

居民用户智能用电建模及优化仿真分析

杨永标¹, 颜庆国², 王 冬¹, 杨 斌², 高 辉³

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106; 2. 国网江苏省电力公司, 江苏省南京市 210024;
3. 南京邮电大学自动化学院, 江苏省南京市 210023)

摘要: 随着居民用户智能家电普及率的不断提高, 实现智能用电优化已成为电力需求侧管理的重要内容。通过对居民用户智能家电的用电起始时间、用电时长、用电时段数的设计, 并结合智能家电的用电特征及电价机制, 给出了一种以用电费用最小为目标的智能用电优化方法。该方法同时考虑了用电起始时间、结束时间和允许的最大中断次数等约束条件。通过算例中电价机制及智能家电约束对用电安排影响的仿真分析, 验证了该方法可有效减少用电费用及降低居民用户用电负荷峰值; 同时探讨了在实时电价机制及更灵活的家电中断约束下, 智能用电优化效果更为显著。

关键词: 居民用户; 智能用电; 智能家电; 电价机制; 用电安排

0 引言

随着社会经济的发展和人们生活水平的提高, 居民用户大功率家电(如空调、电热水器等)在数量和容量上都在逐年增加, 成为形成电网高峰负荷乃至尖峰负荷的重要原因, 给电网安全运行带来了挑战。同时, 随着居民用户家电智能化程度的不断提高^[1], 通过先进的通信及控制技术, 使得居民用户与电网实时互动成为可能。通过对居民用户智能家电的合理安排和优化运行, 可以有效减少用电费用, 降低居民用户用电负荷峰值^[2], 有望成为电力需求侧管理的重要发展方向。

居民用户智能用电优化的主要目标是在保障居民用户的舒适性前提下, 降低居民用户的电力消费成本^[3]。这一目标的实现, 是以智能家电、智能电表、智能交互终端、智能插座、智能控制等硬件装置和用电消费任务管理等软件系统为基础的^[4]。目前, 针对居民用户的用电消费任务管理问题, 已有许多专家开展了相关研究。文献^[5]提出了一种居民用电优化管理系统的架构, 并给出了居民用电交互作用流程; 文献^[6]研究了居民用户绿色能源问题, 提出了基于居民用户用电负荷能效对比的绿色能源用电管理系统; 文献^[7]着眼于居民用户用电信息获取, 提高居民用户用电负荷的可操作性和居民用户需求响应 3 个方面, 提出了一种新的居民用户能源

用电管理系统, 这些工作从居民用户整体出发, 研究了居民用户用电负荷的管理方法。另外, 有些学者对用电负荷之间的协调优化也进行了研究。文献^[8]基于预先设定的用电负荷优先级别, 提出了协调用电负荷用电时间的居民用户能源管理算法; 文献^[9]考虑用电成本和用户用电舒适度, 研究了优化电动汽车和居民用户混成自动电压控制(HAVC)系统用电的问题; 文献^[10]以减少用电费用和尖峰用电量为目标, 提出了居民用户能源管理系统的框架和家电负荷用电时间优化方法。

实现居民用户用电智能优化是居民用户参与电力需求侧管理的重要前提。一个优秀的智能优化方案能够调整智能家电的运行时间段, 降低居民用户用电负荷及费用, 最终对降低电网的负荷峰值、平稳电网用电负荷波动作出贡献^[11]。为达到这一目的, 需要电力公司根据负荷预测结果和电网运行状况, 发布未来一段时间的电价给用户, 用户根据电价和自身的用电需求, 优化安排未来一段时间的用电行为。本文给出了居民用户用电行为和约束的数学描述, 在实时电价和分时电价的机制下, 提出了居民用户用电优化方法, 可以有效减少用电费用, 降低居民用户用电负荷峰值。

1 居民用户智能用电模型

1.1 智能家电用电特性

一般来讲, 除了必需的生活用电需求, 居民用户希望在电价低时段使用家电。对于必需的生活用电

需求,例如用户想下午下班到家后能有热水洗澡,那热水器必须在用户到家之前把水加热到设定的温度值;对于非生活必需的用电需求,例如夜间电价较低时段,人们可能会安排电动汽车充电。从这一点考虑,对于居民用户智能家电的用电特性,用户需要设定每个智能家电的持续用电时长、希望的用电时段以及单位小时智能家电的耗电量。

另外,对于一些智能家电的用电特性,需要考虑在用电过程中可以根据实际需求临时中断用电任务。例如:正在充电的电动汽车在电价较高时停止充电,待电价降到可接受的程度后继续充电,这类智能家电称为可中断负荷。同时,也存在一些智能家电在用电任务一旦开始后就不能中断或者是用户不想其中断,例如已经开始进入煮饭模式的电饭锅,无论电价如何变化都不能中断其煮饭行为,这类智能家电称为不可中断负荷。

1.2 智能用电特性建模

假设每小时分成 n 个时间段,即每个时间段为 $60/n$ min,一天分为 $24n$ 个时间段。例如:把每小时分成 6 个时间段,则每个时间段为 10 min,每天分为 144 个时间段,即时间段 $s=1,2,\dots,144$ 。理论上 n 越大,则每个时间段越短,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来决定,如 $60/n$ 的选取要能描述智能家电的运行模式。例如:空调是间歇性用电负荷,以“运作—中断”为一周期,因此选取的 $60/n$ 应能描述这一“运作—中断”周期过程,即“运作—中断”周期的时长应为 $60/n$ 的整数倍。另外,有些智能家电的运行时间是固定的,不一定是 $60/n$ 的整数倍,因此实际操作时,可选用最接近的整数倍值。例如:定时限的洗衣机一次工作时长为 38 min,当选取每个时间段为 10 min 时,则算法中洗衣机的总运行时长应设为 4×10 min。

智能家电集合用 A 表示,对于任一属于 A 的智能家电 a ,其一日内的用电情况可用向量 $\mathbf{D}_a$ 来表示:

$$\mathbf{D}_a = [d_{a,1} \quad d_{a,2} \quad \dots \quad d_{a,24n}] \quad (1)$$

式中: $d_{a,s}$ 为智能家电 a 在第 s 个时间段的用电量, $s=1,2,\dots,24n$ 。

为简单起见,本文假设智能家电每小时的耗电量是固定的,用 C_a 表示。那么对于智能家电 a ,若其在第 s 个时间段工作,则有

$$d_{a,s} = \frac{C_a}{n} \quad (2)$$

若其在第 s 个时间段不工作,则有

$$d_{a,s} = 0 \quad (3)$$

对智能家电用电进行优化,就是在考虑整个居民用户用电需求的情况下,优化智能家电 a 在所有时间段的耗电量 D_a 。对于居民用户,其总用电量需求为:

$$\mathbf{D} = [D_1 \quad D_2 \quad \dots \quad D_{24n}] \quad (4)$$

式中: $D_s = \sum_{a \in A} d_{a,s}$, $s=1,2,\dots,24n$ 。

2 居民用户智能用电优化方法

居民用户智能用电优化的目的就是在保证完成用户要求的任务前提下,通过合理安排智能家电在可接受的时间范围内运行,使得居民用户的整体用电费用最小。其目标函数为:

$$F_{\text{COST}} = \min \sum_{s=1}^{24n} (p_s(D_s) D_s) \quad (5)$$

式中: p_s 和 D_s 为时间段 s 的电价和电量。

电价机制可采用目前较为常用的分时电价或实时定价^[12-13]。实际情况下智能家电的运行是由人的意愿来决定的,其用电时间有一定范围限制,即其运行起始时间和结束时间是有限制的。本文用 λ_{start} 和 λ_{end} 分别表示智能家电允许的最早起始和最晚结束运行时间段, t_{start} 和 t_{end} 分别表示智能家电的实际起始运行时间段和实际结束运行时间段, N 表示智能家电完成某一任务所需的总运行时间段数量。

对智能家电 a ,其运行约束包含等式约束和不等式约束。

等式约束:

$$t_{\text{end}} - t_{\text{start}} + 1 = N \quad (6)$$

不等式约束:

$$\lambda_{\text{start}} \leq t_{\text{start}} \quad (7)$$

$$\lambda_{\text{end}} \geq t_{\text{end}} \quad (8)$$

$$t_{\text{end}} \geq t_{\text{start}} \quad (9)$$

如图 1 所示, $\lambda_{a_1, \text{start}}$ 和 $\lambda_{a_1, \text{end}}$ 分别为智能家电 a_1 所允许的最早起始运行时间段和最晚结束运行时间段,而实际上智能家电 a_1 是从 $t_{a_1, \text{start}}$ 开始运行的,在经过 $N_{a_1} = t_{a_1, \text{end}} - t_{a_1, \text{start}} + 1$ 个时间段完成任务后于 $t_{a_1, \text{end}}$ 结束运行。

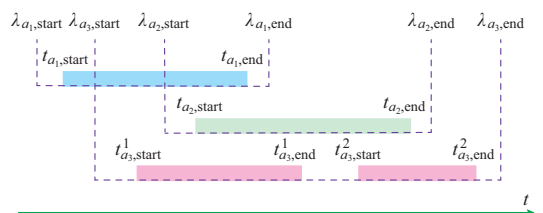


图 1 智能家电用电特性
Fig.1 Power characteristics of smart appliances

从图 1 中可以看出,智能家电 a_1 完成任务的过程中,没有任何中断发生,但有些智能家电运行过程允许中断。例如:电动汽车充电在电价突然升高时可以中断工作,等电价降到合理的范围后再重新投入工作。如图 1 中智能家电 a_3 从时间段 $t_{a_1, \text{start}}^1$ 投入工作,经过 $N_{a_3}^1 = t_{a_3, \text{end}}^1 - t_{a_3, \text{start}}^1 + 1$ 个时间段后在未完成的情况下于时间段 $t_{a_3, \text{end}}^1$ 中断工作。而后在 $t_{a_3, \text{start}}^2$ 重新投入工作,经过 $N_{a_3}^2 = t_{a_3, \text{end}}^2 - t_{a_3, \text{start}}^2 + 1$ 个时间段后于时间段 $t_{a_3, \text{end}}^2$ 完成任务而结束运行。

当然,智能家电工作过程频繁的中断和重启也是不允许的,一般对中断的次数有一定的限制。本文用 T_D 表示最大允许的中断次数, T_d 表示实际的中断次数,则考虑智能家电中断时的约束条件如下所示。

等式约束:

$$\sum_{i=1}^{T_d+1} t_{\text{end}}^i \sum_{i=1}^{T_d+1} t_{\text{start}}^i + T_d + 1 = N \tag{10}$$

不等式约束:

$$T_d \leq T_D \tag{11}$$

$$\lambda_{\text{start}} \leq t_{\text{start}}^1 \tag{12}$$

$$\lambda_{\text{end}} \geq t_{\text{end}}^{T_d+1} \tag{13}$$

$$t_{\text{end}}^i \geq t_{\text{start}}^i \quad i = 1, 2, \dots, T_d + 1 \tag{14}$$

$$t_{\text{start}}^{i+1} > t_{\text{end}}^i \quad i = 1, 2, \dots, T_d + 1 \tag{15}$$

式(12)和式(13)给出了智能家电的用电时间限制范围,即用户可接受的用电任务最早起始和最晚结束时间。对于可中断用电负荷,允许其在用电时间限制范围内多次启停。该模型中考虑了用电负荷的中断次数,但是完成一项任务时,用电中断相同的次数所实际经过的时间可能不同。

3 算例分析

本算例利用某居民用户的用电安排优化来验证所提出的方法。一日分为 144 个时间段,表示为 $s=1, 2, \dots, 144$ 。智能家电的用电数据,如最早起始时间段、最晚结束时间段、最大允许中断次数等如表 1 所示。

表 1 中,电动汽车 1(EV1)充电时间范围为 00:00—08:00 和 19:00—24:00,电动汽车 2(EV2)充电时间范围 00:00—13:00 和 17:00—24:00;电冰箱虽然运行时长为全天,无需优化用电时间,但其用电量会累加到每个时间段上,是用户实际支付电费的一部分;将家电分为连续用电、可中断用电两类,如洗衣机属于可中断用电类,而电水壶、电视机、吹风机、电脑等则属于连续用电类。在实际中,连续

用电、可中断用电家电的划分以及可中断用电家电的最大允许中断次数可由用户自行决定。

表 1 智能用电数据
Table 1 Smart appliances power data

序号	名称	最早起始 时间段	最晚结束 时间段	运行时 间段数	总用电量/ (kW · h)	最大允许 中断次数
1	洗衣机	1	42	6	0.35	1
2	热水器 1	1	36	3	1.00	1
3	热水器 2	37	48	3	1.00	1
4	电水壶 1	1	36	3	0.40	0
5	电饭煲 1	55	72	3	0.30	0
6	热水器 3	73	108	3	1.00	1
7	电水壶 2	91	108	3	0.40	0
8	电饭煲 2	91	102	3	0.30	0
9	电水壶 3	120	132	3	0.40	0
10	电熨斗	114	132	6	1.60	1
11	电视机	97	132	12	0.30	0
12	电脑	109	132	12	0.30	0
13	吹风机	121	132	3	0.40	0
14	EV1	1,109	42,144	36	12.00	2
15	EV2	1,97	72,144	36	12.00	2
16	电冰箱	1	144	144	1.50	0

优化用电任务,实质是要合理安排用电任务的时间,即决定用电任务的中断次数和起始时间段。本文采用遗传算法来求解用电任务优化问题^[14]。应用遗传算法求解时,遗传编码代表的就是所有用电任务的中断次数和用电起始时间段,其由二进制数值串构成。对允许中断次数为 T_D 的用电任务,最多包含 $T_D + 1$ 个起始时间段。优化问题中用电任务的各种约束,在遗传算法实现中可以处理成惩罚函数的形式。本算例中,遗传算法中种群数量设为 200,最大允许迭代次数设为 500,交叉操作概率为 0.95,变异操作概率为 0.25。

3.1 电价机制对用电安排优化影响分析

图 2 所示为该家庭在不同电价机制下采用智能用电优化方法得到的各时段负荷分布,包括随机用电(见图 2(a))、实时电价机制下用电优化安排(见图 2(b)),以及分时电价机制下用电优化安排(见图 2(c))。图 3 所示为不同用电安排方案的用电费用比较。分时电价具体时间段分布和对应电价见附录 A 表 A1,实时电价曲线见附录 A 图 A1。

比较图 2 和图 3 可知,在实时电价和分时电价作用下,居民用户通过调整智能家电的用电起始及用电结束时间限制,增加家电的用电时间段范围,对用电任务进行优化安排,可降低总用电费用。而且可以看到,实时电价下居民用户的用电费用更低。

同时,由图 2(a),(b),(c)可见,在实时电价和分时电价下,居民用户峰值负荷明显小于随机用电

情况下的峰值负荷,但由于优化目标是用电费用最低,因此,实时电价下的峰值负荷转移效果不如分时电价下的峰值负荷转移效果。

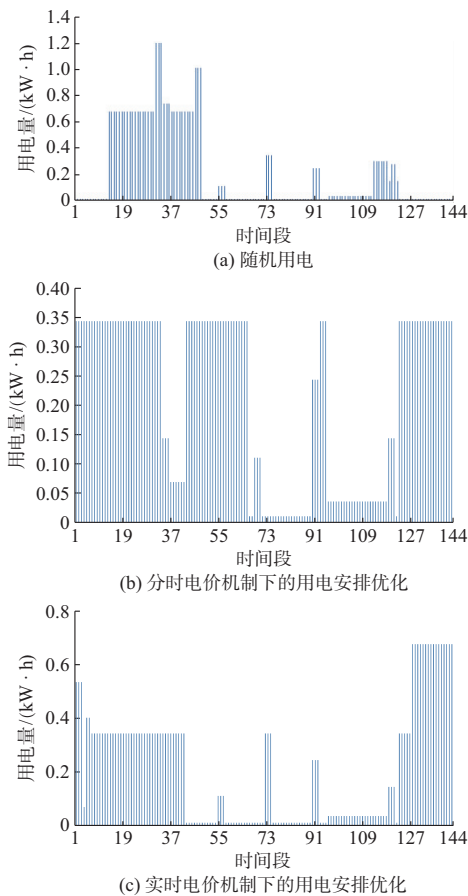


图2 不同电价机制下的各时段负荷分布
Fig.2 Electricity consumption distributions in various pricing mechanisms

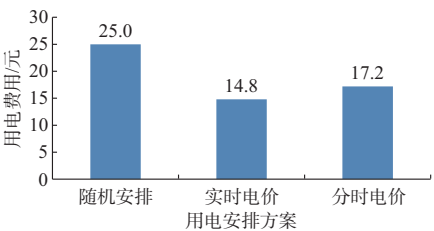


图3 不同用电安排方案下的用电费用比较
Fig.3 Comparison of electricity consumption fee for various electricity consumption schedulings

3.2 用电行为对用电安排优化的影响分析

居民用电行为即智能家电的最早起始时间段、最晚结束时间段、最大允许中断次数等设置的不同会对用电安排优化造成影响。下文将仿真分析在实时电价机制下居民用电行为对用电费用的影响。

首先分析最早起始时间段、最晚结束时间段的影响。在表1的基础上,把用电负荷的最早起始时

间段和最晚结束时间段分别向前和向后移动一个时间段,计算不同的用电费用(若某一用电负荷的最早起始时间段已是时段1或者最晚结束时间段已是时段144,则不做改变)。图4所示为每次改变最早起始时间段和最晚结束时间段后的用电费用。

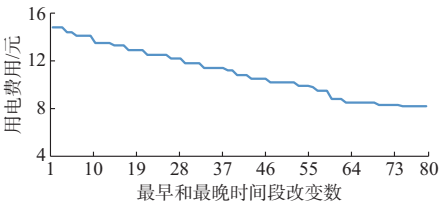


图4 最早和最晚时间段改变与用电费用的关系
Fig.4 Relationship between electricity consumption time constraint change and electricity consumption fee

由图4可知,随着用电负荷允许用电时间段空间越来越大,居民用户的总用电费用越来越小。但是,允许用电时间段空间越大,使得用户可以把更多的用电任务放到电价更低的时段,可能会造成大量用电负荷集中于电价较低时间段工作,从而导致形成新的负荷尖峰,如图5所示。

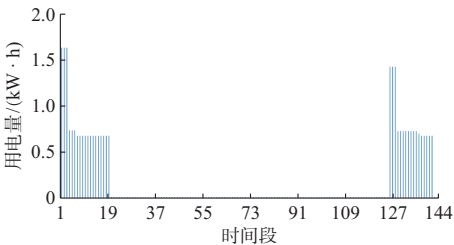


图5 最早和最晚时间段改变80个时间段的用电任务安排
Fig.5 Electricity consumption of consumption time constraint changing for 80 time sluts

在允许最早、最晚运行时间段改变80个时间段后,几乎所有用电负荷的用电任务都集中于时段1至20和时段127至144之间,因为这两个时段区的电价最低。但过度集中用电,使得该用户在时段1和时段127等时间段出现负荷尖峰。

用电负荷的最大允许中断次数也是影响用户用电安排和最终用电费用的因素之一。针对可中断用电负荷的最大允许中断次数,设计了用电负荷最大允许中断次数,如表2所示。

根据表2中的几种情形,仿真计算了实时电价机制下用户的用电费用,如图6所示。可知,情形1由于不允许用电负荷中断发生,所以用电费用最高。而随着用电负荷允许中断次数的增加,用电费用将逐渐减少,但至情形3后,再增加允许中断次数时用电费用保持不变,这说明情形3的中断次数已使得用电任务分布足够灵活且用电费用最小,故无需再

增加中断次数。

表 2 用电负荷最大允许中断次数

Table 2 Maximum interruptible times of appliances

情形	最大允许中断次数					
	洗衣机	热水器 1	热水器 2	热水器 3	电熨斗	EV1 EV2
1	0	0	0	0	0	0 0
2	0	0	0	0	0	1 1
3	1	1	1	1	1	2 2
4	1	1	1	1	1	3 3
5	2	2	2	2	2	3 3

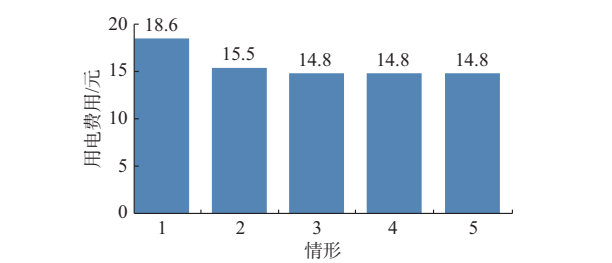


图 6 不同允许中断次数用电安排方案的用电费用比较

Fig.6 Comparison of electricity consumption fee for various maximum interruptible times

允许智能家电用电过程中发生中断可以给用电时间安排带来灵活性,从而减少用电费用。因此,如果用户在一段时间内认为用电费用较高,在不影响用电舒适度的情况下,适当调整智能家电的最大允许中断次数,可以实现降低用电费用的目的。

4 结语

本文研究了居民用户智能用电建模及优化仿真方法。针对智能家电的用电特征,提出了可中断和不可中断两种用电模型。为优化智能家电的用电安排,提出了以用电费用最小为目标的智能家电用电安排优化模型。该模型考虑了智能家电的用电起始时间和用电结束时间限制、智能家电的最大允许中断次数等。

仿真算例表明,所述方法既降低了家庭的用电费用,又减小了用电量峰值。基于算例结果,比较了不同用电安排方案的用电负荷-时间分布情况,分析了智能家电的用电起始时间和用电结束时间限制、智能家电的最大允许中断次数对用电费用和用电负荷-时间分布情况的影响。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 苗新,张恺,田世明,等.支撑智能电网的信息通信体系[J].电网技术,2009,33(17):8-13.
MIAO Xin, ZHANG Kai, TIAN Shiming, et al. Information communication system supporting smart grid[J]. Power System

Technology, 2009, 33(17): 8-13.
[2] 何永秀,王冰,熊威,等.基于模糊综合评价的居民智能用电行为分析与互动机制设计[J].电网技术,2012,36(10):247-252.
HE Yongxiu, WANG Bing, XIONG Wei, et al. Analysis of residents' smart electricity consumption behavior based on fuzzy synthetic evaluation and the design of interactive mechanism[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 247-252.
[3] 谢少军,肖华锋,罗运虎.直流楼宇技术初议[J].电工技术学报, 2012,27(1):107-113.
XIE Shaojun, XIAO Huafeng, LUO Yunhu. On DC building technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 107-113.
[4] LEE J H, KIM H J, PARK G L, et al. Energy consumption scheduler for demand response systems in the smart grid[J]. Journal of Information Science and Engineering, 2012, 28(5): 955-969.
[5] CHOI C S, LEE J I, LEE I W. Complex home energy management system architecture and implementation for green home with built-in photovoltaic and motorized blinders[C]// International Conference on ICT Convergence (ICTC), October 30-November 2, 2012, Hangzhou, China: 295-296.
[6] HAN J S, CHOI C S, PARK W K, et al. Green home energy management system through comparison of energy usage between the same kinds of home appliances[C]// 2011 IEEE 15th International Symposium on Consumer Electronics, June 14-17, 2011, Singapore: 4p.
[7] LI Jian, CHUNG J Y, XIAO Jin, et al. On the design and implementation of a home energy management system[C]// 2011 6th International Symposium on Wireless and Pervasive Computing (ISWPC), February 23-25, 2011, Hong Kong, China.
[8] PIPATTANASOMPORN M, KUZLU M, RAHMAN S. An algorithm for intelligent home energy management and demand response analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2012, 3(4): 2166-2173.
[9] NGUYEN D T, LE L B. Joint optimization of electric vehicle and home energy scheduling considering user comfort preference [J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2014, 5(1): 188-199.
[10] ZHAO Z, LEE W C, SHIN Y, et al. An optimal power scheduling method for demand response in home energy management system[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(3): 1391-1400.
[11] 张钦,王锡凡,王建学,等.电力市场下需求响应研究综述[J].电力系统自动化,2008,32(3):97-104.
ZHANG Qin, WANG Xifan, WANG Jianxue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-104.
[12] 孙国强,李逸驰,卫志农,等.智能用电互动体系构架探讨[J].电力系统自动化 2015, 39(17): 68-74. DOI: 10.7500/AEPS20150320001.
SUN Guoqiang, LI Yichi, WEI Zhinong, et al. Discussion on interactive architecture of smart power utilization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 68-74. DOI: 10.7500/AEPS20150320001.
[13] 王守相,孙智卿,刘喆.面向智能用电的家庭能量协同调度策略[J].电力系统自动化,2015,39(17):108-113.DOI:10.7500/AEPS20140625016.
WANG Shouxiang, SUN Zhiqing, LIU Zhe. Co-scheduling strategy of home energy for smart power utilization [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 108-113. DOI: 10.7500/AEPS20140625016.

[14] LEUNG Y W, WANG Yuping. An orthogonal genetic algorithm with quantization for global numerical optimization [J]. IEEE Trans on Evolutionary Computation, 2001, 5(1): 41-53.

杨永标(1978—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力需求侧与智能能源管理。E-mail: yangyongbiao@sgepri.sgcc.com.cn

颜庆国(1977—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:智能用电与电力需求侧管理。

王冬(1985—),男,通信作者,硕士,工程师,主要研究方向:电力需求侧与智能能源管理。E-mail: wangdong6@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 章黎)

Intelligent Electricity Consumption Modeling and Optimal Simulations for Residential Users

YANG Yongbiao¹, YAN Qingguo², WANG Dong¹, YANG Bin², GAO Hui³

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

3. School of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: With the trend of increasing smart appliances used in homes, their electricity consumption scheduling is becoming an important research area of the demand side management. By dividing a day into slots, representing the starting time, the operation length and electricity consumption with these slots while referring to electricity consumption characteristics and the pricing mechanism, an intelligent electricity consumption optimization approach is proposed to minimize the electricity consumption fee. The approach considers such constraints as the allowed earliest starting instant, the latest ending instant and maximum interruption times at the same time. Simulation results show that the method proposed is effective in reducing the electricity consumption fee and the load peak, especially the more appreciable reduction in the spot price mechanism and with flexible interruption times of smart appliances.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SGTYHT/14-JS-188).

Key words: residential users; intelligent electricity consumption; smart appliance; pricing mechanism; electricity consumption scheduling