

智能家居中基于实时电价的家用电器调度方案^①

潘争光^{1,2}, 赵奎²

¹(中国科学院大学, 北京 100049)

²(中国科学院 沈阳计算技术研究所, 沈阳 110168)

摘要: 针对现有调度方案中不能解决电器使用的不确定性和可再生能源的问题, 提出了一种考虑不确定性的基于实时电价的家用电器任务调度方案, 该方案采用线性规划的建模方法, 以最小费用支出为优化目标, 兼顾了 PV 光伏系统、家用蓄电池以及向电网出售剩余电力情况下的能量流动, 用随机规划方法和蒙特卡罗模拟来解决电器使用过程中的不确定性, 保证了用户满意度. 最后经实验证明, 该方案具有重要的实际意义.

关键词: 智能电网; 实时电价; 电器调度; 随机规划; 蒙特卡罗模拟

Household Appliance Scheduling Solution Based on Real-Time Electricity Pricing in Smart Home

PAN Zheng-Guang^{1,2}, ZHAO Kui²

¹(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

²(Shenyang Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110168, China)

Abstract: Since the existing scheduling solution can not deal with the uncertainties in household appliance operation time and renewable generation, we propose a solution based on real-time electricity pricing. The solution adopts linear programming model and tries to minimize the total monetary expense. Beside, the solution takes into account the photovoltaic systems, home battery and the sale of excess energy. To handle the uncertainties in household appliance operation time and ensure the users' satisfaction, a stochastic scheduling technique and Monte-Carlo simulation are used. Finally, the simulation results demonstrate the practical significance of our solution.

Key words: smart grid; real-time electricity pricing; household appliance scheduling; stochastic scheduling; Monte-Carlo simulation

进入 21 世纪, 随着传统化石能源的消耗殆尽, 节能减排的呼声越来越高, 各种清洁能源逐渐受到各国政府和人民的重视. 此时, 智能电网应运而生, 它利用先进的信息技术, 以物理电网为基础, 通过先进的监测手段, 通过与用户进行紧密联系, 充分满足用户的需求, 整合各种清洁能源, 合理分配资源, 保障了电力系统的安全性和经济性^[1,2].

家用电器的调度问题是智能电网中的研究热点, 不少学者也提出了一些解决方案. 文献[3]中利用实时电价进行错峰消费, 对降低用户费用支出和平衡电网负载有一定的效果; 文献[4]提供了一种共同考虑用户等待时间和费用的调度方案, 提高了用户满意度; 文献[5]中的调度方案进一步考虑每个电器的调度优先

权, 更加符合实际情况; 但是这些调度方案都没有考虑到可再生能源发电的情况, 同时这些方案都假设家用电器都是可以随机中断的, 这都不符合实际情况; 文献[6]虽然考虑了可再生能源的情况, 同时, 该方案系统地在家用蓄电池、PV 光伏系统和出售剩余电力等情况结合在一起, 但却没有考虑到家电使用过程中的不确定性, 而这种不确定性在调度过程中是非常重要的^[7].

通过分析和总结, 本文提出更加全面的实用方案. 该方案采用线性规划的建模方法, 以最小费用支出为优化目标, 兼顾了 PV 光伏系统、家用蓄电池以及向电网出售剩余电力情况下的能量流动, 用随机规划方法和蒙特卡罗模拟来解决电器使用过程中的不确定性, 保

① 收稿时间:2016-02-24;收到修改稿时间:2016-04-08 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005417]

证了用户满意度. 以此得到最有效最符合实际的家电调度方案. 最后通过实验也证明了本方案的有效性.

1 调度方案

1.1 方案简介

本文提出的方案综合考虑了实时电价和用户满意度, 兼顾了 PV 光伏系统、家用蓄电池以及向电网出售剩余电力情况下的能量流动, 模型还独创性地考虑到了电器使用过程中的不确定性. 实时电价可以从电力公司处获取, 用户需求可以通过人机交互界面由用户输入到调度系统.

本方案主要用以下三个模型来构建: 1) 线性规划模型, 以最小费用支出作为最优化目标, 以用户需求、电网限制、PV 系统等信息作为约束条件, 用于在不考虑电器使用过程中不确定性情况下, 获取最优家用电器调度方案. 2) 用户满意度模型, 用于描述用户对于调度方案的满意程度, 满意度得分由一个分段函数来表达, 各电器的满意度得分权重由用户需求决定. 3) 不确定性模型, 考虑了电器使用不确定性的情况, 假定电器使用时长和能耗的不确定性服从于高斯分布, 用随机规划方法和蒙特卡罗模拟来解决不确定性因素, 得到最优调度方案, 并且该调度方案能保证用户满意度不低于设定阈值. 通过上述模型, 最终获得最实际地最有效的最优调度序列.

1.2 线性规划模型

一般用户家庭中都有多种电器, 比如空调、电视机、洗衣机、冰箱等. 假定 α 代表一个电器, A 代表一个电器集, 对于任何一个电器, $\alpha \in A$, 能量消耗向量 X 被定义为:

$$X \triangleq [X_\alpha^1, \dots, X_\alpha^T]$$

这里 T 代表代表时间单元.

对于每个时间单元, $t \in T \triangleq [1, 2, \dots, T]$, 向量 X 中的元素 x_α^t 代表电器 α 在时间段 t 消耗的电量. 同时, 两个时间节点, t_1 和 t_2 被定义, 分别用来表示电器 α 使用的起始时间和结束时间, 显然 $t_1 < t_2$, 当在此时间段外时, 该电器不消耗电量, $x_\alpha^t = 0$, 见公式(2).

每个电器都有其最高功率, 即在每个时间段内, 每个电器消耗的电量有上限, 假设电器都是以正常功率工作, 暂不考虑变频功能. 则每个时段电器的能耗约束条件如公式(3)所示, 其中 W_α 表示电器 α 的运行功率. 根据电器所需运行的时长, 得出该电器的总能

耗, 如公式(4), 各电器在所有时间段能耗的总和应该等于该总能耗, 该关系如公式(5)所示.

公式(6)表示, 在普通住宅用户中, 所有正在运行的电器的功率总和不能超过最高限制功率, P 代表最高功率阈值.

公式(7)表示, 每个电器的能源来自三个方面, 蓄电池、电网和 PV 光伏系统, 其中 y_b^t 表示来自蓄电池的能量, y_s^t 表示来自 PV 系统的能量, y_g^t 表示来自电网的能量.

公式(8)表示, 每个时段中 PV 系统的发电量 e_s^t 应该不小于该时段的蓄电池充能 z_s^t 、供给家电 y_s^t 、向电网出售电力 s_s^t 三者之和.

公式(9)表示, 每个时段中蓄电池的状态与前一个时段的蓄电池状态相关, 其值应该等于上个时段中电池能量加上 PV 系统充能, 在减去上个时段供给家电的能量.

公式(10)表示, 当电器为不可中断电器时, 至少需要连续运行 L_α 个时间段时的约束条件.

总费用由四个模块构成, 1) 来自电网的费用 $y_g^t \times p_g^t$, p_g^t 指各时段的实时电价; 2) 来自 PV 系统的费用 $e_s^t \times p_s^t$, 前者指每个时段的发电量, 后者指归一化后的单位发电成本; 3) 来自蓄电池的成本支出 $z_s^t \times p_b^t$, 前者指每个时段的充电量, 后者指归一化后的蓄电池单位成本; 4) 来自向电网出售剩余电力的收入, $s_s^t \times price_s$, 前者指售出电量, 后者指售出价格.

因此, 本系统的优化目标函数如下:

$$\sum_{t \in T} (y_g^t \times p_g^t + e_s^t \times p_s^t + z_s^t \times p_b^t - s_s^t \times price_s) \quad (1)$$

约束条件:

$$x_\alpha^t = 0, t \in [t_1, t_2] \quad (2)$$

$$x_\alpha^t \leq W_\alpha, \forall t \in T, \alpha \in A \quad (3)$$

$$E_\alpha^T = W_\alpha \times N_\alpha \quad (4)$$

$$\sum_{t \in T} x_\alpha^t = E_\alpha^T, \forall \alpha \in A \quad (5)$$

$$\sum_{\alpha \in A} x_\alpha^t \leq P, \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{\alpha \in A} x_\alpha^T = y_b^t + y_s^t + y_g^t, \forall t \in T \quad (7)$$

$$S_s^t + y_s^t + z_s^t \leq e_s^t, \forall t \in T \quad (8)$$

$$z_b^t = z_b^{t-1} + z_s^{t-1} - y_b^{t-1}, \forall t \in [2, \dots, T] \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^{i+L_\alpha} x_\alpha^t \geq W_\alpha \times L_\alpha, \forall i \in [0, 24-L_i] \text{ 且 } x_\alpha^{i-1} = 0 \quad (10)$$

1.3 用户满意度模型

本系统实际地结合用户需求, 用户可以指定其对每个电器的期望运行时间区间, 否则系统将做默认设置. 系统假定电器如果没有在用户要求的时间段[a,b]之间工作时, 则该电器的调度结果的满意度得分为 0. 同时通常来说用户希望工作任务能够在指定的时间区间内更快地完成, 所以当电器在 a 时刻开始工作, 在 a + N 时刻完成时满意度最高(为 1), N 表示每个电器的时长需求, 然后满意度随完成时间的推移而递减直至 0. 所以用户满意度是一个关于任务完成时间 t 的分段函数^[8], 记为 S(t)其定义如下:

$$S(t) = \begin{cases} \frac{t-b}{a+t-b} \times 100\%, & a+N \leq t \leq b \\ 0, & t < a+N \text{ 或 } t > b \end{cases} \quad (11)$$

由于用户对不同电器的重视程度有差异, 所以用户对各电器在某时间段工作的满意度也不相同, 本系统使用 θ_α 表示用户对不同电器的满意度的影响权值, θ_α 取值为[0,1]之间的数值. 因此可以计算得到某调度序列的带影响因子的加权满意度得分, 系统用该得分来评价某个调度序列的用户满意度. $S_{avg}(\chi)$ 可表示为:

$$S_{avg}(\chi) = \sum_{\alpha \in A} \theta_\alpha * S_\alpha \quad (12)$$

1.4 不确定性模型

通常来说, 用户只能预估家用电器的使用时长, 而不能准确预知实际使用时长, 这就是电器在使用过程中的不确定性, 即电器使用时长和能耗的不确定性. 在本系统中, 假设这种不确定性时长是服从高斯分布的. 因此, 每个电器的实际使用时长和实际能耗也是服从高斯分布的.

我们用 μ 代表中值, 即用户预期的电器正常能耗, σ 代表标准差, x 表示实际时长. 则电器的实际能耗可以表示为:

$$f(x : \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (13)$$

根据高斯分布, 99.7%的面积在平均值左右三个标准差 3σ 的范围内. 因此, 每个电器的时长参数范围为 $[\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$.

为了解决电器使用过程中的不确定性, 提出了一种随机调度模型^[9-11], 该模型如下:

随机调度模型

输入: 用户模型、价格模型和用于满意度指标 ρ_t
输出: 最终的用户满意度 ρ 、能耗变量 x、最优的电器调度序列

1.对 x 进行初始化, $\chi \in [\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma]$

Repeat:

2.根据 x 值和高斯分布模型更新每个电器的能耗 E_a^t

3.利用线性规划模型求解得到一个调度序列

4.利用蒙特卡罗模拟法来计算该调度序列的用户满意度 ρ

Until:

5.如果 $\rho \geq \rho_t$, 循环终止, 否则继续循环

正如上面算法所示, 给定一系列电器使用任务集和用户满意度, 构造用户模型和价格模型, 我们为算法选择初始 x 值, 根据高斯分布模型计算每个电器的能耗. 然后可以根据线性规划模型, 解线性规划来求得一个调度序列. 最后可以利用蒙特卡罗模拟法来计算调度序列的用户满意度. 如果用户满意度 ρ 满足循环停止条件, 则算法结束, 否则就要调整 x 值, 重复步骤 2-4, 直到满足循环条件, 即 $\rho \geq \rho_t$, 得到最终的调度序列、电费支出和用户满意度.

对于不确定性因子 x 值的更新方法, 可以采用多种方式, 本系统采用当 $\chi = \chi_0 + \sigma / 8$ 的方法.

2 实验分析

2.1 用户模型的实现

用户通过系统的人机交互界面, 向系统提交用户需求, 其中应该包括各种调度信息, 比如电器数目、功率、时长等信息, 然后本系统根据这些信息求解最优调度序列.

表 1 中给出了一个典型的用户需求^[12]. 预期工作时间属性后括号中的数据表示时间波动范围, 电器使用的不确定性时长.

表 1 用户需求

家电	功率 (W)	工作时间 (h)	预期工作时间 (h)	最低连续工作时长(h)
电器 1	500	0-6	3(1)	1
电器 2	150	6-14	2(1)	2
电器 3	1000	12-20	3(1)	1
.....
电器 20	1000	17-21	2(2)	2

表 2 中给出了各个时间片(1 小时为一个时间片)的实时电价信息.

表 2 实时电价

时间段	0-6	6-12	12-18	18-24
电价/元	0.44	0.93	0.8	0.93

向电网出售剩余电力的价格都为 0.42/kWh, PV 系统的发电功率随日间时间的变化而变化, 以汉能 A-15PV 系统为例, 以北京地区为例, 一年总发电量为 2279kWh, 平均每天发电量为 6.2kWh, PV 系统每天的工作时间为 9-17 点, 具体工作功率如下表:

表 3 PV 系统功率

时间段	0-8	8-9	9-10	10-11
PV 功率	0	0.2	0.3	0.7
时间段	11-12	12-13	13-14	14-15
PV 功率	1.0	2.0	1.0	0.5
时间段	15-16	16-17	17-24	
PV 功率	0.3	0.2	0	

一套完整的汉能 A-15PV 发电系统的价格是 24666, 25 年发电量为 51273kWh, 归一化价格 0.48 元/kWh.

以某品牌一款完全充放电 845kWh 蓄电池为例, 其价格是 540 元, 归一化价格是 0.61 元/kWh.

2.2 测试结果与分析

本方案用 C++语言实现, 运行在 Windows 操作系统上, 根据上文中的用户需求, 调用 lp_solver.exe 线性规划求解器, 可在适当时间内求得最优调度序列.

2.2.1 调度结果与电价关系图

从实验结果中, 分析出详细的电器调度序列, 计算出调度序列将任务分配到各个时间段的具体情况, 找出各个时段的具体能耗情况, 绘制成分布图. 在将按照传统电器使用方式的能耗分布情况绘制出, 同时, 附上时间电价进行对比, 如图 1.

图 1 清晰地展现了实时电价和调度结果能耗分布的关系, 从图中可以明显地看到, 一般家庭中会有三

个早中晚三个用电高峰, 而此时一般电网价格较贵, 而且早晚的 PV 光伏系统功率较低, 如果不做调度优化, 支出费用较高, 同时也有可能超出电网负载. 但经过调度优化后, 综合考虑电网、蓄电池和 PV 光伏系统之间的能量流动, 得到最优方案. 当某个时段电价低时, 算法会尽量将任务分配到该时段, 当某个时段电价高时, 算法会自动降低在该时段上的任务分配, 同时保证不可中断电器的运行. 通过这样的调度算法, 不但可以降低用户的电费支出, 同时对平衡电网负载也具有重要的意义.

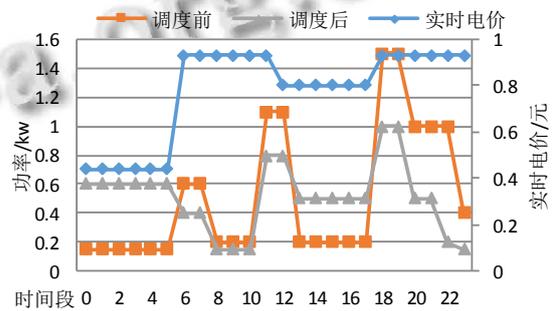


图 1 能耗分布与实时电价关系图

2.2.2 调度结果费用分析

传统方法的电器使用方法是, 按照用户的使用习惯, 当需要使用某种电器时, 用户就打开该电器, 当使用结束时, 用户就关闭该电器, 不进行错峰消费; 不考虑不确定性时, 即按照用户的预期需求进行调度, 经过线性规划规模分析后, 可以得到最优调度序列; 当考虑不确定性时, 运用不确定性规划模型进行模拟, 多轮计算后得到考虑用户满意度的最优调度序列;

用户的家用电器数量可能不一致, 这里系统将用户住宅分为大居室、中等、小居室三种情况, 得出的调度结果如下表:

表 4 不考虑不确定性的调度方案效果

住宅 户型	传统方法		不考虑不确定性的调度方案		
	电费/元	满意度	电费/元	降低比率/%	满意度
小居室	34.24	1	25.40	25.8	0.7
中等	49.36	1	33.07	33.0	0.6
大居室	61.31	1	40.61	33.7	0.63

表 5 考虑不确定性的调度方案效果

住宅 户型	传统方法		考虑不确定性的调度方案		
	电费/元	满意度	电费/元	降低比率/%	满意度
小居室	34.24	1	28.50	16.7	0.87

中等	49.36	1	39.37	20.2	0.7
大居室	61.31	1	49.32	19.6	0.84

由上表可以看出, 当在传统的电器使用习惯的情况下, 总体费用支出很大, 但用户的满意度为满分; 当在不考虑不确定性的情况下, 使用确定性线性规划模型得到最优调度序列, 本系统至少能够降低 25.8% 的费用支出, 但用户满意度降低到 0.6; 当考虑不确定性时, 使用不确定性线性规划模型得到最优调度序列, 本系统至少能够降低 16.7% 的费用支出, 同时用户满意度也提升 0.7.

3 总结

在本文中, 一种考虑电器使用不确定性的基于实时电价家用电器调度方案被实现, 该方案采用线性规划的建模方法, 以最小费用支出为优化目标, 兼顾了 PV 光伏系统、家用蓄电池以及向电网出售剩余电力情况下的能量流动, 最后用随机规划的方法来解决电器使用过程中的不确定性, 保证了用户满意度.

本方案的主要思路如下, 当不考虑到每个电器的使用时长的不确定性因素时, 本方法使用普通的线性规划方法来高效地计算最优的电器调度序列, 以最小费用支出为优化目标, 以用户需求、电网限制、PV 系统等信息作为约束条件, 最终求解得到最优调度序列, 这种方法可以被称为确定性线性规划法; 当考虑到家用电器在使用过程中的使用时间长短和能量消耗多少的不确定性时, 一种随机规划方法被采用, 它模拟每个电器的使用时长和能耗是一个服从于高斯分布的, 利用一个自变量 x 来代表每个电器的不确定性能耗, 同时结合蒙特卡罗模拟法和随机规划相关知识, 以用户满意度得分来约束迭代, 最终来求解最优调度序列.

通过对实验数据的分析, 结果表明:

1) 在不考虑不确定性的情况下, 使用确定性线性规划方法求解最优调度序列, 本系统比传统方法能降低费用至少 25.8%, 用户满意度最低 0.6.

2) 在考虑不确定性的情况下, 使用随机规划模型求解最优调度序列, 本系统比传统方法能降低费用至少 16.7%, 用户满意度提升到 0.7.

由此可见, 本文提出的考虑不确定性的基于实时

电价的调度方案, 成功地完成了用户指定的优化需求, 完美地兼顾了不可中断电器、可再生能源发电、向电网出售剩余电力和电器使用不确定性的情况, 通过引入电器权值因子和用户满意度, 使得该方案更加人性化. 总体来说, 该方案对降低用户电费支出和平衡电网负载有明显效果, 具有重要的实际意义.

参考文献

- 1 康重庆, 陈启鑫, 夏清. 低碳电力技术的研究展望. 电网技术, 2009, 33(2): 1-7.
- 2 宋卓然, 陈国龙, 赫鑫, 等. 光伏发电的发展及其对电网规划的影响研究. 电网与清洁能源, 2013, 29(7): 92-96.
- 3 Kim TT, Poor HV. Scheduling power consumption with price uncertainty. Smart Grid IEEE Trans. on, 2011, 2(3): 519-527.
- 4 Mohsenian-Rad AH, Leon-Garcia A. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments. IEEE Trans. on Smart Grid, 2010, 1(2): 120-133.
- 5 Lee J, Park GL, Kang MJ, et al. Design of a power scheduler based on the heuristic for preemptive appliances. Proc. of the Third International Conference on Intelligent Information and Database Systems - Volume Part I. Springer-Verlag. 2011. 396-405.
- 6 Farzan F, Jafari M, Masiello R, et al. Toward optimal day-ahead scheduling and operation control of microgrids under uncertainty. IEEE Trans. on Smart Grid, 2014, PP(99): 499-507.
- 7 Chen X, Wei T, Hu S. Uncertainty-aware household appliance scheduling considering dynamic electricity pricing in smart home. IEEE Trans. on Smart Grid, 2013, 4(2): 932-941.
- 8 刘经浩, 贺蓉, 李仁发, 等. 一种基于实时电价的 HEMS 家电最优调度方法. 计算机应用研究, 2015, 32(1): 132-137.
- 9 Wu L, Shahidehpour M, Fu Y. Security-constrained generation and transmission outage scheduling with uncertainties. IEEE Trans. on Power Systems, 2010, 25(3): 1674-1685.
- 10 吴义纯, 丁明. 基于蒙特卡罗仿真的风力发电系统可靠性评价. 电力自动化设备, 2005, 24(12): 70-73.
- 11 温丽丽, 刘俊勇. 混合系统中长期节能调度发电计划的蒙特卡罗模拟. 电力系统保护与控制, 2009, 36(24): 24-29.
- 12 Erol-Kantarci M, Moutfah HT. Wireless sensor networks for cost-efficient residential energy management in the smart grid. IEEE Trans. on Smart Grid, 2011, 2(2): 314-325.