

需求侧响应条件下的家庭用电管理研究

吴 桥¹，卢树峰¹，杨世海¹，陈 坚²，李志新¹

(1.国网江苏省电力公司电力科学研究院，江苏 南京，211103；
2.中国计量大学，浙江 杭州，310018)

摘 要：需求侧响应对电网公司和电力用户都是互利的。本文首先介绍了需求侧响应的相关概念，然后研究了需求侧响应条件下家庭用电管理的系统结构和用电策略，根据实时电价，分时电价，考虑温度控制和综合能源对现有的用电策略进行分类，总结了这些研究策略的不足和优点，最后对未来家庭用电管理的发展方向提出了一些意见。

关键词：需求侧响应；家庭用电管理；系统结构；用电策略

0 引言

在电力市场竞争中引入需求响应，通过价格信号和经济激励机制来引导用户参与电力市场，从而加强需求侧在市场里供需平衡的作用，近些年来已经成为电力市场研究和实践的重要内容^[1]。

家庭用电管理，作为需求响应机制下研究的重要方向，对电网公司削峰填谷有很大的帮助，还能降低电网公司的调峰成本，同时又能减轻用户的用电成本，对电网公司和家庭电力用户都是一个双赢的措施。

1 需求侧响应

需求侧响应，是指当电力批发市场价格升高或系统可靠性受威胁时，电力用户接收到供电方发出的诱导性减少负荷的直接补偿通知或者电力价格上升信号后，改变其固有的习惯用电模式，达到减少或者推移某时段的用电负荷而响应电力供应，从而保障电网稳定，并抑制电价上升的短期行为^[2]。

需求侧响应按照刺激类别不同可以分为价格型需求响应和激励性需求响应两类。

1.1 价格型需求响应

价格型需求响应是指电力用户根据电价的变化对自身的用电行为进行相应的调整，以达到降低用电成本的目的。目前国内外正在实施的电价类型可以分为尖峰电价，分时电价和实时电

价。

分时电价即电力需求高峰期间提高电价，在电力供应有多余的时段降低电价，电力用户可以根据这两个时间段的电价的不同，合理的安排电器的用电时间，达到削峰填谷和降低用电成本的效果，它的定义如表 1 所示。

表 1 分时电价定义

时段	时段区间	电价/(元/kWh)
峰时段	10:00~15:00,	0.9
	18:00~22:00	
平时段	7:00~10:00,	0.5
	15:00~18:00,	
	22:00~24:00	
谷时段	0:00~7:00	0.3

实时电价是一种动态定价机制，其更新周期可以达到 1 小时或者更短，通过将用户侧的价格与电能供给市场的出清电价联动，可以精确反映每天各时段供电成本的变化并有效传达电价信号^[3]。虽然我国目前还未达到实施实时电价的技术性和政策型的要求，但是实时电价对电力系统所带来的利好是显而易见的，因此离实时电价的到来日期会越来越远。图 1 为澳大利亚QLD地区 2015 年 12 月 1 日到 12 月 4 日的实时电价曲线图。

尖峰电价也属于分时电价的范畴，但又在分时电价的基础上引入了实时电价，因此相比于分时电价，有了更好的削峰填谷效果，对用户的改变用电行为的激励和引导作用更强。

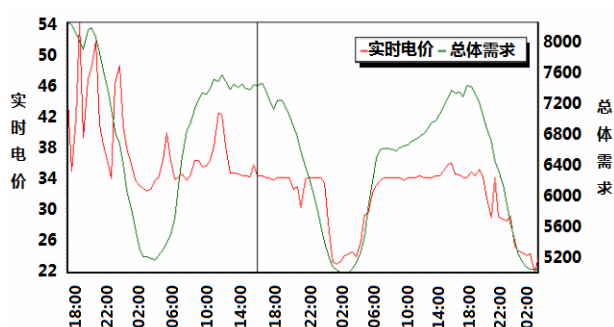


图1 实时电价曲线图

1.2 激励型需求响应

激励型需求响应是直接采用奖励方式来激励和引导用户参与各种系统所需的负荷削减项目^[4]。目前国际上比较常用的激励型需求响应项目可以分为：直接负荷控制项目、可中断负荷项目、容量/辅助服务市场计划、紧急需求响应和需求侧竞价。

国外的激励机制按照对象可以分为对电力公司的激励机制和对电力用户的激励机制^[5]，如图2所示。由于需求侧响应在国内还处于起步阶段，因此国内还未形成成熟的激励机制。

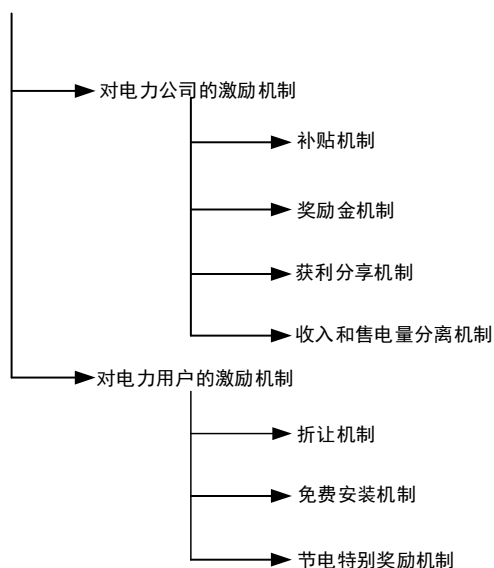


图2 激励机制分类图

2 需求侧响应条件下的家庭用电管理

2.1 家庭用电管理系统结构

家庭用电管理系统包括温控设备非温控设备，新能源设备如小型户用风机，小型屋顶光伏，新能源电动汽车，蓄电池，智能插座，智能交互终端，无线通信设备等。图3为常见的家庭用

电管理系统结构图，k1~k6为智能逻辑控制开关，k7为功率控制开关。系统通过检测信息流的信号来控制电气流中的设备。

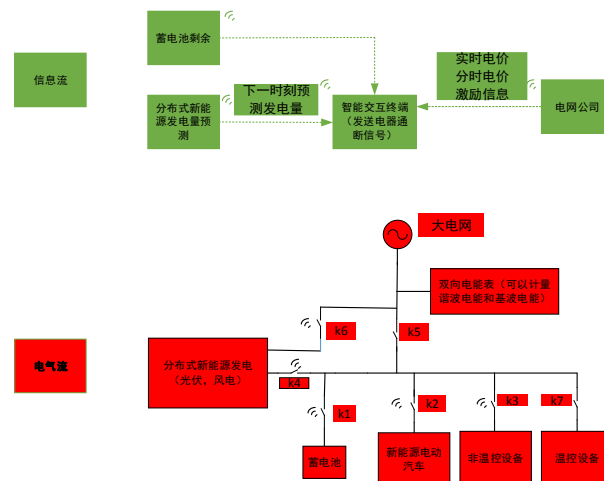


图3 系统结构图

2.2 基于分时电价的家庭用电管理

目前大部分研究都是鼓励电力用户的家用电器从高峰期转移到较便宜的中等峰期或非高峰期，从而降低电网整体高峰负荷，并同时达到降低温室气体排放量的目标^[6-8]。另外也有研究对负荷种类进行分类，或者对负荷特性进行研究，建立了负荷的数学模型，建立了分时电价环境下的家居设备优化运行决策模型，达到省电的目的^[9-11]。上述方法在一定程度上降低了家庭用电成本，但是由于分时电价的价格分类较少，延长电器的用电时间会较长，不可避免的会降低用户用电舒适度。因此文献[12]基于分时电价来监督和控制家用电器，同时考虑多个居民共享一个家庭和它的电器，这种算法还能根据多个居民的对电器的偏好程度来安排和管理电器的使用，一定程度上提高了用户用电的舒适度。

2.3 基于实时电价的家庭用电管理

目前大部分研究基于实时电价的家庭用电管理，都集中于通过使用各种算法如粒子群算法，遗传算法，线性优化技术等复杂的调度程序来实现系统从而达到降低电费的目标^[13-15]。在其它的研究中，提出了使用蒙特卡洛模拟^[16]和马尔科夫决策过程^[17]来随机优化最小化用电成本的方法。文献[18]在基于实时电价的基础上提出一种算法来减少用电成本，提出的算法工作在三个阶段：实时监控阶段，随机调度阶段和实时控制

阶段。所提算法会考虑实时电价和各种电器能量消耗模式的不确定性，在实时监控阶段根据电器的特性来归类从而减轻控制过程的复杂，并减少控制命令的产生。

但这些方法未考虑分布式新能源在住宅领域的普及。但是分布式发电供电量由于环境因素无法时刻满足家用电器的供电量，因此文献[19]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。

2.4 考虑温度控制的家用用电管理

考虑温度控制的家用用电管理一般根据用户对室内温度和热水温度的需求，结合当前电网电价，实时控制温控设备的功率输入，达到节省电费和提高用户用电舒适度目标^[20]。也有通过改变当前温度设定点来降低用电成本的研究^[21-22]。上述方法实质上都是通过改变温控设备的输入功率来降低用电成本。

2.5 考虑综合能源的家庭用电管理

天然气和电力已经成为满足民居的能源需求的两个主要能源载体。同时为了探讨智能家居中可选择的能源载体的转换，存储，调节，可能的管理，住宅能源中心这个概念在文献^[23]里提到。文献[24]给出了如图 4 所示的住宅能源中心架构。电网(E)，分布式新能源发电(RDER)，热电联产机组单元(CHP)的输出能源能对电力需求进行供电。同时考虑到V2G，新能源电动汽车(PHEV)可以用自己存储的能量对家庭电器进行供电。电网(E)和能源中心的双向功率流表示没有被使用或存储的能源可以卖给网。输入能源中心的天然气(G)将会分为两部分，一部分输送到热电联产机组单元(CHP)，另一部分输送到消耗天然气的设备。

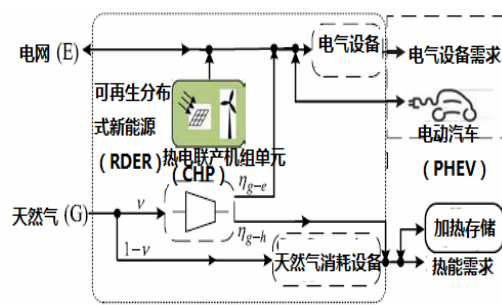


图 4 住宅能源中心架构图

3 家庭用电管理的未来方向探讨

本文认为家庭用电管理在未来还可以从以下几个方面考虑。

3.1 对家庭用户进行分类

目前不管是城市还是农村，家庭人员的组成都是多样的。不同的人有不同的用电习惯，同时不同的家庭又有不同的人员构成。表 2 为家庭用户种类。其实表 2 所列出的家庭用户种类肯定不是全面的，在这里只是想指出日后的家庭用电管理要利用大数据分析的手段对用户进行分类，并对不同户型的用户的用电习惯进行总结，然后根据这些总结来合理安排用户用电。

表 2 家庭用户种类

人数	成员
1	有工作的单身青年男或女
1	退休的孤寡老人
2	刚结婚的夫妻
2	退休的老两口
2	单亲家庭
3	一老人两夫妻
3	两夫妻一孩子
4	一老人两夫妻一孩子
4	两夫妻两孩子

3.2 加入用户用电电能质量要求

电能质量对电力系统是十分重要的，由于目前的家庭电器种类繁多，传统电器例如电视机，空调，冰箱，洗衣机，电脑等都会产生谐波污染，同时分布式新能源的加入也会带来谐波污染。虽然这些电器所产生的谐波不多，但是这些电器在整个社会的数量是巨大的。因此家庭用电管理还应考虑家用电器的在每个时间段的谐波含量不要超标。

3.3 激励型需求响应的拓展

电力用户在某一时间段响应电力公司停止正在运行的电器所得到的电力公司的补偿机制还有待研究。同时一个小区每户人家在响应电力公司断电的时正在工作的家用电器的数量和家用电器的类型也是不同的，如何在同时兼顾电力公司的奖励成本，原本的调峰成本以及用户电器断电舒适度也是一个值得研究的方向。

3.4 家庭用电管理系统实例

家庭用电管理系统可以根据图 5 所示的应用实例进行构建，通过运营商来设定实时电价，配网资源根据电价做出平衡资源的响应，智能控制

器根据经济激励，大数据分析得到的用户数据，以及由智能量测装置得到的电能质量信息做出合理的用电安排。图 5 中的 DER 设备包括（电动汽车、热泵、小型热电联产、户用分布式电源）。

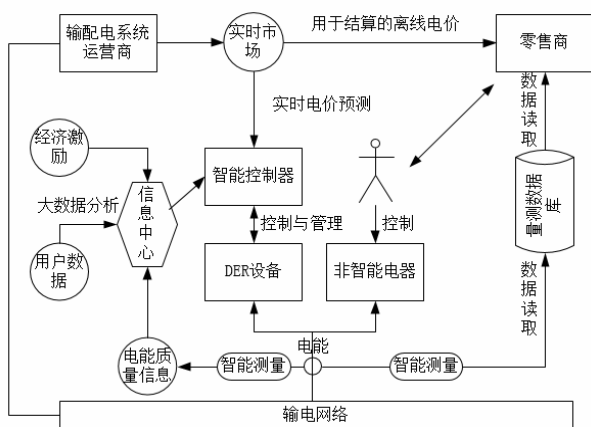


图 5 家庭用电管理应用实例

4 结论

尖峰电价机制是一种行之有效的需求侧响应手段，而合理的激励机制仍需要进一步探索；从分时电价、实时电价、温度控制、综合能源的角度出发，可以勾画出住宅能源中心等国内可以借鉴的家庭能源管理架构；未来家庭用电管理可以向对家庭用户进行分类、加入用户电能质量要求以及激励型需求响应的拓展三个方面发展；而家庭用电管理系统应用实例可以在电力市场条件下充分利用价格、激励、通信和先进控制手段，实现资源的高效利用。

参考文献：

- [1] 刘继东. 电力需求侧响应的效益评估与特性分析[D]. 山东大学, 2013.
- [2] 陈俊生. 面向智能用电的需求响应技术及家庭用户用电策略研究[D]. 重庆大学, 2014.
- [3] 丁军威. 电力市场中微观经济理论的研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [4] 裴丽君. 美国和日本需求响应运作模式和激励机制[J]. 电力需求侧管理, 2013(2):57-60.
- [5] Erol-Kantarci M, Mouftah H T. TOU-aware energy management and wireless sensor networks for reducing peak load in smart grids[C]//Vehicular Technology Conference Fall (VTC 2010-Fall), 2010 IEEE 72nd. IEEE, 2010: 1-5.
- [6] Han P, Wang J, Han Y, et al. Novel WSN-based residential energy management scheme in smart grid[C]// International Conference on Information Science and Technology. IEEE, 2012:393-396.
- [7] Erol-Kantarci M, Mouftah H T. Wireless Sensor Networks for Cost-Efficient Residential Energy Management in the Smart Grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2):314-325.
- [8] Xiong G, Chen C, Kishore S, et al. Smart (in-home) power scheduling for demand response on the smart grid[C]// Innovative Smart Grid Technologies. 2011:1-7.
- [9] Lee J W, Lee D H. Residential electricity load scheduling for multi-class appliances with Time-of-Use pricing[C]// GLOBECOM Workshops (GC Wkshps), 2011 IEEE. IEEE, 2011:1194-1198.
- [10] 周磊, 李扬. 分时电价环境下基于家居能量管理系统的家居负荷建模与优化运行[J]. 电网技术, 2015, 39(2):367-374.
- [11] Abushnaf J, Rassau A, Górniewicz W. Impact on electricity use of introducing time-of-use pricing to a multi-user home energy management system[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2015, 26(5):993-1005.
- [12] Pedrasa M A A, Spooner T D, Macgill I F. Coordinated Scheduling of Residential Distributed Energy Resources to Optimize Smart Home Energy Services[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2):134-143.
- [13] Zhao Z, Lee W C, Shin Y, et al. An Optimal Power Scheduling Method for Demand Response in Home Energy Management System[J]. Etri Journal, 2013, 4(3):1391 - 1400.
- [14] Pipattanasomporn M, Kuzlu M, Rahman S. An Algorithm for Intelligent Home Energy Management and Demand Response Analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4):2166-2173.
- [15] Mohsenian-Rad A H, Leon-Garcia A. Optimal Residential Load Control With Price Prediction in

- Real-Time Electricity Pricing Environments[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2):120-133.
- [16] Kim T T, Poor H V. Scheduling Power Consumption With Price Uncertainty[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(3):519-527.
- [17] Chang T H, Alizadeh M, Scaglione A. Real-Time Power Balancing via Decentralized Coordinated Home Energy Scheduling[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(3):1490-1504.
- [18] Vivekananthan C, Mishra Y, Li F. Real-Time Price Based Home Energy Management Scheduler[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4):2149-215
- [19] 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.
- [20] 唐二雷. 基于智能用电系统的家庭用电策略研究[D]. 华北电力大学, 2014.
- [21] Saha A, Kuzlu M, Pipattanasomporn M. Demonstration of a home energy management system with smart thermostat control[C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference. IEEE, 2013:1-8.
- [22] Ji H Y, Bladick R, Novoselac A. Demand response for residential buildings based on dynamic price of electricity ☆ [J]. Energy & Buildings, 2014, 80:531-541.
- [23] Bozchalui M C, Hashmi S A, Hassen H, et al. Optimal Operation of Residential Energy Hubs in Smart Grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4):1755-1766.
- [24] M. Rastegar, M. Fotuhi-Firuzabad, H. Zareipour, et al. A Probabilistic Energy Management Scheme for Renewable-Based Residential Energy Hubs[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016 (99): 1-11.
-
- 作者简介:**
- 吴 桥(1967-), 男, 江苏武进人, 本科, 高级工程师, 现就职于国网江苏省电力公司电力科学研究院, 从事电力计量试验研究工作;
- 卢树峰(1972-), 男, 山东高唐人, 硕士研究生, 研究员级高级工程师, 现就职于国网江苏省电力公司电力科学研究院, 从事计量管理工作;
- 杨世海(1976-), 男, 安徽淮北人, 博士, 高级工程师, 现就职于国网江苏省电力公司电力科学研究院, 从事计量管理工作;
- 陈 坚(1992-), 男, 浙江温州人, 硕士研究生, 现就读于中国计量大学, 研究方向为智能用电;
- 李志新(1986-), 男, 辽宁朝阳人, 博士, 工程师, 现就职于国网江苏省电力公司电力科学研究院, 从事配电系统与计量方向研究工作。