

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.06.024

计及实时电价的柔性负荷系统需求 侧响应机制研究*

阮冰洁, 杨 强, 颜文俊*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:针对分布式发电(DG)供电量在不同时刻具有波动性且随机性所引起的直接供电无法充分满足负荷用电需求的问题,对被供电对象中的柔性负荷进行了负荷控制研究,通过合理规划柔性负荷的用电时段以使其从需求侧响应 DG 供电;并对储能设备的充放电策略进行了探索,进而从供应侧匹配了负荷用电需求,最后提出了一种基于改进的遗传算法的需求侧响应机制,建立了减少用电成本与寻求电量供需平衡为双重目标的多目标整数不等式规划问题,利用 Matlab 仿真平台对家居混合供电系统的能量优化调度进行了测试。研究表明,该算法能够实现完善供需匹配度、提高 DG 电能利用率、保障用户经济效益的功能,系统响应迅速、可靠性高。

关键词:需求响应;遗传算法;负荷控制;储能控制

中图分类号:TM762

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)06-0857-06

Demand response under real-time price for domestic energy system

RUAN Bing-jie, YANG Qiang, YAN Wen-jun

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at addressing the challenge induced by the stochastic and intermittent feature of the distributed generation (DG) resources, which barely can meet the demand of all domestic equipment at any time, load control was studied to appropriately schedule the flexible loads' working periods to meet with the DG power supply at the demand side, and storage control was proposed to allocate the battery's charging/discharging behaviors to redistribute the DG resources at the supply side. Finally, an energy optimization control algorithm was implemented through adopting an improved genetic algorithm (GA), which establishes multi-objective integer programming problem aiming to decrease the purchase cost and seek the balance between power supply and demand, and demand response for domestic energy system was tested on the Matlab simulation platform. The result demonstrates that the energy optimization control algorithm can well manage the domestic energy to meet the demand requirement with significantly improved resource utilization efficiency and reduced purchase cost, and the system is with quick response and high reliability.

Key words: demand response; genetic algorithm; load control; storage control

0 引 言

随着小型风机、屋顶光伏等分布式电源(distributed generation, DG)在用户侧的投入运行,家居混合供电系统的智能化发展及柔性负荷在家庭用电设备比重

的不断提升,充分使用 DG 提供的自产电能以实现家居能量体系的经济化运行越来越得到用户的关注^[1]。然而,由于受风速、光照强度等环境因素的影响,DG 供电量在不同时刻具有波动性、随机性与间歇性,直接采用其当前时刻的产电量为负荷供电存在一定局限

收稿日期:2015-01-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51107113);浙江省公益性技术应用研究计划项目(2013C31005)

作者简介:阮冰洁(1990-),女,浙江台州人,主要从事微网能量优化方面的研究。E-mail:ruanbingjie_zju@163.com

通信联系人:颜文俊,男,教授,博士生导师。E-mail:yanwenjun@zju.edu.cn

性,因而,合理规划柔性负荷的用电时段^[2]、制定储能设备的充放电策略^[3-4]、综合优化家居混合供电系统中的能量分配具有重要理论意义和市场价值。

本研究设定在用户侧安装含能量消耗控制器的智能电表,实现实时电价与负荷用电量间的信息双向通讯。通过线性不等式约束条件建立柔性负荷工作模型,在智能电表中设置需求响应程序,快速计算得出设备最佳用电时段,自动设定设备的开启与关闭,合理规划蓄电池的充放电策略。在此过程中,通过实时电价辅助从大电网向蓄电池或负荷供电的方式,弥补供需差异,最大程度降低购电费用。

本研究对被供电对象中的柔性负荷进行负荷控制研究。

1 智能家居混合供电系统

笔者所研究的家居混合供电系统框架模型如图 1 所示,屋顶安装光伏发电板,屋前安装小型风机,作为分布式发电设备(DG)形成混合供电系统,为家庭用电设备提供自产电能。通过在用户侧安装含能量消耗控制器的智能电表(AMI),可以实时传达大电网中不断更新的实时电价数据给用户,为能量消耗控制器的调度抉择提供外界参考信息,以使其决定设备的运行时刻及电量供需状况,实现智能电网与用户间的双向通讯^[5]。在这个过程中,智能电网提前为用户提供实时电价信息,方便用户安排用电设备的使用时段;用户为智能电网提供用电量需求及设备用电约束条件,方便电网系统发电及储能设备的能量调配。家庭所有用电设备和储能设备均连接到家庭局域网(HAN)中,通过 ZigBee 组网进行节点通信,并快速响应与局域网相连的 AMI 中的负荷控制器的决策,最终,通过智能开关实时操控用电设备的开关状态及储能设备的充、放电策略。

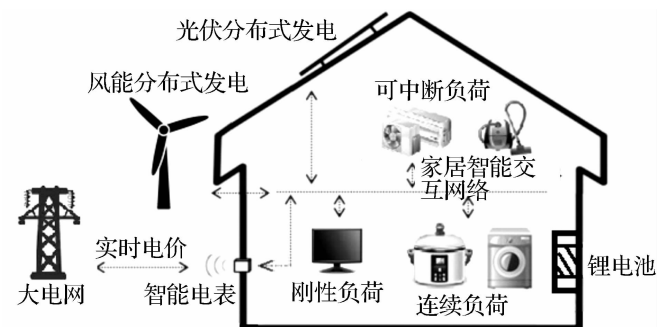


图 1 实时电价环境下的家居混合供电系统模型

用户负荷主要分为 3 类^[6]:①刚性负荷,电力的使

用时间和数量与电价基本无关,如基本照明、电冰箱、电视机、计算机等等。②不可中断负荷,需要 DG 或电网对其持续性供电,工作时段必须保证连续性,即一旦设备开始运行,必须完成其工作要求才能停止,但整体工作时段可以调节,如电饭煲、洗碗机、洗衣机等。③可中断负荷,时间弹性较大,可以配合负荷控制策略灵活调节设备的工作时间安排,在允许工作的时段范围内以最小时间间隔随意开停,如空调、水泵、地面清洁机器人等。后两种属于柔性负荷,工作时间可推迟或可提前。

刚性负荷的用电需求必须优先被满足,直接由 DG 无条件供电,且一般用电量较少。至于柔性负荷,因其用电时段可控的性质,需要对其建立工作模型^[7-8],如下式所示:

$$\begin{cases} \alpha_a \leq t_a^{\text{start}} \leq h_a \leq t_a^{\text{end}} \leq \beta_a, & a \in 1, \dots, m+n \\ x_a^h = \{0, 1\}, & h \in \forall h_a \\ \beta_a - \alpha_a \geq d_a \\ \sum_{h \in \forall h_a} x_a^h = d_a \\ E_a = P_a \times d_a \\ \sum_{h=\alpha_a}^{\beta_a} x_a^h \times P_a = E_a \end{cases} \quad (1)$$

式中: h_a —设备可能工作的时间点; t_a^{start} —设备开始工作时刻; t_a^{end} —设备结束工作时刻; $[\alpha_a, \beta_a]$ —设备允许工作时段范围; a —设备编号; m —不可中断负荷数量; n —可中断负荷数量; x_a^h —设备 a 在 h_a 时刻的工作状态,其值为 1 表示设备处于工作阶段,其值为 0 表示设备处于停用状态; d_a —工作时长; P_a —设备额定功率; E_a —设备总功率需求。

设备允许工作时段范围必须不小于其为完成任务所需的总时长,且无论如何安排设备工作状态,必须保证其在可调度范围内完成任务。

2 负荷控制

由于屋顶光伏、小型风机这些自备分布式发电设备(DG)的发电量可以免费地供自家用户使用,负荷控制首当其冲需要考虑的便是充分发挥柔性负荷工作时间的可调度性,在保证负荷本身约束条件的前提下,尽可能地将其用电时段调节到 DG 输出量富裕的时刻。

2.1 基于 DG 的负荷控制模型及算法

基于 DG 的负荷控制的核心思想:根据 DG 的输出功率安排柔性负荷的工作时段,以保证充分使用

DG 的供电。

从用户效益角度出发,建立含小型风电、光伏发电等自备电源的负荷控制模型^[9],因 DG 和负荷间的供需差异越小越利于降低购电费用,故其目标函数如下式所示:

$$\min \sum_{h=1}^{48} \left| P_{\text{DG}}^h - P_{\text{must}}^h - \sum_{a=1}^{m+n} x_a^h \cdot P_a \right| \quad (2)$$

式中: P_{DG}^h —DG 在 $h \in 1, 2, \dots, 48$ 时刻的供电功率; P_{must}^h —刚性负荷在相应的 h 时刻的用电需求。

本研究采用遗传算法(GA)获得 DG 与负荷间的电能匹配,由于适应度值越大的染色体组越有机会参与下一次的遗传迭代,笔者选取目标函数的倒数作为遗传算法(GA)的适应度函数。

基于 DG 的负荷控制的改进遗传算法如下:

1:初始化种群大小 N ,每个染色体长度 48,交叉概率 pc ,变异概率 pm ,前 $store$ 位染色体组不参与交叉变异,遗传算法最大迭代代数 gen 。

2:遵循公式(1)随机初始化各个设备约束条件下的 N 组 24 小时工作状态矩阵 X_a ,最后形成所有设备的染色体组 X_{chrom} 。

3:FOR $t \leftarrow 1$ 至 gen 执行

4:按照公式(2)计算第 t 代的目标函数值,并将其倒数作为相应的适应度值。

5:FOR $i \leftarrow store + 1$ 至 N 执行

6:采用轮盘赌法选择复制 N 组 X_{chrom} 中的一些适应度值较高的染色体组作为较有优势的第 t 代染色体组 $X_{\text{chrom}}(t)$ 以有机会参与下一代遗传迭代。

7:IF 满足 $rand(0,1) < pc$ 且设备 a 不可中断

8:整段向左或向右移动设备工作时段;

9:ELSEIF 满足 $rand(0,1) < pc$ 且设备 a 可中断

10:在两个父代染色体组 X_{chrom} 中的设备 a 染色体的随机位置处进行交叉,得到 2 个新的子代个体,最后形成新的染色体组。

11:END IF

12:IF 满足变异概率 $rand(0,1) < pm$

13:随机选择设备 a 执行变异操作。

14:IF 不满足工作时长

15:将多余的 1 或 0 二进制变量改变成其相反值,保证整体工作时长。

16:END IF

17:END IF

18:END FOR

19:选择 N 个种群中最小目标值所对应的染色体组 $X_{\text{chrom}}(t)$,更新最佳的 X_{chrom} ,选择适应度值较大的 $store$ 组染色体组作为下一代 $X_{\text{chrom}}(t+1)$ 的前 $store$ 位较佳染色体组。

20:END FOR

经过上述操作流程,最终得到的最小目标函数值所对应的 X_{chrom} 代表家居混合供电系统中所有柔性负荷在基于 DG 负荷控制下的最佳工作状态集。

2.2 基于 RTP 的负荷控制模型及算法

通过执行基于 DG 的负荷控制模型,可以在无储能情况下最大限度使用 DG 供电,但是仍然可能会存在以下现象:对于某些时段,因 DG 供电不足,无论如何安排柔性负荷的用电时段,总会存在供电量低于需求量的情况,此时,采用公式(2)所示的模型已经无法再继续优化分配柔性负荷的用电安排,自备电源已无法满足用户用电需求。然而,由于家居混合供电系统是与大电网相连的,存在实时电价信息变化,如何根据电力市场的实时电价信息(RTP)作为调节杠杆,转移部分负荷的工作时段以降低从电网处的购电费用是此处所需重点解决的问题。

基于 RTP 的负荷控制的核心思想:以经过 DG 负荷控制调节的用电负荷工作时段为基础,根据 RTP 的实时变化,转移部分负荷以寻求无储能环境下的总购电费用最低化。

建立基于 RTP 的负荷调度策略目标函数及约束条件,如下式所示:

$$\begin{aligned} \min & \{ 0.5 \times c_a^j \times \text{RTP}_j + 0.5 \times c_a^k \times \text{RTP}_k \} \\ & a \in \{ a \mid x_a^j = 1, \quad a = 1, \dots, m+n \} \\ & j \in \{ h \mid P_{\text{DG}}^h < P_{\text{load}}^h, x_a^h = 1, \quad h = 1, \dots, 48 \} \\ & k \in \{ h \mid x_a^h = 0, \quad h = [\alpha_a, \beta_a] \} \\ \text{s. t. } & c_a^j = \begin{cases} 0, & P_{\text{DG}}^j \geq P_{\text{load}}^j - P_a \\ P_{\text{load}}^j - P_a - P_{\text{DG}}^j, & P_{\text{DG}}^j < P_{\text{load}}^j - P_a \end{cases} \\ & c_a^k = \begin{cases} 0, & P_{\text{DG}}^k \geq P_{\text{load}}^k + P_a \\ P_{\text{load}}^k + P_a - P_{\text{DG}}^k, & P_{\text{DG}}^k < P_{\text{load}}^k + P_a \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: P_{DG}^j —DG 在 j 时刻的供电功率; P_{load}^j —刚性负荷和柔性负荷在 j 时刻的总耗电功率,设备 a 从 j 时刻转移到 k 时刻; c_a^j —移除设备 a 后在 j 时刻需要向电网购买的用电功率; c_a^k —将设备 a 转移至 k 时刻后在 k 时刻需要向电网购买的用电功率; $\text{RTP}_j, \text{RTP}_k$ —相应时刻的实时电价。由于所有设备在每个采样点的执行时长为半小时,而购电量是购电功率与时长的乘积,目标函数需要分别乘以 0.5 h。此外由于同一个设备无法在当天的同一个时刻运行两次,必须保证设备 a 所需要转移至的 k 时刻在执行转移前没有运行设备 a ,即在转移之前必须保证 $x_a^j = 1$ 且 $x_a^k = 0$ 。

3 储能控制

负荷控制是从需求侧改善设备用电工作时段,而储能控制则是从供应侧重构 DG 供电量^[10]。通过在用户侧增设锂电池等储能装置,合理调控其充放电动作,使得 DG 产生的电能被用电负荷利用或被储能设备存储,并在系统缺乏电力供应时放出。

基于储能设备的能量优化模型核心思想:在空间和时间两个维度对 DG 的能量分布进行重构,弥补不同时刻的供需差异。建立基于储能设备的能量优化调度模型,如下式所示(其中:采用锂电池作为储能装置,限制其在荷电状态(SOC)范围 $[SOC_{min}, SOC_{max}]$ 内充、放电):

$$\min \sum_{h=1}^{48} | (P_{DG}^h - P_{load}^h) \times 0.5 - (SOC_h - SOC_{h-1}) \times C_{bat} |$$

$$P_{load}^h = P_{must}^h + P_{flexible}^h$$

$$E_{charge}^h = \begin{cases} \text{if } P_{DG}^h > P_{load}^h: \\ \min \{ (P_{DG}^h - P_{load}^h) \times 0.5, \\ (SOC_{max} - SOC_{h-1}) \times C_{bat} \} \\ \text{elseif } P_{DG}^h < P_{load}^h: \\ \max \{ (P_{load}^h - P_{DG}^h) \times 0.5, \\ (SOC_{min} - SOC_{h-1}) \times C_{bat} \} \end{cases} \quad (4)$$

$$SOC_h = SOC_{h-1} + \frac{E_{charge}^h}{C_{bat}}$$

$$SOC_{min} \leq SOC_h \leq SOC_{max}$$

式中: C_{bat} —蓄电池容量; SOC_h — h 时刻的荷电状态; E_{charge}^h —记录锂电池在 h 时刻的充放电状况,kWh。

储能控制基本调度思路:通过储能装置的充放电动作,动态调节 DG 供电量,使其与负荷用电需求相匹配,最大限度提高 DG 利用率。通过转移 DG 的供电量以配合用户电力需求,对于多出来的电量,采用蓄电池等储能设备进行储能;对于缺少的电量,采用锂电池进行短期放电;对于实时电价较低且未来有放电需求的时刻,从大电网向蓄电池充电以累积电能,并在高电价或电力短缺的时期释放电池中的能量,当然,用户需支付从大电网向蓄电池充电的购电费用;若 DG 当前供应量及蓄电池放电量还不能满足用户用电需求,再从大电网直接对用电负荷供电。

4 实验及结果分析

该仿真系统基于 Matlab,所有的仿真决策以半小时为时间间隔,将一天工划分为 48 个时间片段。通过

对比有无采用负荷控制和储能控制,所设计的仿真对比案例如表 1 所示。

表 1 不同情况下的仿真对比案例

案例	基于负荷控制	基于储能控制
I	×	×
II	√	×
III	√	√

4.1 仿真参数设置

澳大利亚能源市场运营商(AEMO)提供的实时电价及分布式发电数据如图 2 所示。

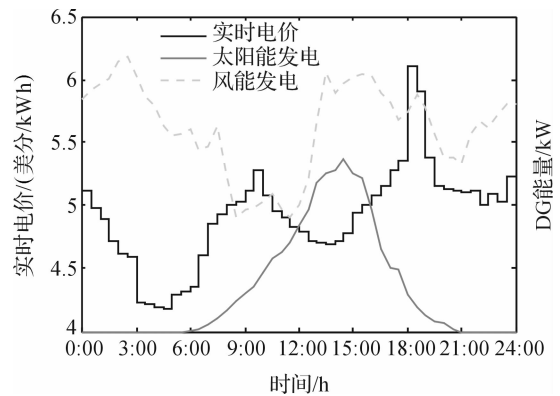


图 2 实时电价及分布式发电

家居系统的柔性负荷包含有 3 种不可中断负荷和 13 种可中断负荷,其工作特性及约束条件如表 2 所示,其中不可中断负荷用 * 标记,其余为可中断负荷。

表 2 柔性负荷工作特性

设备	$\alpha_a \sim \beta_a$	时长/h	额定功率/kW
洗碗机 *	08:00—12:00	1.5	0.73
	20:00—23:00		
电饭煲 *	06:00—08:00	1.0	0.80
	18:00—20:00		
洗衣机 *	06:00—09:00	2.0	0.38
	17:00—20:00		
空气增湿器	00:00—09:00	4.0	0.15
	14:00—20:00		
衣服烘干机	09:00—12:00	2.0	1.26
	20:00—23:00	1.5	
地面清洁机器人	06:00—12:00	3.0	0.74
	08:00—18:00	2.5	
热水器	20:00—23:30	1.5	0.64
	04:30—08:30	3.0	
电水壶	16:00—20:00	2.0	1.85
	20:00—24:00	3.0	
电水壶	06:00—07:30	0.5	1.50
	16:00—19:00		
	20:00—23:00		

(续表)

设备	$\alpha_a \sim \beta_a$	时长/h	额定功率/kW
空调	00:00—08:00	3.0	
	16:00—24:00	4.0	1.00
	00:00—08:00	4.0	1.10
	18:00—24:00	4.0	
电暖气	12:00—17:00	2.5	2.00
泳池水泵	07:00—18:00	4.0	1.80
水泵	06:00—15:00	6.0	1.60
榨油机	09:00—18:00	3.5	0.35
地面打蜡机	14:00—18:00	3.0	0.42
电烤炉	13:00—18:00	2.0	1.30
混合动力车	00:00—08:00	3.5	2.40

设置遗传算法种群大小 $N = 50$, 最大迭代次数 3 000, 交叉概率 $pc = 0.7$, 变异概率 $pm = 0.05$ 。蓄电池容量 $C_{bat}: 220 \text{ Ah}, 12 \text{ V}, 2.64 \text{ kWh}$, 荷电状态范围 20% ~ 90%。

4.2 实验结果分析

从供需匹配度、DG 利用率、经济性 3 个角度验证算法的有效性。

4.2.1 供需匹配度

供需匹配度是衡量负荷用电需求被满足的状况。案例 I ~ III 的供需平衡状态如图 3(a ~ c) 所示。可以看到,图 3(a) 由于没采取任何控制措施,用户随机安排负荷,如 0:00 ~ 6:00、12:00 ~ 16:00 时段存在 DG 供电严重浪费现象,而 6:00 ~ 12:00、18:00 ~ 22:00 时段存在很多用电设备无法直接从 DG 来满足其用电需求的状况。图 3(b) 采取负荷控制后,总负荷需求与 DG 间的匹配度明显变高,大部分负荷根据 DG 发电状况合理地规划了用电时刻。图 3(c) 继续采取储能控制后,各时刻多余的 DG 电能通过充电存储在蓄电池中,并在短缺时刻放电,匹配状况最好。

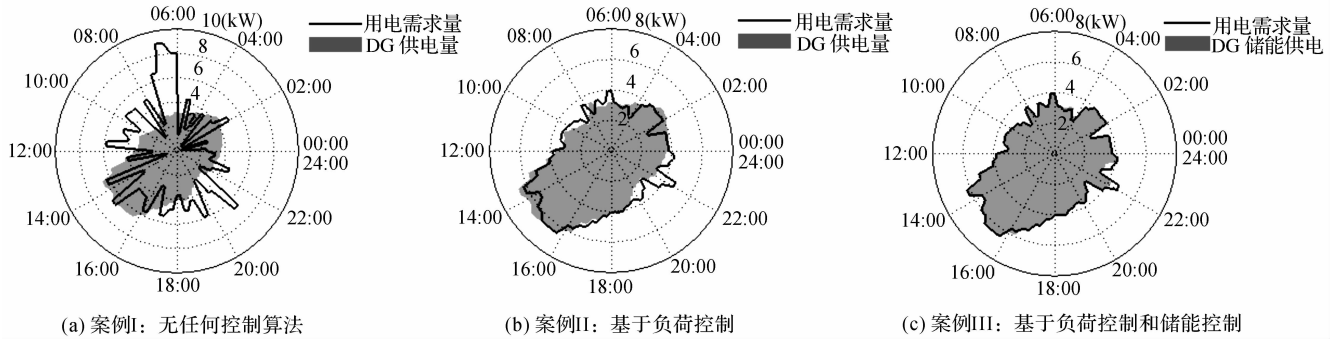


图 3 DG 和负荷的供需匹配度

4.2.2 DG 利用率

DG 利用率表示了 DG 被负荷或蓄电池利用的情况,也是间接衡量负荷安排是否合适的标准,如下式所示:

$$U(h) = \begin{cases} P_{load}^h + \max\{E_{charge}^h, 0\}, & P_{DG}^h > P_{load}^h \\ P_{DG}^h, & P_{DG}^h \leq P_{load}^h \end{cases} \quad (5)$$

案例 I—III 的 DG 利用率状态如图 4(a-c) 所示,

可以明显看到采取负荷控制和储能控制算法后 DG 利用率的逐步改善。

案例 I 的 DG 平均利用率 80.67%, 向电网支付的购电费用 99.3 美分; 案例 II 的 DG 平均利用率 96.09%, 向电网支付的购电费用 23.1 美分; 案例 III 的 DG 平均利用率进一步提升至 99.39%, 只需向电网支付 4 美分, 包含向负荷供电及电网向蓄电池供电的费用。

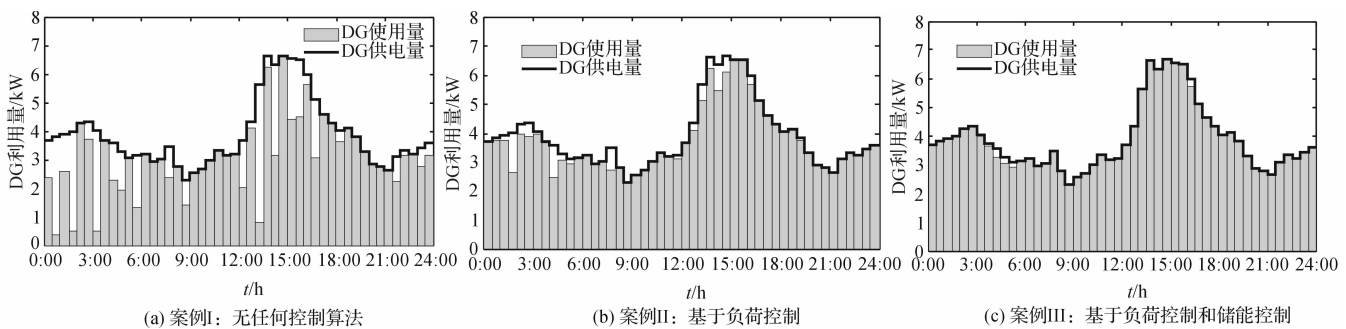


图 4 DG 利用率

4.2.3 经济性效益

笔者通过对昆士兰州 QLD 地区在 2014 年 3 月 ~ 5 月期间每天的实时电价及太阳能、风能发电量日前预测量数据进行搜集,运用本研究提出的能量调度策略,针对案例 I / II / III 进行仿真,计算 3 个月内的每日购电费用,未经调度时总费用 9 353.5 美分,经过调度后 727.5 美分,因而采用本研究所提出的控制算法可以为用户节省共 8626 美分,充分体现出该调度策略的经济性,长期以往将很可观。

5 结束语

本研究在智能电网信息双向交互的环境下,规划用户柔性负荷的用电时段,并制定蓄电池的能量调度策略,实现家居混合供电系统能量使用最优化,既保留了供需平衡所带来的社会经济效益,又满足用户效用最大化及费用最小化,并从建模方法、分析角度等方面对现有能量调度手段进行了一些改进,仿真结果有效地验证了所提控制算法的有效性。未来可考虑当 DG 及 RTP 数据存在预测误差时,采取在线校正环节保证系统的鲁棒性。

参考文献 (References):

- [1] SUN W Q. Flexible load shedding strategy considering real-time dynamic thermal line rating[J]. **IET Gener. Transm. Distrib.**, 2013, 7(2): 130-137.
- [2] MOHSENIAN-RAD A H, LEON-GARCIA A. Optimal residential load control with price prediction in real-time elec-

tricity pricing environments[J]. **IEEE Trans. Smart Grid**, 2010, 1(2): 120-133.

- [3] MARRA F. A Decentralized storage strategy for residential feeders with photovoltaics[J]. **IEEE Trans. Smart Grid**, 2014, 5(2): 974-981.
- [4] 刘 霞,江全元. 基于飞轮储能和蓄电池的微电网控制策略[J]. **机电工程**, 2012, 29(5): 553-558.
- [5] PEDRASA M A A, SPOONER T D. Coordinated scheduling of residential distributed energy resources to optimize smart home energy services[J]. **IEEE Trans. Smart Grid**, 2010, 1(2): 134-143.
- [6] 王 珂,姚建国,姚良忠. 电力柔性负荷调度研究综述[J]. **电力系统自动化**, 2014, 38(20): 127-135.
- [7] ADIKA C O, WANG L. Autonomous appliance scheduling for household energy management[J]. **IEEE Trans. Smart Grid**, 2014, 5(2): 673-682.
- [8] CONEJO A J, MORALES J M, BARINGO L. Real-time demand response model [J]. **IEEE Trans. Smart Grid**, 2010, 1(3): 236-242.
- [9] NGUYEN H T, NGUYEN D T. Energy management for households with solar assisted thermal load considering renewable energy and price uncertainty [J]. **IEEE Trans. Smart Grid**, 2015, 6(1): 301-314.
- [10] WANG Y, LIN X. Adaptive control for energy storage systems in households with photovoltaic modules [J]. **IEEE Trans. Smart Grid**, 2014, 5(2): 992-1001.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

阮冰洁,杨 强,颜文俊. 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 Bing-jie, YANG Qiang, YAN Wen-jun. Demand response under real-time price for domestic energy system[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2015, 32(6): 857-862.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>