具体步骤如下:

- 1) 读取电价信息  $P = [P_1, P_2, P_3, \dots, P_n]$ , 确定光伏电池板以及电动汽车的相关参数;
- 2) 设置用户用电负载的最大运行区间、运行时间以及额定功率等参数;
- 3) 初始化粒子群。设置粒子群的规模  $N_p$ 、加速因子  $C_1$ 、 $C_2$ 、惯性因子  $\omega$  等参数;
- 4) 在搜索空间内随机初始化每个粒子的位置  $X_i$ , 并初始化每个粒子的速度向量  $V_i$ , 并设置每个粒子的最优位置  $L_i$ ;
- 5) 按式(14)更新每个粒子的速度,按式(15)约束粒子速度,更新每个粒子的位置,重置超出搜索空间粒子的最优位置;
- 6) 计算每个粒子位置的目标函数值,按式(16)更新每个粒子的个体历史最优位置与整个群体的最优位置;
- 7) 若满足停止条件,则停止搜索,输出搜索结果,即是群体位置最优值,否则便返回步骤 5)继续搜索。

## 5 实例分析

通过利用某居民用户的用电情况来验证本文所提出的用电系统多目标调度策略经济性和可行性,用电区间时长为 24 h,从 8 点开始,第 2 天 8 点结束。在本文当中,设定每小时分为 4 个时间段,即每个时间段  $\Delta t = 15$  min, 1 天分为 96 个时间段。用户主要用电负载用电情况如表 1 所示。

智能电网支持电动汽车等智能充电设备并网接入,当电动汽车被看作作用电负载时,可以在低电价时实现有序充电;当被看作储能设备时,可以在高电价时段向用电负载供

表 1 用户主要用电负载用电情况

序号	类型	名称	最大运行区间	运行时间/h	最早起始时间段	最晚结束时间段	额定功率(一般情况)/kW
1	不可调控	冰箱	8:00~8:00	24	0	96	0.2
2	不可调控	娱乐设备	19:00~23:00	4	44	60	0.6
3	不可调控	空调	19:00~8:00	13	44	96	1.8
4	不可调控	照明设备	19:00~23:00	4	44	60	0.2
5	可调控	热水器	19:00~23:00 7:00~8:00	1 0.5	44 92	60 96	1
6	可调控	电熨斗	19:00~23:00 7:00~8:00	0.25	44 92	60 96	1.6
7	可调控	电饭煲	19:00~20:00	0.5	44	48	0.5
8	可调控	洗衣机	23:00~7:00	1	66	92	1

电,也可以将电能反馈给电网。设定电动汽车在 8:00~19:00 被用户上班使用,其他时间电动汽车能够向负载或者电网反馈电能。在一般情况下,寓所和工作地点单程行驶所耗电量不超过电池容量的 20%,假定行驶所耗电量为

20%。电动汽车电池 SOC 最大值为 0.9,充电的判断过程设定为电池 SOC 低于 0.5 时充电较为合理。光伏电池板受天气、温度等因素影响,在这里设定光伏电池板正常情况下运行。电动汽车以及光伏电池板相关参数如表 2 所示。

表 2 储能设备相关参数

序号	名称	额定容量/(kW·h)	额定输入/输出功率/kW	充/放电效率/%	最大运行区间
9	光伏电池板	5	2	90	0~96
10	电动汽车	24	3.2	95	44~96

图 1 所示为该居民用户实时电价信息曲线,图 2 所示为用户主要用电负载最大运行区间曲线。

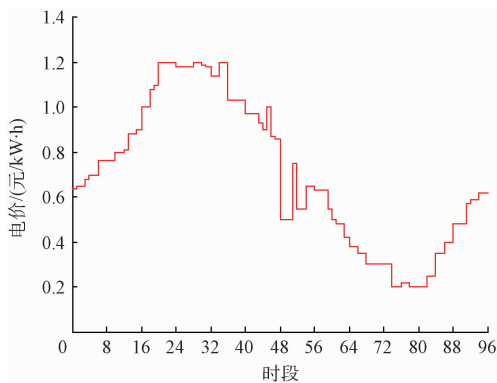


图 1 实时电价曲线

通过建立多个调度目标数学模型,结合用户主要用电负载的用电起始时间、用电时长、用电时段数的设计,充分利用动态电价,考虑智能电网环境下分布式电源、电动汽车向电网或者用电负载反馈电能的能力,建立用户用电系统调度模型。通过利用粒子群算法进行寻优求解,运用 MATLAB 对实例编写算法程序,给出一种以用电费用最小为目标的用电安排策略。具体用电随机安排和调度安

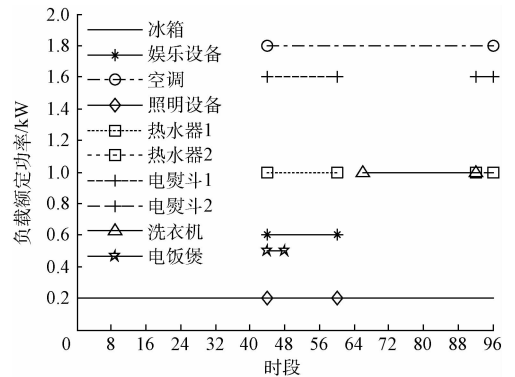


图 2 负载用电最大运行区间曲线

排如图 5~7 所示。

根据两种不同的用电安排策略,结合实时电价信息,运用 MATLAB 编程算出两种策略的用电费用。其用电费用比较如图 8 所示。

通过两种不同策略用电费用比较,在不影响用户用电舒适度的情况下,结合利用动态电价,分布式电源、电动汽车向电网卖电的能力,有效的降低了 34.6% 的用电费用,验证了用电策略的可行性和经济性。

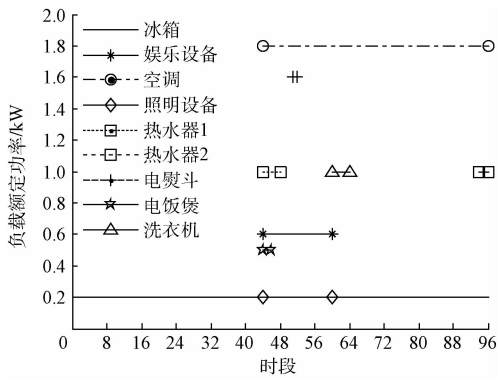


图 3 负载用电随机安排曲线

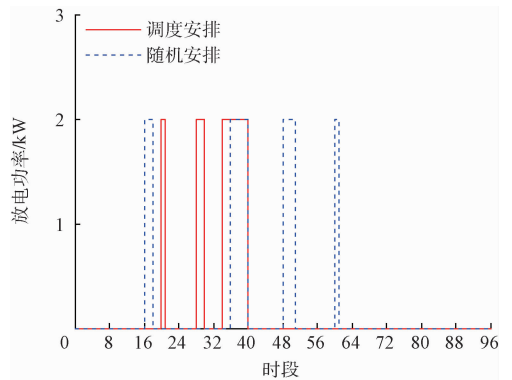


图 7 光伏电池板放电调度/随机安排曲线

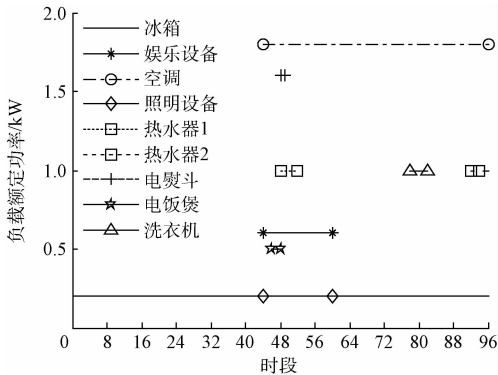


图 4 负载用电调度安排曲线

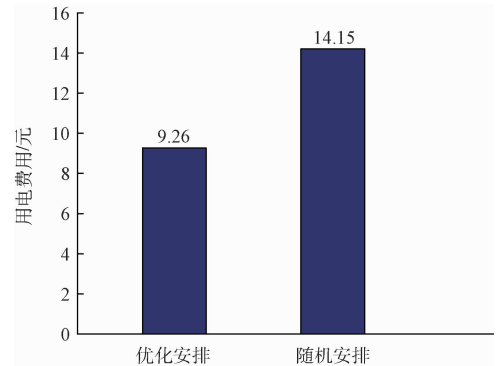


图 8 两种策略用电费用比较

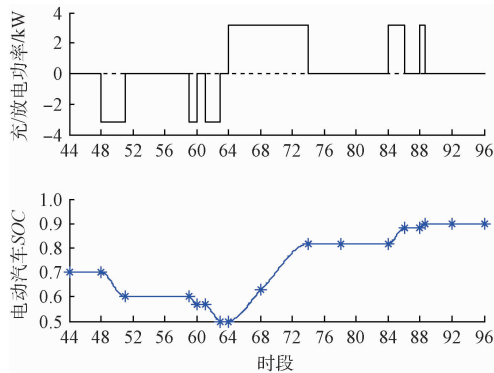


图 5 电动汽车充/放电随机安排曲线

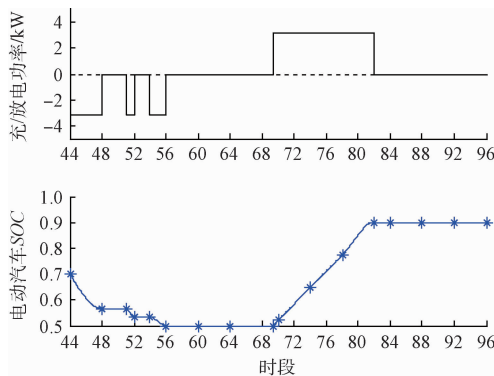


图 6 电动汽车充/放电调度安排曲线

## 6 结 论

本文深入分析了用户用电系统多目标调度对用户的影响，并在此基础上建立了各个调度目标的数学模型，通过对用户主要用电负载的用电起始时间、用电时长、用电时段数的设计，充分利用动态电价，结合在智能电网环境下分布式电源、电动汽车向电网或者负载反馈电能的能力，建立了用户用电系统模型。在不影响用户用电质量的前提下，通过利用粒子群算法进行寻优求解，给出一种以用电费用最小为目标的用电优化策略。通过对实例的分析求解，验证了用电策略的可行性和效益性，有效降低了用户用电费用，为用户合理用电提供了理论指导。

## 参考文献

- [1] 刘波, 邱晓燕. 主动配电网储能优化规划[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(5): 1180-1186.
- [2] 贾东梨, 杨旭升, 史常凯. 智能电网对用户用电的影响[J]. 电力建设, 2011, 32(6): 13-17.
- [3] 欧少华, 何志毅. 太阳能光伏辅助市电供电系统[J]. 国外电子测量技术, 2015, 34(6): 45-49.
- [4] 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.
- [5] WI Y M, LEE J, JOO S K. Electric vehicle charging method for smart homes/buildings with a photovoltaic system [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2013, 59(2): 323-328.
- [6] 杨永标, 颜庆国, 王冬, 等. 居民用户智能用电建模及优化仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 46-51.
- [7] 沈鑫, 曹敏, 周年荣, 等. 多微网配电系统协调优化调度和经济运行研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(4): 568-576.
- [8] 付子义, 王艺龙. 基于主从结构微网控制策略运行分析[J]. 电子测量技术, 2016, 39(10): 6-10.
- [9] 薛飞, 雷宪章, 张野飏, 等. 电动汽车与智能电网从 V2G 到 B2G 的全新结合模式[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 29-34.
- [10] 施泉生. 面向智能电网的需求响应及其电价研究[M]. 上海: 上海财经大学出版社, 2014.
- [11] 阿里·凯哈尼. 朱邦俊译. 智能电网规划与控制的方法和应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013.
- [12] 张鹏, 周碧英. 光伏电池精确工程模型及输出特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(1): 151-158.
- [13] 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(2): 18-26.
- [14] ZHAO Z, LEE W C, SHIN Y. An optimal power scheduling method for demand response in home energy management system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3): 1391-1400.
- [15] 郭力, 刘文建, 焦冰琦, 等. 独立微网系统的多目标优化规划设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 524-536.
- [16] 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.

### 作者简介

徐辉, 1992 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电网、电力电子技术等。  
E-mail: 1611624027@qq.com

(上接第 19 页)

- [9] 赵精博, 张军, 史晓锋. 基于 FPGA 的飞行校验多模信号采集与处理设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3): 102-106.
- [10] 宋雅琪, 韩晓军, 荣锋, 等. 基于 ARM 和 FPGA 的多通道振动信号采集仪的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2016(5): 25-28.
- [11] 郭丹蕊, 林晓焕, 单星, 等. 基于 DSP 的无刷直流电机控制系统研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(2): 98-101.
- [12] 孙桂涛, 邵俊鹏, 赵新通, 等. 液压机器人作动器建模及关节转角跟踪控制[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(3): 584-591
- [13] 孟祥萍, 寇磊, 苑全德, 等. 基于改进型积分分离式 PID 的机器人运动控制[J]. 东北电力大学学报, 2016, 36(5): 86-91.
- [14] 邱忠才, 肖建, 郭冀岭, 等. 永磁同步电机速度预测电流解耦控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 648-654.

### 作者简介

杨洋, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为智能信息处理在电力系统中的应用。  
E-mail: 903807797@qq.com

赵春璋, 1989 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为电磁干扰分析。