

峰谷电价下居民用电聚合响应特性分析

林启开¹, 王珂¹, 余昆², 王健²

(1. 中国电力科学研究院南京分院, 江苏 南京 210003; 2. 河海大学, 江苏 南京 211100)

摘要:通过问卷调查和相关文献分析居民用电负荷特性,介绍居民用户电价响应经济学机理。根据南京市典型居民小区历史数据研究电价变化点负荷增长率,分析峰谷电价下居民小区用电聚合响应特性,对比多区域居民负荷增长率并引进峰谷电量比分析,总结居民峰谷电价用电特性及影响因素,分析原因并提出建议。

关键词:峰谷电价;居民负荷特性;经济学机理;相关性;负荷增长率;峰谷比

中图分类号:TM714

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)03-0088-06

0 引言

电力高峰负荷持续增长及间歇式能源的迅猛发展向电力系统调节能力提出新的重大挑战,作为发电调度的补充,通过电价机制引导柔性负荷^[1]参与调度运行有利于丰富电网调度的调节手段,提高电网额外调节能力,改善电网负荷形态,提高可再生能源消纳能力,居民用电负荷具有柔性负荷的许多特征,作为短时间尺度上的调度资源受到极大重视。峰谷分时电价^[2]作为一种有效的需求侧管理手段,通过价格信号引导用户合理用电,对移峰填谷优化电力资源配置等方面起到了积极作用。一般都从工业用电开始实施峰谷电价,不过人民生活水平不断提高,空调、电热水器等家用电器越来越普及,降温负荷所占比重愈来愈大,接近总用电负荷30%的降温负荷是季节性缺电的主要原因。一般居民用户的节电意识较强,虽然可转移或可削减的负荷量不大,但用户数量较大,峰谷电价下具有可观的响应潜力,一旦改变了其用电习惯,则对长期的电网负荷大有好处。分析峰谷电价下居民用电聚合响应特性,可作为完善居民峰谷电价的参考。

本文以南京市为例,分析了居民用电负荷特性、峰谷电价下用户用电心理和居民用电聚合响应特性。具体分析负荷增长率变化及与温度、日类型^[3]的相关性,对比多区域负荷增长率和峰谷比,分析居民经济条件对峰谷电价的影响,最后调研典型小区居民对峰谷电价政策的了解参与程度。

收稿日期:2016-12-30;修回日期:2017-02-28

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK20160145);国家电网公司科技项目(“源-网-荷”动态交互仿真模拟技术研究及系统开发)

1 居民负荷用电特性

1.1 负荷构成

居民用电的设备^[4,5]主要包括:(1)高耗电家用电器,如空调、电热水器、电采暖器、电炉、微波炉、电磁炉等;(2)低耗电常规家用电器,如照明灯具、冰箱、电视、洗衣机、消毒柜等。其中,照明灯具等低耗电常规家用电器使用比较普遍,属于生活的必需品,可称为基本负荷;高耗电家用电器中的空调、电采暖器、电热水器越来越普及,属于提高生活质量的产品,使用具有季节性,受气温影响较大,可称为季节性负荷^[3]。

1.2 用电时段

调研结果显示,电热水器一般只在要用热水时才打开,电动汽车一般都是在06:00左右进行充电活动,并且在晚间会有明显集中充电的行为,洗衣机在21:00后大量出现,空调及取暖器在居民下班后18:00—22:00使用。彩电及照明灯、电脑等是典型的晚间高峰负荷,在目前智能控制设备没有普及的情况下,居民可转移的用电负荷主要是电热水器、洗衣机、电热水壶等,部分电价敏感的空调也可作为可转移或可削减负荷。

1.3 负荷曲线

图1是从南京供电公司得到的某典型居民小区的典型日负荷曲线变化。2种不同颜色的曲线分别表示华府1号和华府2号2个调研小区,一天中的用电高峰大概出现在20:30—21:30,在11:30—13:30也会出现一个用电量的小高峰。曲线中负荷使用量最低值出现在凌晨04:00—05:00左右,并且在15:00左右也出现一个相对的低谷,整个一天的图形是两峰两谷,基本呈现午高峰和晚高峰,最大负荷集中出现在19:00—22:00,各地略有不同,整个一天的负荷曲线可描述为两峰两谷。

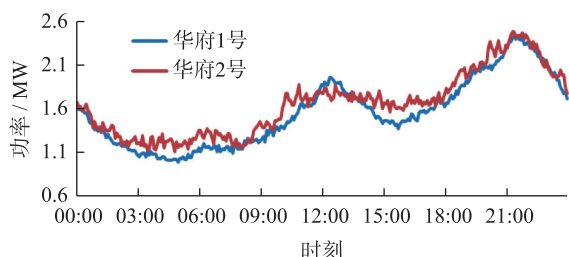


图1 调研小区的某一天总的负荷曲线

Fig.1 Total load curve of the survey community for a given day

居民生活负荷的大小及负荷曲线的形状与居民小区的大小、人口的密度及分布、小区内居民的收入水平有关,气候条件、日类型也是影响居民负荷水平及负荷曲线的重要因素。不同季节高峰负荷出现的时间也各不相同。南京市2014年春夏季的典型负荷曲线如图2所示,居民的用电主要出现在晚高峰时段,夏季有2个很明显的高峰,其中一个高峰在10:30—14:00,另一个高峰在19:00—22:00,峰值比第一个高峰要高,主要是居民晚上照明和家用电器的用电,夏季天气炎热,中午和晚上大多数居民都开空调。

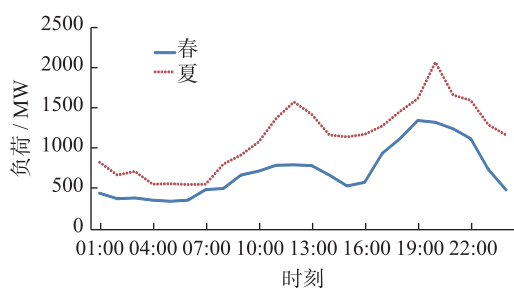


图2 南京市春夏两季居民典型日负荷特性曲线

Fig.2 Typical daily load characteristic curve in spring and summer in Nanjing

2 峰谷电价下居民用电响应经济学机理

电力市场中,终端用户的价格响应就是指用户在不同价格水平下改变自己的用电方式的行为。研究电力市场中终端用户的响应对于电力公司更好地制定电价非常重要,因为只有摸清用户在什么时段以什么价格下将消费多少电能后,电力公司制定的电价才具有正确的引导性^[6-9]。

2.1 消费者对消费品价格的反应

用户消费心理曲线如图3所示。当消费品价格相对偏高时消费者会减少消费的数量,当价格相对偏低时消费者会增加消费的数量。另外,当消费品价格变动较小时,消费数量的变化也较小;而当消费品价格变动较大时,消费数量的变化也较大。居民对电能的消费有同样的规律。

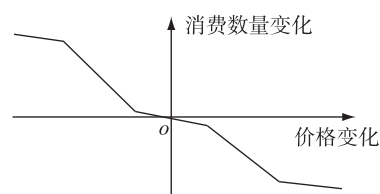


图3 用户消费心理曲线

Fig.3 User's consumption psychology curve

2.2 居民对电价的灵敏度分析

居民用户对电价的反应可以用负荷转移率^[10] λ 来描述,其示意图如图4所示。

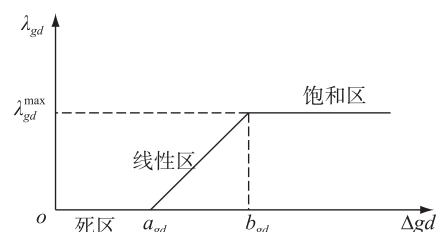


图4 负荷转移率随电价的变化

Fig.4 Load transfer rate with price change

$$\lambda_{gd} = \begin{cases} 0 & (0 \leq \Delta gd \leq a_{gd}) \\ K_{gd}(\Delta gd - a_{gd}) & (a_{gd} \leq \Delta gd \leq b_{gd}) \\ \lambda_{gd}^{\max} & (\Delta gd \geq b_{gd}) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: g , d 分别为高电价和低电价, $\Delta gd = g - d$; a_{gd} 为销售电价对居民用户刺激的最小可觉差,当销售电价小于 a_{gd} 时,居民用户基本上无反应; b_{gd} 为销售电价对居民用户刺激的最大饱和值,大于此值时,居民用户将不再有更多的可转移负荷,响应能力趋近饱和; K_{gd} 为线性区斜率。 a_{gd} , b_{gd} 的值由于用户不同会有变化,受居民小区经济条件及生活习惯的影响。

居民用户将高峰期用电转移至低谷期是要付出代价的,如差价不大,节省的电费不足以补偿其耗费,用户就没有利用低谷电的积极性,或者当提高过后的电价与原电价差别不大时,居民不改变用电方式也能承受电价变化前后的电费,此时居民往往会图方便或舒适而不愿改变用电方式,对应图4中的死区。当电价提高到居民用户无法承受的时候,居民则会将一些家用电器避峰运行或直接改用节能电器来降低用电量,对应图中线性区。而部分用电又是必须的,无论如何改变电价,用户也不可能改变此部分的用电量,对应于图中饱和区。

对居民用户实行峰谷电价,不同经济水平居民的最小可觉差值和最大饱和值不同。因为支付能力较低、用电量较小的用户侧重节约电费,会减少

高峰用电,从而达到削峰的效果;支付能力高、用电量大的用户更注重舒适度,一般不会减少高峰和低谷用电需求;而处于中间层的用户可能综合考虑电费与舒适度而适当减少高峰负荷,并通过购买大容量用电器(如电热水器)或延长晚上空调开机时间增加低谷用电量。所以居民经济条件也可能成为峰谷电价响应的重要影响因素。

3 南京居民用电聚合响应特性

居民用电聚合响应特性指多用户、多类负荷响应的整体特性,而不区分用户和负荷类型。采样的数据为2012年南京市某居民小区的10 kV线路负荷,其时间间隔为5 min,反映的是小区多用户多负荷总体特性。南京居民08:00—21:00执行峰电价[0.55元/(kW·h)],21:00至次日08:00执行谷电价[0.35元/(kW·h)]。

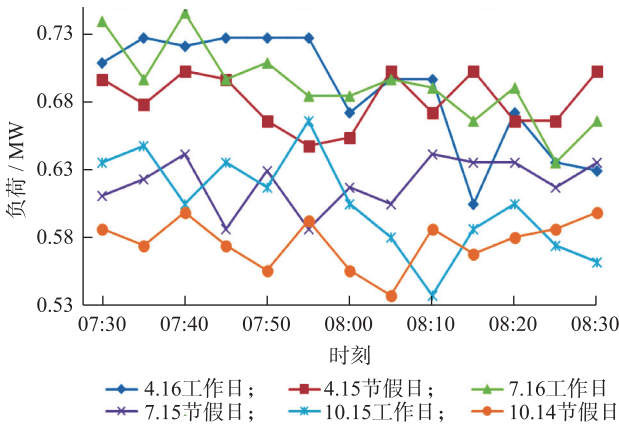


图5 08:00 负荷趋势
Fig.5 08:00 Load trend

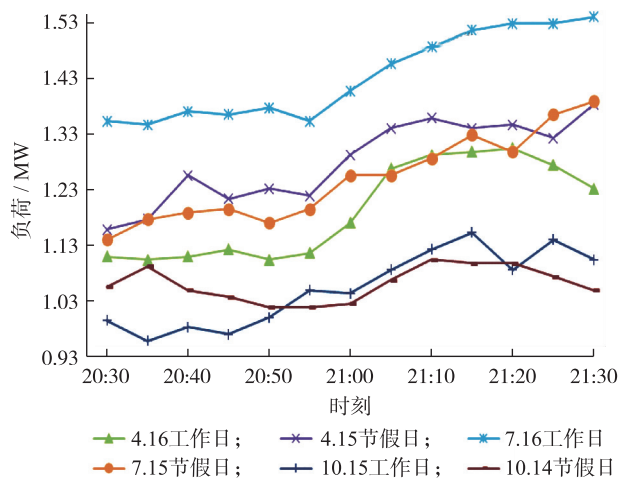


图6 21:00 负荷趋势
Fig.6 21:00 Load trend

3.1 电价变化点负荷趋势

图5和图6中,横坐标为时间,纵坐标为居民负荷。考虑数据比例略去冬季曲线。图5中节假日

日和工作日08:00负荷变化趋势各异,无明显规律。图6在21:00电价变化后出现明显增长趋势,21:00节假日和工作日大部分居民在家中休息,负荷变化呈现上升趋势不受日类型影响。居民晚上电器使用较多,用电负荷相对比白天大,用电可转移负荷较多,在电价变化之后,响应变化较白天明显。

3.2 负荷增长率分析

本文主要以电价变化点负荷增长率为对象进行分析,首先对2个电价变化点定义。

(1) 08:00 负荷增长率。10 min 增长率 $\gamma_{10min1} = \frac{(l_{08:10} - l_{07:50})}{l_{07:50}}$; 30 min 增长率为 $\gamma_{30min1} = \frac{(l_{08:30} - l_{07:30})}{l_{07:30}}$; 最值增长率为 $\gamma_{m1} = \frac{(l_{min1} - l_{max1})}{l_{max1}}$ 。

(2) 21:00 负荷增长率。10 min 增长率 $\gamma_{10min2} = \frac{(l_{21:10} - l_{20:50})}{l_{20:50}}$; 30 min 增长率为 $\gamma_{30min2} = \frac{(l_{21:30} - l_{20:30})}{l_{20:30}}$; 最值增长率为 $\gamma_{m2} = \frac{(l_{max2} - l_{min2})}{l_{min2}}$ 。

l 表示对应时刻负荷值, l_{min1} 取08:00—08:30最小值, l_{max1} 取07:30—08:30最大值。 l_{max2} 取21:00—21:30最大值, l_{min2} 取20:30—21:00最小值。通过SPSS分析电价变化点负荷增长率与日类型、温度相关性得表1和表2。这里日类型主要区别节假日与工作日,进行相关性分析时工作标注1、节假日标注2。下标0.01或者0.05水平指的是显著性水平,也称作P值。显著性小于0.05则为显著相关,小于0.01则为极显著相关。这里判断相关关系强弱主要由Pearson相关系数来判断,其值越大相关性越强。

表1 08:00 负荷增长率相关性

Table 1 Correlation of load growth rate at 08:00		日类型	08:00 温度
γ_{10min1}	Pearson 相关性	0.366 **	0.193
	显著性(双侧)	0.000	0.000
γ_{30min1}	Pearson 相关性	0.771 **	0.037
	显著性(双侧)	0.000	0.476
γ_{m1}	Pearson 相关性	0.708 **	0.094
	显著性(双侧)	0.000	0.073

注:**为0.01水平(双侧)上显著相关。

由表1数据,08:00负荷增长率与日类型的Pearson相关系数除10 min增长率都超过0.5,工作日08:00大部分居民需外出上班,日类型对负荷增长率影响较大,10 min与日类型相关性较弱,可能是

表2 21:00 负荷增长率相关性

	21:00	日类型	21:00 温度
γ_{10min2}	Pearson 相关性	-0.058	0.255**
	显著性(双侧)	0.272	0.000
γ_{30min2}	Pearson 相关性	-0.095	0.382**
	显著性(双侧)	0.070	0.000
γ_{m2}	Pearson 相关性	-0.096	0.466**
	显著性(双侧)	0.067	0.000

注:**为0.01水平(双侧)上显著相关。

响应时间不足造成。08:00 负荷增长率与温度相关性较弱。由表2数据,21:00 大部分居民在家休息,日类型对负荷增长率基本无影响,与上文分析一致。而受温度影响明显,原因是晚间居民生活受温度影响较大,空调、风扇、取暖器等电器设备投入使用。

对数据区分日类型求全年增长率期望得表3和表4。08:00 工作日与双休日的增长率期望偏差较大,说明日类型对08:00 增长率影响较大;21:00 工作日与双休日增长率期望差异不大,再次验证日类型对21:00 负荷增长率基本无影响。

表3 08:00 区分日类型负荷增长率

08:00	γ_{10min1}	γ_{30min1}	γ_{m1}
不区分日类型	-0.044 3	-0.086 7	-0.148 8
工作日	-0.057 6	-0.140 5	-0.177 9
双休日	-0.015 8	0.029 1	-0.086 0

表4 21:00 区分日类型负荷增长率

21:00	γ_{10min2}	γ_{30min2}	γ_{m2}
不区分日类型	0.094 5	0.137 8	0.172
工作日	0.095 9	0.141 2	0.175 2
双休日	0.091 4	0.130 3	0.165 3

3.3 多区域响应对比分析

不同地区由于地理位置和经济生活水平不同,可能对峰谷分时电价的响应作出不同动作。南京7个区域2013年的峰谷电量对比分析总结如表5所示。

表5中,红色为所在列最大值,蓝色为最小值。横向比较峰谷比期望,每个区域夏冬峰谷比都偏低,说明居民峰谷电价受季节影响明显。分析原因是夏冬两季季节性负荷如空调、取暖器在谷电价期间使用较多,增加了谷负荷从而峰谷比较小。三牌楼和百家湖峰谷比相差最大,如图7所示。

表5 南京七区对比分析

期望值	全年	春	夏	秋	冬
三牌楼	1.478	1.516	1.394	1.545	1.457
芦席营线	1.416	1.434	1.394	1.442	1.394
幕府佳园2号	1.348	1.387	1.214	1.396	1.398
苏宁睿城1号线	1.316	1.511	1.126	1.354	1.274
大华2号	1.298	1.337	1.154	1.394	1.307
翠岛2号线	1.292	1.324	1.201	1.382	1.260
百家湖2号线	1.249	1.302	1.135	1.331	1.226

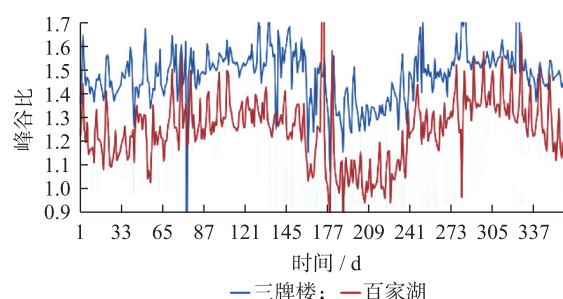


图7 三牌楼百家湖全年峰谷比

Fig.7 The annual peak-to-valley ratio of Sanpailou and Baijiahu

三牌楼峰谷电量比明显高于百家湖,峰谷电价对降低三牌楼地区峰谷差作用并不明显,分析原因则是由于居民经济条件影响,且居民对峰谷电价了解响应程度不同。一般规律是经济条件好的用户更注重舒适度,电价变化在其经济承受能力范围内,居民不愿改变原有用电方式,峰谷比较大;相对支付能力较低的用户侧重节约电费,会减少高峰用电,峰谷比较小。居民的收入属于个人隐私问题,调查问卷也不方便,居民经济条件获取困难,若以区域房价为指标划分7个区域经济条件,7个区域峰谷比不完全符合上述经济规律,需进一步调研分析。又调研典型小区居民对峰谷电价的了解程度,如图8所示。

调研小区对峰谷电价是否了解 使用电器设备是否考虑峰谷电价

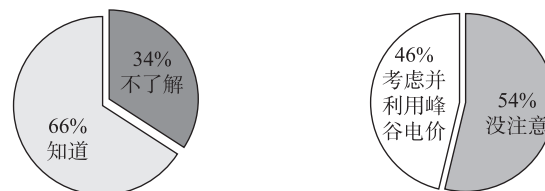


图8 关于峰谷电价的调研分析

Fig.8 The investigation and analysis on peak and valley price

在峰谷电价了解程度调研选项上65.7%的用户知晓,34.3%的用户不太了解居民电价有峰谷时段的不同,在知晓峰谷电价机制的用户里,46%的居民

考虑了峰谷电价的影响,说明用户本身具有很高的节约使用电能的认识,剩下 54%的用户在使用家用设备时没有过多关注峰谷电价政策,主要是根据自身使用习惯来决定设备的启停,所以说这类用户还具有很大调节空间,只要有恰当的需求响应策略^[11-16]还是能够吸引这类用户参与到需求响应项目中的。峰谷分时电价政策在小区的实施效果还远远没有达到理想的效果,如果采取积极的宣传教育和合理的激励措施,居民用户仍然有很大的响应潜力。

4 结语

(1) 居民响应峰谷电价季节规律明显,跟温度直接相关,可考虑施行峰谷电价与季节性尖峰电价结合的电价机制。部分发达国家居民阶梯电价与季节性峰谷分时电价结合的电价政策值得借鉴参考。

(2) 居民 21:00 峰谷电价响应效果比 08:00 明显。08:00 负荷增长率受日类型影响,21:00 负荷增长率受温度影响,且跟电器使用特性和居民生活规律相关。

(3) 居民对峰谷电价政策缺乏了解参与,尚存在很大响应潜力,应加大峰谷电价政策宣传教育,可考虑三段式电价或者拉大峰谷电价比,激励不同条件居民响应峰谷电价。

当然,本文是以南京市居民为例进行分析,普适性还需进一步研究分析。

参考文献:

- [1] 王珂,姚建国,姚良忠,等. 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.
WANG Ke, YAO Jianguo, YAO Laingzhong, et al. Survey of research on flexible loads scheduling technologies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014,38(20):127-135.
- [2] 孙薇,李珊. 电力需求侧管理中的分时电价研究[J]. 电气应用,2008,27(6):63-66.
SUN Wei, LI Shan. Research on TOU pricing of electric Power demand side management[J]. Electrotechnical Application, 2008,27(6):63-66.
- [3] 杨建萍. 南京市居民用电负荷特性分析与思考[J]. 电力需求侧管理,2002,04(2):24-27.
YANG Jianping. Analysis and study of Nanjing residential load profile[J]. Demand Side Management, 2002,04(2):24-27.
- [4] 陶莉. 峰谷电价政策对负荷特性的影响[D]. 南京:东南大学,2004.
TAO Li. Response of time-of-use electricity pricing policy to load characteristic[D]. Nanjing:Southeast University,2004.
- [5] 刘庆强. 居民负荷特性研究及应用[D]. 上海:上海电力学院,2014.
LIU Qingqiang. Research and application of residents Load signature [D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2014.
- [6] 孔祥玉,杨群,穆云飞,等. 分时电价环境下用户负荷需求响应分析方法[J]. 电力系统自动化学报,2015,27(10):75-80.
KONG Xiangyu, YANG Qun, MU Yunfei, et al. Analysis method for customers demand response in time of using price [J]. Proceedings of the Csu-epsa, 2015,27(10):75-80.
- [7] 成伯清,李林艳. 消费心理[M]. 南京:南京大学出版社,1994:1-297.
CHENG Boqing, LI Linyan. Consumer psychology [M]. Nanjing:Nanjing University Press,1994:1-297.
- [8] 陈智勇. 消费心理学[M]. 北京:北京工业大学出版社,1998:1-65.
CHEN Zhiyong. Consumer psychology [M]. Beijing: Beijing University of Technology Press,1998:1-65.
- [9] 马谋超,高云鹏. 消费者心理学[M]. 北京:中国商业出版社,1997:5-200.
MA Mouchao, GAO Yunpeng. Consumer psychology[M]. Beijing:China Business Press,1997:5-200.
- [10] 阮文骏,王蓓蓓,李扬,等. 峰谷分时电价下的用户响应行为研究[J]. 电网技术,2012,36(7):86-93.
RUAN Wenjun, WANG Beibei, LI Yang, et al. Customer response behavior in time-of-use price[J]. Power System Technology, 2012,36(7):86-93.
- [11] 熊虎岗,程浩忠,章文俊,等. 峰谷分时电价对上海市居民用户用电特性影响分析[J]. 电力需求侧管理,2006,08(6):16-20.
XIONG Hugang, CHENG Haozhong, ZHANG Wenjun, et al. Analysis of the peak-valley TOU tariff effect on Shanghai residential electricity characteristics [J]. Demand Side Management, 2006,08(6):16-20.
- [12] 陶莉. 国外分时电价政策简介及探究[J]. 江苏电机工程,2007,26(1):58-60.
TAO Li. Brief introduction and research of oversea timeshare electrovalence policies [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2007,26(1):58-60.
- [13] 王霞,王丽萍. 国外电价改革及启示[J]. 浙江电力,2003(3):64-67.
WANG Xia, WANG Liping. Foreign electricity price reform and its revelation[J]. Zhejiang Electric Power, 2003(3):64-67.
- [14] 谭媛媛. 我国居民阶梯电价政策实践研究[J]. 经营管理者,2016(3):259-260.
TAN Yuanyuan. A study on the practice of the residents' tariff policy in China[J]. Manager' Journal, 2016(3):259-260.
- [15] 赵会茹,王玉玮,张超,等. 阶梯电价下居民峰谷分时电

价测算优化模型[J]. 电力建设,2016,37(3): 17-23.

ZHAO Huiru, WANG Yuwei, ZAHNG Chao, et al. Optimization model of residential time-of-use tariff calculation under multi-step electricity price [J]. Electric Power Construction, 2016,37(3): 17-23.

[16] 黄海涛. 居民分时阶梯电价联合优化模型研究[J]. 电网技术,2012,36(10): 253-258.

HUANG Haitao. A joint optimization model of residential time-of-use block electricity rate [J]. Power System Technology, 2012,36(10): 253-258.

作者简介:



林启开

林启开(1991—),男,河南商丘人,硕士研究生,从事需求响应研究工作;

王珂(1980—),女,河南商丘人,研究员高级工程师,研究方向为智能电网互动运行控制、交直流电力系统的分析与控制;

余昆(1978—),男,江苏南京人,副教授,研究方向为地区电力经济运行、地区电网安全分析与控制;

王健(1992—),男,湖北襄阳人,硕士,从事需求响应研究。

Analysis on the Polymeric Response Characteristics of Residents Under the Peak and Valley Electricity Price

LIN Qikai¹, WANG Ke¹, YU Kun², WANG Jian²

(1. China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China; 2. Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: This paper analyses the residential load characteristics by questionnaire survey and the relevant literatures, and introduces the economic mechanism of consumers' response on electricity price. Then this paper studies the load growth rate at the point of price changed according to the historical data of a typical residential neighborhood in Nanjing, and analyses the polymerization characteristics of residential electricity. This paper analyses the load growth rate of many areas and introduces the peak-to-valley ratio. Last, this paper concludes the residential load characteristics and influential factors, and analyses the reasons and puts forward some suggestions.

Key words: peak and valley electricity Price; residential load characteristics; economic mechanism; relevance; load growth rate; peak-to-valley ratio

(编辑 徐林菊)

(上接第 70 页)

High Speed Acquisition and Recording System Design for Multi-channel Traveling Wave Based on FPGA

ZHAO Yucan, LI Yan, CHEN Yulin, LI Quanwei, SUN Hao
(NR Electric Co., Ltd, Nanjing 211102, China)

Abstract: A high-speed acquisition and recording system for multi-channel traveling wave based on FPGA is designed, which can implement high speed acquisition, continuous transient recording and long process recording of multi-channel traveling wave signal for centralized traveling wave distance measuring devices, utilizing FPGA dual ports RAM and off-chip high capacity DDR to construct distributed two-stage recording buffers, combined with DSP embedded processors. The hierarchical caching mechanism adopted by the system decouples the "high rate" of signal acquisition and the "large capacity" application requirement of data caching. It realizes the real-time high-speed data acquisition of multi-channel traveling wave and high data throughput required by continuous transient recording. And it also has a large capacity cache space for fault location algorithm off-line analysis and recording data dump, which meet the technical specification requirements related to traveling wave fault location for transmission lines of power industry.

Key words: high speed acquisition; multi-channel; distributed two-stage recording buffers; continuous transient recording

(编辑 徐林菊)