

# 面向智能电网的峰谷分时电价评估

程瑜, 翟娜娜

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 峰谷电价是我国发掘用户侧需求响应资源的主要措施, 对用户侧峰谷电价要进行及时评估, 优化调整峰谷电价政策, 但负荷率、峰谷差率等传统峰谷负荷特性指标难以全面、有效反映用户对分时电价响应程度。针对该问题, 对各类电力用户在峰谷电价调整前后峰谷特性的跟踪分析, 提出了一种电力用户峰谷电价响应评估方法。基于有功功率曲线结构法分析原理, 建立电量转移量化矩阵, 将用户峰谷电价调整前后各时段的电量结构变化情况纳入评估, 并基于电量转移量化矩阵提取出评估指标。应用实际表明, 该方法物理概念清晰、可操作性好。

**关键词:** 智能电网; 需求侧响应; 峰谷分时电价; 响应评估; 电量转移

## Evaluation of TOU price oriented to smart grid

CHENG Yu, ZHAI Na-na

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** TOU price is a main measure to dig out resources of demand response in customer side. It is very important for optimizing peak and valley price policy to evaluate TOU price in customer side timely. It is hard for some traditional load characteristic indexes to reflect customer's response extent of TOU price comprehensively and effectively just like load rate and peak-valley ratio. In accordance with the key problem, this paper puts forward an evaluation method for customer's response to TOU price based on tracking analysis of customer's load characteristic before and after the price adjustment. Quantization matrix of electric quantity transfer is built based on active power's curve structure method, the changes of electric quantity structure in different sessions before and after the TOU price adjustment are enrolled in the evaluation, and evaluation index is extracted by the matrix. Practical application shows that this method has a clear physical concept and a good maneuverability.

**Key words:** smart grid; demand response; time-of-use price; evaluation of response; electric quantity transfer

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0196-06

## 0 引言

智能电网的建设为电力用户需求响应提供了双向交互平台。智能电网与需求响应二者相互配合可以很大程度地促进全球电力行业的科学发展<sup>[1-3]</sup>, 激励用户越来越多地参与到电网的运行中。同时, 伴随大规模间歇性分布式电源的发展, 用户侧的需求响应机制已成为电网稳定运行必不可少的重要资源。因此, 对电力用户的需求响应行为分析成为智能电网中提高用户侧互动效率的基础研究。

作为我国需求响应项目的核心措施, 用户侧峰谷电价早在上世纪 80 年代试行, 并于 2003 年广泛推行于全国各省级电网<sup>[4]</sup>, 为削峰填谷, 缓解峰期

用电紧张局面, 提高用电负荷率, 保证电网安全经济运行, 提高电能的社会效益起到了一定的作用。但伴随峰谷电价的实施, 也积累了越来越多的矛盾, 集中体现在合理划分峰谷时段及确定各时段比价关系两个关键问题上。

这些矛盾归根到底是由于现行用户侧分时电价定价机制缺乏对用户响应进行动态、有效的跟踪调整。传统管理体制和技术条件下, 电力用户对峰谷电价的需求响应存在自然的时滞性, 导致对峰谷电价的响应评估缺乏足够的支撑, 没有得到足够的关注。因此, 伴随智能电网的发展, 亟需对现行的峰谷分时电价进行有效评估, 为更好地制定峰谷分时电价, 增强峰谷分时电价调节用户和电网双向互动的经济杠杆作用, 以全面、动态地整合用户侧资源, 并促进智能电网的发展。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(10MG09)

理论上, 依据电力用户用电需求的价格弹性关系, 能够有效、准确评估峰谷电价实施效果。国内外学者以电力用户用电需求价格弹性为基础背景数据, 开展了有关峰谷分时电价定价及其优化决策模型的研究<sup>[5-11]</sup>。文献[12-13]探讨了如何基于大量用户调查形成电力用户电量电价弹性矩阵以及进行用电需求曲线建模。然而, 结合目前我国用户侧需求响应项目实施处于初级阶段, 且长期以来反映电力用户用电需求响应的数据和调研积累不足的实际情况, 现阶段在我国采用建立电力需求价格弹性关系的方法对峰谷分时电价响应情况进行评估缺乏足够的支撑。文献[14-16]探讨了依据传统负荷特性指标对电力用户对峰谷电价调整的响应情况和电价执行效益进行了分析。

本文基于对各类电力用户峰谷分时电价调整后峰谷特性的跟踪分析, 提出一种基于分类用户典型用电负荷曲线峰谷响应特征分析的评估方法。并针对负荷率、峰谷差率等传统峰谷负荷特性指标评估分时电价存在的不足, 基于分类用户有功功率曲线分时结构特征提取有效、可获取的峰谷电价评估指标。

## 1 峰谷电价评估整体思路与实现方法

### 1.1 整体思路

随着电力用户对分时电价的响应, 全系统负荷曲线和各行业用电特性都会发生相应的变化。峰谷分时电价评估就是分析各行业用电需求对现行峰谷分时电价的响应程度, 为峰谷分时电价时段划分和比价关系的合理调整提供理论依据。

各类用户的峰谷分时电价基于各类用户的目录电价形成, 因此, 文中提出以分类用户为单元进行评估。针对某类用户峰谷分时电价评估的基本框架如图 1 所示。

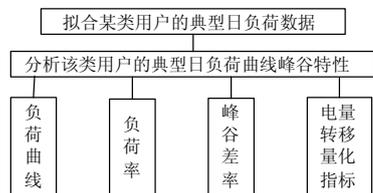


图 1 某类用户峰谷电价评估基本框架

Fig.1 Evaluation of TOU price frame diagram for some kind of user

1) 基于用户日负荷曲线拟合形成按电价分类的各类用户综合典型日负荷曲线;

2) 跟踪各类用户典型日负荷曲线峰谷分时电价调整前后典型日负荷峰谷特性变化情况, 主要包括: 通过图形定性比对典型日负荷曲线变化; 计算相关

负荷特性指标定量分析该类用户响应程度, 除传统的负荷率、峰谷差率指标, 文中提出一项新的电量转移量化指标。

### 1.2 方法描述

根据图 1 描述的整体思路, 文中基于对各类电力用户峰谷电价调整前后峰谷特性的跟踪分析, 建立基于分类用户典型用电负荷曲线峰谷响应特征分析的评估方法, 具体针对负荷率、峰谷差率等传统峰谷负荷特性指标评估分时电价存在的不足, 基于分类用户有功功率曲线分时结构特征提取有效、可获取的峰谷电价评估指标。

为了在评估过程中, 能够细化具体结合各个行业的生产经营特点, 从终端用户根源上分析每个时段峰谷负荷特性变化的内因和响应能力, 本文在分析某类用户的负荷特性变化时, 按照国民经济行业分类细分具体到该类用户的细分行业。设该类用户为第  $i$  类用户。

#### 1) 分类用户典型日负荷曲线拟合

由于实际中无法直接测量得到第  $i$  类用户综合汇总的负荷数据, 故选取该类用户的样本用户, 利用样本用户在各典型日的负荷数据进行分析评估。其中, 样本选择的原则是基本保持该类用户中各细分行业用电量的比重不变, 并保持同一行业中不同用电量用户的分布基本不变。典型日的选取原则是选择正常工作日, 跨度应包含峰谷电价调整的所有时间点。

若第  $i$  类用户下有  $M_i$  类细分行业 ( $j=1, \dots, M_i$ ), 第  $j$  类细分行业中选取样本用户数为  $K_{ij}$  ( $k=1, \dots, K_{ij}$ ), 样本用户典型日的 24 点负荷数据可以获取, 依据样本用户典型日负荷数据拟合该类用户典型日负荷数据。拟合思路为: 对第  $j$  类细分行业样本用户的某典型日负荷用该典型日的日用电量标么, 标么后的曲线以该类细分行业中选取的样本用户个数加权平均, 得到第  $i$  类用户第  $j$  类细分行业的拟合典型负荷数据。由第  $i$  类用户下各类细分行业的拟合典型负荷数据, 根据每类细分行业在第  $i$  类用户中所占的电量比重拟合合成第  $i$  类用户的典型负荷数据。具体拟合过程如下:

第  $i$  类用户第  $j$  类细分行业在  $t$  时刻的拟合典型负荷:

$$f_{ijt} = \frac{\tilde{f}_{ijt}}{K_{ij}}, \quad t=0, 1, \dots, 23 \quad (1)$$

$$\tilde{f}_{ijt} = \sum_{k=1}^{K_{ij}} \frac{f_{ijk t}}{Q_{ijk t}}$$

其中： $f_{ijt}$  为第  $i$  类用户第  $j$  类细分行业在  $t$  时刻的拟合典型负荷； $\tilde{f}_{ijt}$  为第  $i$  类用户第  $j$  类细分行业在  $t$  时刻的标么化后的负荷叠加数据； $f_{ijk}$  为第  $i$  类用户第  $j$  类细分行业第  $k$  个样本用户在  $t$  时刻的负荷； $Q_{ijk}$  为第  $i$  类用户第  $j$  类细分行业第  $k$  个样本用户某典型日的日用电量。

则第  $i$  类用户  $t$  时刻的拟合典型负荷：

$$f_{it} = \sum_{j=1}^M \lambda_j f_{ijt}, \quad t=0,1,\dots,23; \quad 0 < \lambda_j < 1 \quad (2)$$

其中： $f_{it}$  为第  $i$  类用户  $t$  时刻的拟合典型负荷； $\lambda_j$  为第  $i$  类用户第  $j$  类细分行业在该类用户中所占的电量比重； $M$  为第  $i$  类用户中细分行业的个数。

### 2) 电量转移量化指标的计算与分析

根据拟合所得的第  $i$  类用户典型日负荷数据，可计算出该类用户典型日的负荷率和峰谷差率。负荷率越大，峰谷差率越小说明峰谷分时电价执行效果较好。为了全面分析用户执行峰谷电价前后电量变化情况，本文定义电量转移量化系数以及电量转移量化矩阵。

设第  $i$  类用户所执行的峰谷电价共设有  $n$  个峰谷时段，

$$n = n_p + n_f + n_l \quad (3)$$

其中： $n_p$  为高峰时段的个数； $n_f$  为平时段的个数； $n_l$  为低谷时段的个数。

针对某时段  $t$ ，定义第  $i$  类用户第  $j$  类细分行业在  $t$  时段的电量转移量化系数  $\delta$ ：

$$\delta = \frac{\alpha_{jt}}{\alpha} \cdot \frac{\beta_{jt}}{\beta} \quad (4)$$

$$\alpha_{jt} = f_{ijt} / \sum_{j=1}^{M_i} f_{ijt} \quad (5)$$

$$\beta_{jt} = f_{ijt} / \sum_{t=1}^n f_{ijt} \quad (6)$$

$$\bar{\alpha} = \sum_{t=1}^n \alpha_{jt} / n \quad (7)$$

$$\bar{\beta} = \sum_{j=1}^{M_i} \beta_{jt} / M_i \quad (8)$$

其中： $\delta$  为第  $i$  类用户第  $j$  类细分行业在该时段的电量转移量化系数； $\alpha_{jt}$  为第  $i$  类用户第  $j$  类细分行业在第  $i$  类用户中所占的电量比重量化值； $\beta_{jt}$  为第  $i$  类用户第  $j$  类细分行业占自身的电量比重量化值； $\bar{\alpha}$  为第  $i$  类用户第  $j$  类细分行业  $n$  个时段电量比重

量化值的平均值； $\bar{\beta}$  为  $t$  时刻第  $i$  类用户所有细分行业在第  $i$  类用户中所占电量比重量化值的平均值。

定义  $\delta_{kj}$  ( $k=1,2,\dots,n; j=1,\dots,M_i$ ) 为第  $j$  类细分行业第  $k$  个时段电量转移量化系数。则，可定义第  $i$  类用户高峰时段电量转移量化矩阵  $\Delta_p$  如下：

$$\Delta_p = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1M_i} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2M_i} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{n_p,1} & \delta_{n_p,2} & \dots & \delta_{n_p,M_i} \end{pmatrix} \quad (9)$$

同理，可定义第  $i$  类用户平时段电量转移量化矩阵  $\Delta_f$  和低谷时段电量转移量化矩阵  $\Delta_l$  如下：

$$\Delta_f = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1M_i} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2M_i} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{n_f,1} & \delta_{n_f,2} & \dots & \delta_{n_f,M_i} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\Delta_l = \begin{pmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1M_i} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \dots & \delta_{2M_i} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \delta_{n_l,1} & \delta_{n_l,2} & \dots & \delta_{n_l,M_i} \end{pmatrix} \quad (11)$$

高峰时段的电量转移量化矩阵中的数值越小，说明高峰时段的电量比重越小，峰谷电价起到了一定削峰作用；低谷时段的电量转移量化矩阵中的数值越大，说明低谷时段的电量比重越小，峰谷电价起到了一定填谷作用；而对于平时段的电量转移量化矩阵的数值，本文经过实际统计验证，认为其值若是接近于 1，说明峰谷电价在一定程度上起到了缓和用户负荷曲线的作用。

结合电量转移量化矩阵评估第  $i$  类用户对峰谷分时电价的响应能力，将电量转移量矩阵变形，定义  $\Delta'_p$ 、 $\Delta'_f$  和  $\Delta'_l$  如下：

$$\Delta'_p = I_{n_p} - \Delta_p = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1M_j} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2M_j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{n_p,1} & m_{n_p,2} & \dots & m_{n_p,M_j} \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$\Delta'_f = |I_{n_f} - \Delta_f| = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1M_j} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2M_j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{n_f,1} & m_{n_f,2} & \dots & m_{n_f,M_j} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\Delta'_i = I_{n_i} - \Delta_i = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1M_j} \\ m_{21} & m_{22} & \cdots & m_{2M_j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m_{n_i1} & m_{n_i2} & \cdots & m_{n_iM_j} \end{pmatrix} \quad (14)$$

定义变量  $m_p$ ,  $m_p$  为  $m_{ij} \geq 0, m_{ij} \in \Delta'_i$  的个数; 同理, 定义变量  $m_l$ ,  $m_l$  为  $m_{ij} \leq 0, m_{ij} \in \Delta'_i$  的个数。若  $m_p$  越大, 则说明第  $i$  类用户在高峰时段的电量比重减小, 低谷时段的电量比重增大。进而说明第  $i$  类用户对峰谷分时电价有一定响应, 起到了削峰填谷的作用。同理,  $m_l$  亦然。

定义变量  $m_f$ ,  $m_f$  为  $m_{ij} \leq \sigma, m_{ij} \in \Delta'_i$  的个数。若  $m_f$  越大, 说明第  $i$  类用户对峰谷分时电价有一定的响应。根据实际统计数据验证,  $\sigma$  的取值范围一般在 0.05~0.07 之间, 保证  $m_{ij}$  在一定范围内尽可能地接近零。

为了定量说明行业对峰谷分时电价的响应能力, 提取电量转移量化指标  $\varepsilon$ , 该量化指标越大, 用户对峰谷分时电价的响应越大。定义  $\varepsilon$  如下:

$$\varepsilon = \frac{m_p + m_f + m_l}{nM_i} \quad (15)$$

同理, 可有高峰时段的电量转移量化指标  $\varepsilon_p$ 、平时段的电量转移量化指标  $\varepsilon_f$  以及低谷时段的电量转移量化指标  $\varepsilon_l$  如下:

$$\varepsilon_p = \frac{m_p}{n_p M_i} \quad (16)$$

$$\varepsilon_f = \frac{m_f}{n_f M_i} \quad (17)$$

$$\varepsilon_l = \frac{m_l}{n_l M_i} \quad (18)$$

## 2 应用实例分析

### 2.1 原始数据样本来源

为验证本文方法的有效性, 以某地区 A 的大工业用户和某地区 B 的普通工业用户为研究对象, 所选用户均已执行峰谷电价。选取样本用户时, 以负控系统给定的用户名为初始依据, 使所选样本用户覆盖到大工业和普通工业下属的主要细分行业。从负控系统选取上述用户 2008 年 5 月 28 日和 2009 年 5 月 28 日的 24 点日负荷数据作为原始数据样本。

### 2.2 两地区现行峰谷电价简介

A 地区和 B 地区的峰谷时段划分如表 1 和表 2 所示。

表 1 A 地区的峰谷时段划分

Tab.1 Peak and valley periods division in A area

时段	时间
平时段	6:00~8:00
	11:00~18:00
	21:00~22:00
高峰时段	8:00~11:00
	18:00~21:00
低谷时段	22:00~次日 6:00

表 2 B 地区的峰谷时段划分

Tab.2 Peak and valley periods division in B area

时段	时间
高峰时段	8:00~11:00
	13:00~19:00
	21:00~22:00
尖峰时段	19:00~21:00
低谷时段	11:00~13:00
	22:00~次日 8:00

2008 年 7 月伴随煤电联动销售电价调价, A 地区销售电价总水平比 2007 年提高 0.03 元/kWh, B 地区尖谷比、峰谷比略有提高。分析两地区的用户在调价前后负荷特性变化, 考察峰谷电价执行效果。

### 2.3 典型日负荷数据拟合与负荷特征计算结果

分别对选取的样本用户根据上文介绍的方法拟合 A 地区大工业和 B 地区普通工业的典型日 24 点负荷数据。典型日拟合负荷曲线如图 2 和图 3 所示。图中, 实线为峰谷电价调价前负荷曲线, 虚线为峰谷电价调价后负荷曲线。

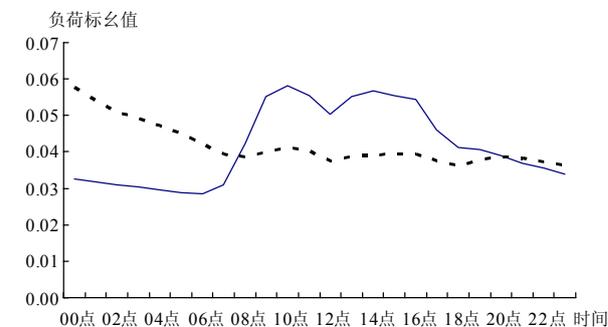


图 2 大工业样本用户典型日拟合负荷曲线

Fig.2 Fitting load curve of typical day for sample of large industry

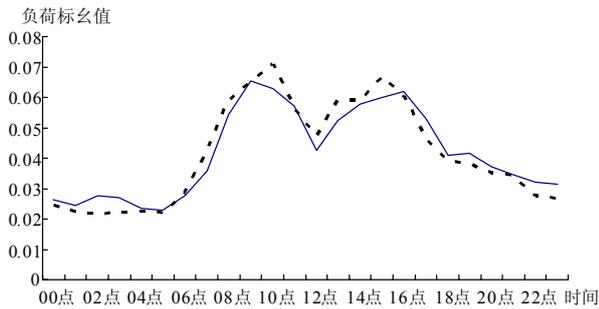


图3 普通工业样本用户典型日拟合负荷曲线

Fig.3 Fitting load curve of typical date for sample of general industry

根据典型日拟合负荷数据，计算典型日负荷率和峰谷差率如表3和表4所示。伴随2008年7月的调价，A地区大工业用户典型日的负荷率微增加大，峰谷差率大幅减小。而B地区普通工业用户典型日的负荷率微降，峰谷差率微增。

表3 A地区大工业典型日负荷率和峰谷差率

Tab.3 Load rate and peak-valley ratio of large industry in typical day

时间	负荷率	峰谷差率
2008年5月28日	0.718	51.08%
2009年5月28日	0.722	37.65%

表4 B地区普通工业典型日负荷率和峰谷差率

Tab.4 Load rate and peak-valley ratio of general industry in typical day

时间	负荷率	峰谷差率
2008年5月28日	0.636	64.98%
2009年5月28日	0.590	69.72%

下面计算两地区各时段电量转移量化矩阵。

(1) A地区

A地区大工业共有8类主要细分行业，则各时段的电量转移量化矩阵如下：

$$A_p = \begin{pmatrix} 1.04 & 0.90 & 0.99 & 1.04 & 1.04 & 1.09 & 1.00 & 0.96 \\ 1.06 & 0.92 & 0.85 & 1.03 & 1.12 & 0.97 & 1.12 & 1.02 \end{pmatrix}$$

$$A_f = \begin{pmatrix} 0.93 & 1.27 & 1.04 & 0.85 & 0.93 & 0.99 & 0.87 & 0.98 \\ 1.03 & 0.90 & 0.90 & 1.10 & 1.09 & 1.03 & 1.09 & 0.97 \\ 1.10 & 0.93 & 0.91 & 1.01 & 1.08 & 0.94 & 1.06 & 1.03 \end{pmatrix}$$

$$A_l = (0.92 \quad 1.09 \quad 1.19 \quad 0.96 \quad 0.86 \quad 0.97 \quad 0.91 \quad 1.03)$$

根据各时段的电量转移量化矩阵，计算 $m_p$ 、 $m_l$ 以及 $m_f$ 。本例在计算 $m_f$ 时，取 $\sigma$ 为0.06。得出 $m_p = 7$ ； $m_f = 10$ ； $m_l = 3$ 。电量转移量化指标 $\varepsilon \approx 0.417$ 。峰谷分时电价起到了一定削峰填谷的作用，这与通过负荷率和峰谷差率反映出来的结果是

一致的。其中： $\varepsilon_p \approx 0.438$ ； $\varepsilon_f \approx 0.417$ ； $\varepsilon_l \approx 0.375$ ，进一步说明了整体削峰作用较强，与从负荷曲线中反映出的情况一致。可看出，A地区电力用户积极参与电价的杠杆调节作用，该地区现行峰谷电价的执行效果较好。

(2) B地区

B地区普通工业用户共有6类主要细分行业。在计算B地区普通工业用户各时段的电量转移矩阵时，因该地区只有一个尖峰时段，故将其划入高峰时段一起计算。各时段的电量转移量化矩阵如下：

$$A_p = \begin{pmatrix} 1.50 & 0.79 & 1.56 & 0.63 & 0.94 & 0.97 \\ 1.26 & 0.88 & 1.39 & 0.70 & 1.12 & 0.93 \\ 0.74 & 0.85 & 0.39 & 1.92 & 1.21 & 0.93 \\ 1.19 & 0.85 & 0.50 & 1.23 & 1.67 & 0.82 \end{pmatrix}$$

$$A_l = \begin{pmatrix} 0.61 & 1.04 & 1.48 & 0.76 & 1.11 & 1.07 \\ 0.67 & 1.56 & 0.62 & 1.50 & 0.52 & 1.25 \end{pmatrix}$$

根据各时段的电量转移量化矩阵，计算 $m_p$ 和 $m_l$ 。得出 $m_p = 14$ ； $m_l = 7$ 。电量转移量化指标 $\varepsilon \approx 0.583$ 。其中， $\varepsilon_p \approx 0.583$ ， $\varepsilon_f \approx 0.583$ 。通过电量转移指标看，峰谷电价起到了一定削峰填谷的作用。根据表4，可以看出，仅通过负荷率和峰谷差率变化分析无法有效反映出B地区普通工业用户对峰谷分时电价的响应情况。依据图3可看出，一方面调价后负荷曲线的两个峰点均比调价前高，且最低负荷点比调价前低，导致负荷率和峰谷差率分别变小和变大；同时，早低谷中4:00-8:00、午低谷11:00-13:00负荷水平均提高，午高峰13:00-19:00、晚尖峰19:00-21:00以及晚高峰21:00-22:00负荷水平整体下降，说明峰谷电价起到了一定削峰填谷作用。综上所述，电量转移量化矩阵提取出的电量转移指标对该类用户峰谷分时电价响应程度的反映与依据图形定性比对分析吻合，验证了指标的有效性。

3 结语

通过评估峰谷电价在A地区和B地区的执行效果，调价前后：

1) A地区。无论从最直观的负荷曲线还是传统的负荷率和峰谷差率分析，都可得出峰谷电价在该地区执行效果较好。电量转移量化指标与之反映情况一致，从有功功率曲线结构法分析角度进一步证实了该结论。

2) B地区。负荷曲线变化较A地区不太明显，峰谷电价执行效果较难评估。负荷率和峰谷差率呈现出负荷率微减和峰谷差率微增的负向变化。然而，

依据电量转移量化指标能够分析出B地区呈现一定的高峰时段负荷消减和低谷时段负荷上升的正向变化。

可以看出, 负荷率和峰谷差率等传统峰谷负荷特性指标难以全面、有效反映用户对分时电价响应程度。将传统指标结合基于有功功率曲线结构法分析原理提取出的电量转移量化指标, 能够更有效、准确评估峰谷电价实施效果。

### 参考文献

- [1] Demand Response and Smart Grid Coalition. Accelerating the use of demand response and smart grid technologies is an essential part of the solution to America's energy, economic and environmental problems[EB/OL]. [2008-11-24]. [http://www.drsgcoalition.org/policy/DRSG\\_Policy\\_Recommendations\\_to\\_Accelerate\\_DR\\_and\\_Smart\\_Grid-2008-11-24.pdf](http://www.drsgcoalition.org/policy/DRSG_Policy_Recommendations_to_Accelerate_DR_and_Smart_Grid-2008-11-24.pdf).
- [2] The National Council on Electricity Policy. Demand response and smart metering policy actions since the Energy Policy Act of 2005: a summary for state officials [EB/OL]. [2008-12-08]. [http://www.demandresponsecommittee.org/Final\\_NCEP\\_Report\\_on\\_DR\\_and\\_SM\\_Policy\\_Action\\_08.12.pdf](http://www.demandresponsecommittee.org/Final_NCEP_Report_on_DR_and_SM_Policy_Action_08.12.pdf).
- [3] Federal Energy Regulatory Commission. FERC report marks significant progress in demand response, advanced metering [EB/OL]. [2008-12-29]. <http://www.ferc.gov/news/news-releases/2008/2008-4/12-29-08.pdf>.
- [4] 胡兆光, 陈铁成, 纪洪, 等. 在北京地区实施需求侧管理的效益分析[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(7): 22-25.  
HU Zhao-guang, CHEN Tie-cheng, JI Hong, et al. Benefits analysis on application of demand-side management(DSM)in Beijing[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(7): 22-25.
- [5] 唐捷, 胡秀珍, 任震, 等. 峰谷分时电价定价模型研究[J]. 电力需求侧管理, 2007, 3(9): 12-16.  
TANG Jie, HU Xiu-zhen, REN Zhen, et al. Research of peak-valley TOU pricing model[J]. Power Demand Side Management, 2007, 3(9): 12-16.
- [6] 吴秋伟, 汪蕾, 邹云. 基于DSM和MCP的分时电价的确定与分析[J]. 电力需求侧管理, 2003, 5(1): 24-29.  
WU Qiu-wei, WANG Lei, ZOU Yun. Determination and analysis of TOU power price based on DSM and MCP[J]. Power Demand Side Management, 2003, 5(1): 24-29.
- [7] 汤玉东, 王明飞, 吴军基, 等. 基于DSM的分时电价研究[J]. 电力需求侧管理, 2000(3): 14-16, 19.  
TANG Yu-dong, WANG Ming-fei, WU Jun-ji, et al. Research of TOU power price on DSM[J]. Power on DSM, 2000(3): 14-16, 19.
- [8] 汤玉东, 吴军基, 邹云. 基于DSM的分时电价的进一步研究[J]. 继电器, 2002, 30(3): 20-22.  
TANG Yu-dong, WU Jun-ji, ZOU Yun. Further research on the TOU rate based on DSM[J]. Relay, 2002, 30(3): 20-22.
- [9] 丁宁, 吴军基, 邹云. 基于DSM的峰谷时段划分及分时电价研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(17): 9-12.  
DING Ning, WU Jun-ji, ZOU Yun. Research of peak and valley time period partition approach and TOU price on DSM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(17): 9-12.
- [10] 黄健柏, 黄向宇, 邵留国, 等. 基于系统动力学的峰谷分时电价模型与仿真[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(11): 18-22.  
HUANG Jian-bai, HUANG Xiang-yu, SHAO Liu-guo, et al. Peak and valley time price model and simulation based on system dynamics part one model establishment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(11): 18-22.
- [11] 丁伟, 袁家海, 胡兆光. 基于用户电价响应和用户满意度的峰谷分时电价决策模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 25(20): 10-14.  
DING Wei, YUAN Jia-hai, HU Zhao-guang. Time-of-use price decision model considering user reaction and satisfaction index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 25(20): 10-14.
- [12] 秦祯芳, 岳顺民, 余贻鑫. 零售端电力市场中的电量电价弹性矩阵[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 16-19.  
QIN Zhen-fang, YUE Shun-min, YU Yi-xin. Price elasticity matrix of demand in current retail power market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 16-19.
- [13] 黄永皓, 康重庆, 李晖, 等. 用电需求曲线建模及其应用[J]. 电工电能新技术, 2004, 23(1): 29-33.  
HUANG Yong-hao, KANG Chong-qing, LI Hui, et al. The model of electricity demand curve and its applications[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2004, 23(1): 29-33.
- [14] 李杨, 王治华, 卢毅, 等. 峰谷分时电价的实施及大工业用户的响应[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(8): 45-48.  
LI Yang, WANG Zhi-hua, LU Yi, et al. The implementation of peak and valley time price for electricity and the response of large industries[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(8): 45-48.

(下转第214页 continued on page 214)

- GU He-rong, YANG Zi-long, WU Wei-yang. Research on hysteresis-band current tracking control of grid-connected inverter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (9) : 108-112.
- [5] 戴训江, 晁勤. 光伏并网逆变器自适应电流滞环跟踪控制的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (4) : 25-30.
- DAI Xun-jiang, CHAO Qin. Research of adaptive current hysteresis band track control for photovoltaic grid-connected inverter[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38 (4) : 25-30.
- [6] 许颇, 张崇巍, 张兴. 三相光伏并网逆变器控制及其反孤岛效应[J]. 合肥工业大学学报, 2006, 29 (9) : 1139-1143.
- XU Po, ZHANG Chong-wei, ZHANG Xing. Research on the whole control schemes and anti-islanding protection for the three-phase grid-connected photovoltaic inverter[J]. Journal of Hefei University of Technology, 2006, 29 (9) : 1139-1143.
- [7] Ropp M E, Begovic M, Rohatgi A. Analysis and performance assessment of the active frequency drift method of islanding prevention[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14 (3) : 810-816.
- [8] LIU Fu-rong, KANG Yong. Analysis and optimization of active frequency drift islanding detection method[C]. //Applied Power Electronics Conference. 2007 : 1379-1384.
- [9] Ropp M E, Begovic M, Rohatgi A. Determining the relative effectiveness of islanding detection methods using phase criteria and nondetection zones[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15 (2) : 290-296.
- [10] 刘芙蓉, 康勇. 主动移频式孤岛检测方法的参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (1) : 95-99.
- LIU Fu-rong, KANG Yong. Parameter optimization of active frequency drift islanding detection method[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (1) : 95-99.
- [11] 郑诗程, 丁明, 苏建徽, 等. 光伏发电系统及其孤岛效应的仿真与实验研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17 (12) : 3085-3088.
- ZHENG Shi-cheng, DING Ming, SU Jian-hui. Simulation and experiment research of photovoltaic generation system and its islanding[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17 (12) : 3085-3088.

---

收稿日期: 2010-04-20

作者简介:

李冬辉(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事计算机控制、电力电子应用、楼宇自动化等方面的研究; E-mail: lidonghui@tju.edu.cn

王鹤雄(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事计算机控制、光伏发电系统、楼宇自动化等方面的研究;

朱晓丹(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事计算机控制、电力电子应用方面的研究。

---

(上接第 201 页 continued from page 201)

- [15] 谭东. 广东省峰谷电价实施及大工业用户响应研究[J]. 湖北电力, 2003, 27 (5) : 55-57.
- TAN Dong. The implementation of peak and valley time price for electricity in Guangdong and the research of large industrial consumer response[J]. Hubei Electric Power, 2003, 27 (5) : 55-57.
- [16] 杨大雄, 陈雁. 上海市峰谷分时电价特性及效益分析[J]. 华东电力, 2005, 33 (11) : 20-23.
- YANG Da-xiong, CHEN Yan. Characteristics of

time-of-use electricity price of Shanghai and benefits achieved[J]. East China Electric Power, 2005, 33 (11) : 20-23.

---

收稿日期: 2010-04-20

作者简介:

程瑜(1978-), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为销售电价理论及方法, 电力经济分析;

翟娜娜(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力经济分析. E-mail: beibeina10@163.com

---

(上接第 207 页 continued from page 207)

- [11] Nicholas W M, William W P, Juan J S. Dynamic modeling of GE 1.5 and 3.6 wind turbine-generators [EB/OL]. (2003-10-27) [2010-3-15].  
http://www.easthavenwindfarm.com/filing/high/modeling.pdf.

黄崇鑫(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统控制; E-mail: huangchongxin@gmail.com

张凯锋(1977-), 男, 副研究员, 研究方向为电力系统控制;

戴先中(1954-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为非线性控制、电力系统控制。

---

收稿日期: 2010-04-09

作者简介: