

# 家庭用电响应模式研究

阳小丹, 李扬

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 为实现家庭用电的削减及推动用户侧和电网侧的双向互动, 在智能用电技术高速发展和节能减排的背景下, 结合智能用电技术、智能家电、家庭用电行为及电力需求响应, 建立家庭用电响应模式运行流程图。构造经济模式和节能模式的数学模型, 采用遗传算法的机组组合、模糊关联权重法来实现家庭用电优化, 实现用电环境的经济和舒适。算例仿真结果表明用电响应模式及其数学模型、优化方法都是正确合理的, 起到很好的削峰填谷、节约用电的效果。

**关键词:** 双向互动; 用电响应模式; 模糊关联权重法; 家庭用电优化; 需求响应

## Research on household electricity response mode

YANG Xiao-dan, LI Yang

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** To achieve the reduction of household electricity and promote the bilateral interaction between the consumer and the power grid, on the background of the rapid development of intelligent electricity technology and energy-saving and emission-reduction, combining intelligent electricity technology, smart appliances, behavior of household electricity-use and demand respond, the paper builds household electricity response mode flow diagram and its mathematical model. Then, the paper adopts unit commitment of genetic algorithm (GA) and the fuzzy association weighting method to achieve household electricity optimization and make electricity-use more economic and more comfortable. The results demonstrate that the proposed content is right and proper and have a good result of peak clipping, valley filling and electricity saving.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2011AA05A115).

**Key words:** bilateral interaction; electricity response mode; fuzzy association weighting method; household electricity optimization; demand response

中图分类号: TM71

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)12-0051-06

## 0 引言

随着人们生活水平的提高和住房条件的改善, 城乡居民家用电器无论数量还是质量都在逐年提高, 导致居民用电量增长非常明显, 电力成了居民家庭中的主要能耗项目; 同时, 居民生活用电在全社会用电中占很大的比重。在智能用电技术高速发展和节能减排的背景下, 研究用电响应模式, 通过不同的响应模式实现家庭智能用电, 增强居民的节约用电意识, 引导居民节约、合理用电, 现实、必要而又迫切<sup>[1]</sup>。

家庭能源管理主要是家庭用电管理, 近年来许

多学者专家显示出很大的兴趣, 主要致力于家庭能源管理系统的研究和开展试点工程来研究实施家庭能源管理后的节电效果。文献[2]提出一种复杂的家庭能量管理系统架构和交互作用流程。文献[3]提出基于家庭同类型用电设备能效对比的家庭绿色能量管理系统。文献[4]提出的家庭能源管理系统中着眼于三方面: 家庭用电信息获取、提高家庭用电设备的操作性和家庭需求响应。试点工程实施方面, 美国能源部西北太平洋国家实验室协助建立电网智能化联盟并进行实地示范, 将 112 户家庭与实时电力价格信息联系起来。最终结果表明, 节约了约 10% 的能源费用, 需求响应效果良好。我国浙江省海盐县供电局选取南塘琴园小区 78 位住户进行智能化生活试点建设, 并于 2011 年 2 月建成正式投运<sup>[5-7]</sup>。

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2011AA05A115)

以上两方面对家庭用电管理的研究,都有其局限性。家庭能源管理系统的研究及其开发,过于强调系统的整体协调,没有注重对家庭能源管理的用电响应模式和优化方案的研究;家庭能源管理的试点工程则只在已有技术的基础上开展,强调工程实用性,缺乏技术前瞻性和理论突破性。本文将结合智能用电技术、智能家电、家庭用电行为及电力需求响应,建立家庭用电响应模式及其数学模型,实现家庭智能、合理用电,实现用电环境经济和舒适。

## 1 概念

### 1.1 需求响应和双向互动

需求响应是通过电力用户接收电力企业发布电价和激励等用电信息,及时响应用电负荷变化的措施,以达到削峰填谷,减少负荷波动的目的<sup>[8]</sup>。

双向互动包含两层含义,其一是用电信息的互动,是指采用现代通信与信息技术,实现用电及电网信息在供电企业与用户之间即时交换。其二是电能的互动,是指用户根据各种价格和激励措施调整用电方式,并应用自备分布式电源的市场参与行为。

电网与用户的互动是进行需求响应的基础,需求响应是互动的重要体现。

### 1.2 智能用电技术和智能家电

智能用电技术涵盖了高速实时通信、智能电能表、智能采集、双向互动和需求响应等多方面的技术。它是最能够体现智能电网“电力流、业务流、信息流”双向互动的环节,也是电网企业实现营销现代化的重要基础。借助智能用电技术,能实现电力的优化配置、节能环保、使人们的生活变得更加轻松、便捷。

智能家电的发展具有必然性,与传统家电产品相比,具有网络化功能、智能化、开放兼容性、节能化和易用化的特点。它随着人类应用需求和家电智能化的不断发展,其内容将会更加丰富。

### 1.3 居民用户负荷分类和响应方式

电力用户对电力公司激励措施的响应取决于用户自身的响应特性:是否能从响应行为中获得利益;可以采取的响应措施;如何进行响应行为的优化等。

居民用户主要是城市居民的家用电器负荷,具有较强的随机性<sup>[9-10]</sup>。

(1) 核心负荷:包括照明、电脑、烹饪器具、电视等。这些用电设备是刚性的,如果改变使用的时间会极大地影响居民的生活秩序,用户的舒适度会极大地降低。这部分负荷占居民负荷的30%~40%,响应能力较低。

(2) 可存储能量的负荷:冰箱、空调、加热器、热水器等。这些设备在一定程度上能够储存能量,灵活性较强,对激励措施的响应能力强,对居民的生产生活影响小。这部分用电设备的用电量占总用电量的40%~50%。

(3) 可改变使用时间的电器:洗衣机、洗碗机、热水器等。这部分用电设备可以随意选择用电时刻,灵活性较强。但是占居民的用电量不大,为5%~10%,响应能力较高。

居民用户通过内部的经济决策过程,根据自身使用电能方式的不同,做出如下几类响应方式,来实现减少电费支出的目标。

(1) 调节负荷:调节家庭用电器参数来削减用电负荷,对家庭用电舒适度有一定影响。

(2) 转移负荷:转移到另一时段运行,不会对家庭用电器的使用产生过多的影响。

(3) 短时中断负荷:短时间中断负荷不会对使用者产生影响。

综上,双向互动的需求响应是家庭用电响应的方式,智能用电技术和智能家电是家庭用电响应的技术和设备支撑,居民用户负荷分类和响应方式是家庭用电响应的基础。

## 2 家庭用电响应模式

### 2.1 家庭用电响应模式概述

家庭用电响应模式是指家庭用户依据自己的经济和舒适要求采取的负荷响应方式,建立合适的模型和算法,为用户提供家用电器的响应方案。图1为家庭用电响应模式运行流程图。

家庭用电响应模式分为紧急响应模式、经济模式、节能模式、自定义模式。

紧急响应模式优先级最高,通常要签订合同,电力侧控制用电器,优化电器包括智能空调、智能热水器和智能冰箱等。经济模式是针对转移型负荷基于电价的用电优化,优化电器包括洗衣机、干衣机、吸尘器、热水器等;节能模式是在经济模式的基础上,再通过调节性负荷的智能调节,在满足一定舒适度的基础上实现节约电力和电费,优化电器包括空调、冰箱、热水器等;自定义模式是用户根据相关信息自行定义家用电器的运行。

### 2.2 家庭用电响应模式的数学模型

#### 2.2.1 经济模式

经济模式是最简单的家庭用电器优化。经济模式并不能减少家庭用电量,是一种非节能用电响应模式,用户舒适度不会受到影响。

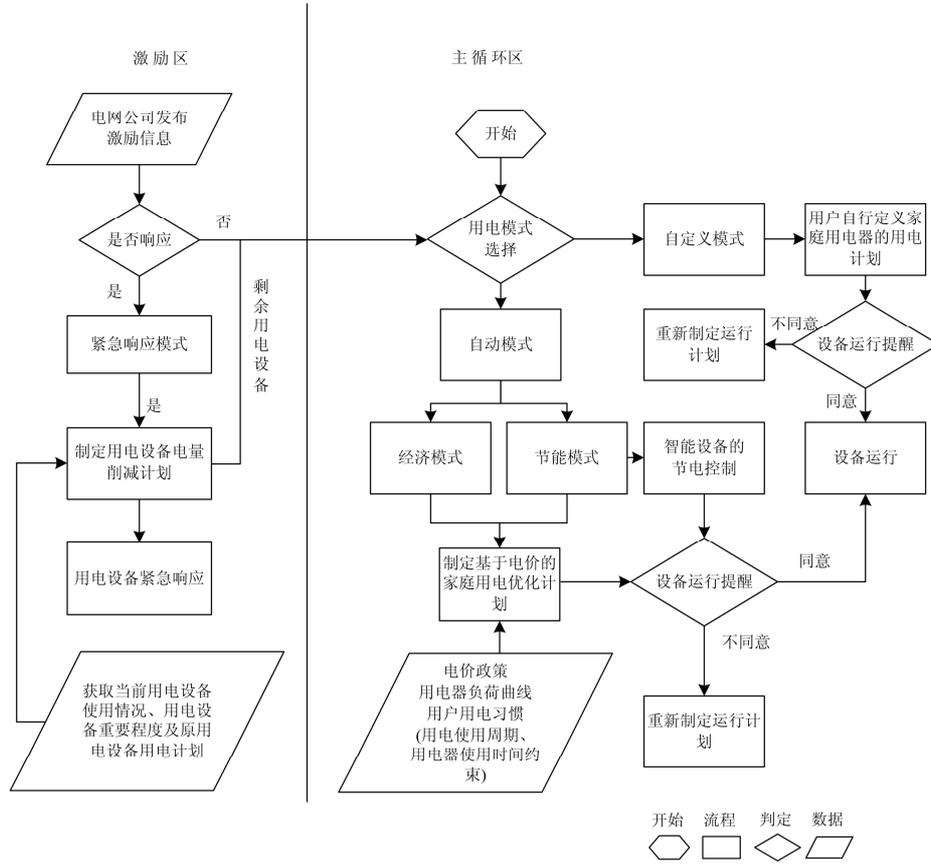


图 1 家庭用电响应模式运行流程

Fig. 1 Household electricity response mode flow diagram

1) 目标函数

经济模式从用户侧的利益出发, 以家庭用电量最小为目标, 得到目标函数如式 (1) 所示。

$$\text{Min } E(i, t) = \sum_{t=1}^T \left( \sum_{i=1}^N \text{price}(t, \text{energy}(t)) * \text{power}(i) \right) * \frac{24}{T} \quad (1)$$

2) 约束条件

(1) 功率约束: 家庭单位小时内允许的最大总功率。

$$\sum_{i=1}^N Y(i, t) * \text{power}(i) \leq \max \text{power}(t) \quad (2)$$

(2) 运行时间总小时数约束: 家用电器在  $T$  小时内的运行总小时数不变, 用电量不变。

$$\text{sum\_runtime}(i) = \sum_{t=1}^T Y(i, t) \quad (3)$$

(3) 运行时间范围约束: 家用电器应该运行在规定的时间内

$$\text{runtime}(i) = \sum_{t=\text{starttime}(i)}^{\text{endtime}(i)} Y(i, t) \quad (4)$$

式中,  $Y(i, t)$  为  $t$  时刻电器  $i$  的运行状态, 0 表示未运行, 1 表示运行。

2.2.2 节能模式

节能模式是在经济模式的基础上开展的, 基于电价的家庭用电优化就不赘述, 这里以空调为例建立节能模式下家庭用电削减模型。

1) 目标函数

以室内温度为状态变量实现经济性和舒适性最优, 目标函数如式 (5) 所示, 总的成本包括两个中间传递函数: 不适成本 ( $f_c$ ) 和电力花费 ( $f_m$ )。

$$\text{Min } J = \sum_{j=1}^n \{C_c f_c(T[k+j]) + C_m f_m(E_{\text{TRSL}}[k+j])\} \quad (5)$$

$$f_c(T_i) = \begin{cases} (T_i - T_n) / \Delta T_{\max}, & T_n \leq T_i \leq T_{\text{upper}} \\ (T_i - T_n) / \Delta T_{\min}, & T_{\text{lower}} \leq T_i \leq T_n \\ 100, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta T_{\max} = T_{\text{upper}} - T_n \quad (7)$$

$$\Delta T_{\min} = T_n - T_{\text{lower}}$$

$$f_m(E_{\text{TRS}}) = \xi_E \cdot VE_{\text{AC}} \quad (8)$$

2) 约束条件

(1) 室内温度与空调耗能等式约束

$$T_{i+1} = \varepsilon T_i + (T_{\text{out}} - \eta VE_{\text{AC}} / A) \quad (9)$$

(2) 室内温度约束

$$T_i < T_{\text{upper}} = \min(28^\circ\text{C}, T_n + \omega \cdot a) \quad (10)$$

$$T_i > T_{\text{lower}} = \max(21^\circ\text{C}, T_n - \omega(1-a)) \quad (11)$$

(2) 单位小时电量约束

$$0 \leq \Delta E_{\text{AC}} \leq \Delta E_{\text{ACmax}} \quad (12)$$

式(9)中:  $\Delta E_{\text{AC}}$  为空调能量;  $\Delta E_{\text{SR}}$  为太阳辐射能量;  $T_i$  为室内温度;  $T_a$  为室外温度;  $T_n$  为人体最舒适温度; 在 10% 不满意度下,  $w$  和  $a$  分别是  $5^\circ\text{C}$  和 0.7; 常量  $C_c$  和  $C_m$  是权重。

2.2.3 紧急响应模式

紧急响应模式是基于激励的双向互动需求响应, 是用户对电力公司发布的激励信息进行响应。本文为用户提供分层次的响应方案, 分为轻度参与方案、中度参与方案和深度参与方案。

1) 轻度参与和中度参与

紧急响应模式下, 轻度参与时通过调节用电器的相关参数来实现节能, 如空调的智能调节等; 中度参与是在轻度参与的基础上还通过短时中断用电器来实现节能。

2) 深度参与

在中度参与的基础上, 用户为了获取更多的补偿, 将在激励时段内停止运行的用电器。选择停止用电器策略上本文采用模糊关联权重的方法为用户选择优先停止运行的用电器<sup>[11-12]</sup>。

结合家庭用电特性、用户心理学等, 得到以下三个影响选择停止用电器的因素。

- a) 家用电器此次运行的电费。
- b) 家用电器运行的小时数。
- c) 家用电器的重要程度。

采用模糊关联的方法对影响因素量化为同阶值, 见表 1。不同影响因素对选择停止用电器的影响程度也不同, 采用权值法进行加权, 运行费用、重要程度、运行小时权重值分别是 0.25、0.5、0.25。

表 1 影响因素模糊关联值对应表

Table 1 Fuzzy association values of influencing factor

特征分量	符号	特征分量原始值	特征分量模糊化值 S
运行		$c > 2$	1
费用/元	$c$	$c \leq 2, c > 1$	2
		$c \leq 1$	3
重要程度	$p$	$p = \text{“不重要”}$	1
		$p = \text{“一般”}$	2
		$p = \text{“重要”}$	3
		$p = \text{“非常重要”}$	4
运行小时/h	$h$	$h = 1$	1
		$h \geq 2, h \leq 3$	2
		$h \geq 4, h \leq 5$	3
		$h \geq 6$	4

每一用电器都可以通过式(13)计算出其影响程度值, 该值越大表明越不应该停止运行。

$$\text{target\_value} = \sum_{i=1}^3 (S_{n,i} - R_{n,i}) \quad (13)$$

式中:  $\text{target\_value}$  为影响程度值;  $S_{n,i}$  为用电器  $n$  的第  $i$  种影响因素的模糊关联值;  $R_{n,i}$  为用电器  $n$  的第  $i$  种影响因素的权重值。

3 算例

算例将对国内典型家庭的用电器在节能模式下用电优化和紧急响应模式下选择停止用电器策略进行仿真, 仿真时间为一天。

3.1 节能模式下家庭用电优化

一方面可转移用电器在允许运行时段内基于分时电价的优化, 所需要的数据信息见表 2 和表 3, 得到一天的用电器最优运行方案; 另一方面可调节负荷(本文考虑空调)根据数学模型进行智能控制, 实现节约电费、节约电量和引导用户转移负荷。

表 2 电价方案

Table 2 Price scheme

参量	值
$t$	$(0, 7, 9, 16, 18, 22)^T$
$x$	$[0.3, 0.45, 0.3, 0.37, 0.45, 0.3]$
$P_{\text{Max}}$	$(4, 4, 3, 2, 3, 4)$

注: 向量  $t$  为时段分划点;  $x$  为电价矩阵;  $P_{\text{Max}}$  为对应时段内每小时的最大功率约束。

表 3 用电器数据

Table 3 Data of electric equipment

设备名称	运行小时数/h	允许运行时段	运行功率/kW	是否可转移
吸尘器	1	7:00~10:00	0.5	是
洗衣机	1	18:00~21:00	0.8	是
干衣机	2	19:00~24:00	0.65	是
洗碗机	1	20:00~22:00	1	是
热水器	1	17:00~20:00	0.7	是
电动车	6	17:00~06:00	0.15	是

基于分时电价的家庭用电优化问题与机组组合问题极为相似, 可以采用遗传算法的机组优化组合方法解决家庭用电优化问题<sup>[13]</sup>。此外, 对空调在数学模型基础上进行智能调节, 采用 Lingo 进行优化。优化前后得到的结果如表 4、图 2、图 3 所示。

表 4 用电器优化运行结果

Table 4 Optimized result of electric equipment

设备名称	最优运行时段	正常情况下运行时段
吸尘器	9:00~10:00	7:00~8:00
洗衣机	18:00~19:00	20:00~21:00
干衣机	22:00~24:00	21:00~23:00
洗碗机	20:00~21:00	20:00~21:00
热水器	17:00~18:00	19:00~20:00
电动车	22:00~06:00	17:00~23:00

注: 正常情况下运行时段为家庭用电设备在不进行优化时, 一般情况下的运行情况。

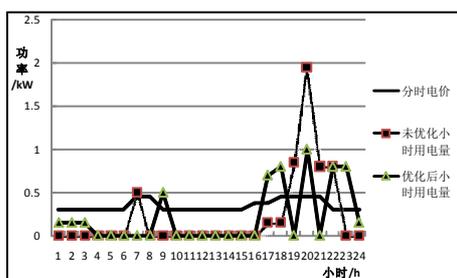


图 2 分时电价下优化结果

Fig. 2 Optimized result based on TOU

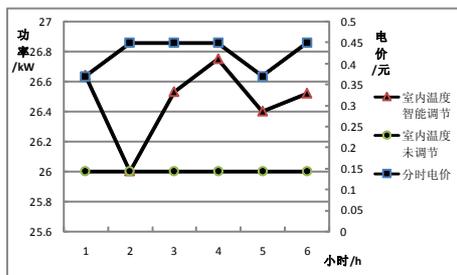


图 3 空调的智能调节结果

Fig. 3 Intelligent regulation result of air-condition

从表 4 和图 2 可以看出, 优化前后的家庭用电器运行时段有很大的变化, 优化前的家庭用电器大多运行在高电价时段, 一天的电费为 10.053 元, 一方面引起高峰负荷, 另一方面也给家庭带来高电费; 优化后的家庭用电器运行在低电价时段, 一天的电费为 7.845 元, 起到削峰填谷, 引导合理用电, 减少用电费用的效果。从图 4 可以看出, 空调负荷在高于 26 °C 附近进行波动, 一方面跟随电价变化, 另一方面由于不适成本的存在, 室内温度不会上升过高, 实现经济和舒适。

### 3.2 深度参与时家庭用电器选择

紧急响应模式深度参与时, 本文综合多种影响因素提出模糊关联权重法来优先选择停运哪些用电器, 通过算例来验证。表 5 是用电器的相关信息。

表 5 用电器相关因素值

Table 5 Related factors values of electric equipment

设备名称	运行费用/元	重要程度	运行小时
空调 1	3.44	非常重要	4
空调 2	2.925	非常重要	6
吸尘器	0.15	一般	1
洗衣机	0.36	一般	1
干衣机	0.39	不重要	2
洗碗机	0.45	重要	1
热水器	0.259	重要	1
电动车	0.27	非常重要	6

注: 运行费用是按照当天的优化运行方案得出的费用结果, 重要程度由用户自定义。

综合表 1、表 2 和表 5 的数据, 按照式(5)计算出各个用电设备的影响程度值, 结果见表 6。

表 6 用电器影响程度值

Table 6 Influencing values of electric equipment

设备名称	影响程度值*4
干衣机	7
洗衣机	8
吸尘器	8
⋮	⋮
电动车	15

从表中看出, 最应停止运行的用电设备是干衣机, 其次是洗衣机, 因为它们的运行费用高、重要程度低、运行时间短, 用户选择停运是最合适的。其余用电设备同理按照影响程度值从小到大选择停止运行。结果与实际情况符合, 说明采用模糊关联权重的方法能人性化地快速帮助用户选择停止运行的用电设备。

## 4 结论

本文结合智能用电技术、智能家电、家庭用电行为及电力需求响应,建立了家庭用电响应模式运行流程。然后对经济模式和节能模式,建立了优化数学模型;对紧急响应模式,本文设计三种参与方式,可以为用户提供不同程度的响应方式,并采用模糊关联权重法来选择优先停止运行的用电设备。最后通过算例证明,基于优化数学模型是恰当的,能很好地实现削峰填谷,引导合理用电,减少用电费用;模糊关联权重法是正确的,能综合考虑多种影响因素,快速帮助用户选择停止运行的用电设备。

## 参考文献

- [1] 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 Shao-jun, XIAO Hua-feng, LUO Yun-hu. On DC-distribution technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 107-113.
- [2] CHOI Chang-sic, LEE Jeong-in, LEE Il-woo. Complex home energy management system architecture and implementation for green home with built-in photovoltaic and motorized blinders[C] // ICT Convergence (ICTC), 2012 International Conference on, 2012: 295-296.
- [3] HAN Jin-soo, CHOI Chang-sic, PARK Wan-ki, 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, 2011.
- [4] LI Jian, CHUNG Jae-yoon, XIAO Jin, et al. On the design and implementation of a home energy management system[C] // Wireless and Pervasive Computing (ISWPC), 2011 6th International Symposium on, 2011.
- [5] 李同智. 灵活互动智能用电的技术内涵及发展方向[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 11-17.  
LI Tong-zhi. Technical implications and development trends of flexible and interactive utilization of intelligent power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 11-17.
- [6] 李媛, 罗琴, 宋依群, 等. 基于需求响应的居民分时阶梯电价档位制定方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 65-74.  
LI Yuan, LUO Qin, SONG Yi-qun, et al. Study on tiered level determination of TOU & tiered pricing for residential electricity based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 65-74.
- [7] 陈树勇, 宋书芳, 李兰欣, 等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.  
CHEN Shu-yong, SONG Shu-fang, LI Lan-xin, et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology, 2009, 33(8): 1-7.
- [8] 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 Xi-fan, WANG Jian-xue, et al. Survey of demand response research in deregulated electricity markets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 97-104.
- [9] 黄宇腾, 郭创新, 侯芳, 等. 一种面向需求侧管理的用户负荷形态组合分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 41(13): 20-25.  
HUANG Yu-teng, GUO Chuang-xin, HOU Fang, et al. A new combinational electrical load analysis method for demand side management[J]. Power System Protection and Control, 2010, 41(13): 20-25.
- [10] 郑晓雨, 马进, 贺仁睦, 等. 基于模型激励响应的负荷分类与泛化能力[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 132-138.  
ZHENG Xiao-yu, MA Jin, HE Ren-mu, et al. Classification and generalization of the load model based on model dynamic responses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 132-138.
- [11] 张筱慧. 标么值加权平均组合变量生成法用于中长期电力负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 40-43.  
ZHANG Xiao-hui. Per-unit value weighted average combined variable generated method for mid-long term power load forecasting[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 40-43.
- [12] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于模糊识别的光伏发电短期预测系统[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 83-89.  
CHEN Chang-song, DUAN Shan-xu, CAI Tao, et al. Short-term photovoltaic generation forecasting system based on fuzzy recognition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 83-89.
- [13] 周文越, 吕飞鹏, 李鹤. 基于遗传算法的运行方式组合方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(10): 51-54.  
ZHOU Wen-yue, Lü Fei-peng, LI He. Method for the combination of power system operation mode based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(10): 51-54.

收稿日期: 2013-09-02; 修回日期: 2013-12-10

作者简介:

阳小丹(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场、家庭能量管理; E-mail: 270607818@qq.com

李扬(1961-), 男, 教授, 博导, 主要从事电力系统运行与规划、电力系统可靠性分析、电力市场、电力需求侧管理、智能电网等。