

电力市场中的价格钉研究

李正欣^{1,2}, 赵林度¹

(1. 东南大学系统工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 江苏省国信集团, 江苏 南京 210005)

摘要: 电力市场中普遍存在价格钉现象。结合近年来的相关文献对价格钉进行了综述: 首先分析自由竞争的电力市场中电价的基本特点, 并从经济学角度分析价格钉产生的原因, 影响价格钉的供给与需求方面的主要因素, 然后重点对价格钉的预测方法和控制途径进行了评述, 对比了各种预测方法的优缺点及适用面, 以及各种可能的控制途径。文章最后探讨了今后的研究方向。

关键词: 价格钉; 电力市场; 预测模型; 控制; 电价

Study of price spikes in power market

LI Zheng-xin^{1,2}, ZHAO Lin-du¹

(1. Institute of System Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
2. Jiangsu Guoxin Investment Corporation Limited, Nanjing 210005, China)

Abstract: There are price spikes in most of electricity markets. This paper reviews the literature in recent years on price spike. First, it analyzes the character of electricity price in a competitive markets, and introduces why price spikes occurred and which demand and supply factors affected spikes from economical prospect, and then forecasting model and controlling way of price spike are compared, the merit/demerit of each kind of model, way and their applying situation are given. Finally, further works are presented.

Key words: price spike; power market; forecast model; control; electricity price

中图分类号: TM73; TP123.9

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2008)01-0052-05

0 引言

同证券市场中的股价一样, 在竞争性的电力市场中, 电价包含了市场的各种信息, 综合反映出各种市场因素的交互作用。分析并掌握电价的演化规律, 不仅有助于市场管理者制定有效的市场规则合理运营电力市场, 而且有助于市场参与者制定合适的交易策略获得最大的经济利润。

平衡的要求, 使得电力这种商品在很多方面不同于一般的商品, 其衍生金融产品也不同于一般的金融产品, 价格变化都呈现出一些独特的特点。根据已有文献的分析, 在电力市场环境下, 电价主要表现出随机波动性^[1]、周期性^[2]、均值回复^[3]、跳跃性^[4]与价格钉^[5]等特性^[8]。以澳大利亚昆士兰电力市场为例, 其2006年1~9月份的RRP (Regional Reference Price) 曲线如图1所示。

在竞争性环境下, 分析各个电力市场中的电价时间序列, 可以发现都或多或少地出现了价格钉 (price spike) 现象 (即价格突然、剧烈地波动, 从电价时间序列图形上看仿佛一根根长钉)^[5-11]。价格钉的存在对于电力市场存在正反两方面的影响: 价格的剧烈波动对社会、对市场的各方将产生不良影响, 甚至引发电力供应危机, 如2000年加州市场的情形; 但另一方面, 如果发电公司能够在现货市场上以奇高的价格售出电量, 那么价格钉则是一个获利的机会, 对于电力系统则能够起到拉动投资, 尤其是促进调峰机组的投资。研究价格钉的产

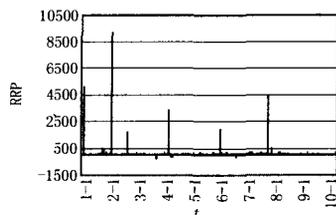


图1 昆士兰电力市场RRP曲线
(2006.1.1-2006.9.30)

Fig. 1 RRP of Queensland electricity market from January to September 2006

由于电力不可经济储存的特性及其在瞬间供需

生原因、控制并减少价格钉所带来的危害对于电力市场的健康发展具有十分重要的意义。

目前国内对于电价价格钉的研究还比较少, 国外的文献对于价格钉的研究主要是从价格钉产生的经济学分析、以及如何从电力市场的结构、体系设计方面减少、控制价格钉的产生等方面进行研究^[9]。此外, 在研究电价的预测的部分文献中对价格钉的预测进行了研究。本文将从电价价格钉的经济学分析及判别标准着手, 评述价格钉的预测模型, 以及价格钉的控制途径, 并对未来的研究方向进行展望, 最后对全文进行总结。

1 价格钉的经济学分析及判别标准

1.1 价格钉的成因

在理想的完全竞争的市场中, 只有当需求大于供给的情形下, 才有可能产生价格钉。但由于电力这种商品的特殊性, 造成价格钉不仅在供不应求的时候出现, 而且在供求平衡、甚至在供过于求的时候也有所发生, 并且在多个电力市场中出现电价为负值的价格钉状况。为分析价格钉的产生原因, 先分析电力的供给与需求特性, 再分析其供求关系。

从需求方面看, 电力的需求存在两方面的缺陷^[11]: 一方面, 与其他商品相比, 电力的需求在短期内明显缺乏弹性; 另一方面, 电力的需求又因为气候影响等因素呈现出较大的波动性。

从供给方面看, 一方面, 发电是典型的资金密集型产业, 在系统备用容量不足甚至为零时, 由于建设新的机组、增加装机容量通常需要2~3年, 甚至更长的时间, 电力供给在短期内同样缺乏弹性; 另一方面, 由于电力不能经济储存, 需要在瞬间实现供给与需求的平衡, 使得机组的停运直接影响系统的供给并进而影响系统的均衡能力。

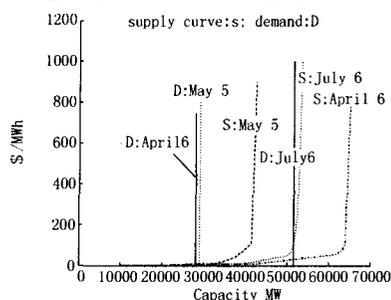


图2 美国PJM电力市场1999年供给需求曲线

Fig. 2 Supply and demand curves for PJM in 1999

因电力在供给与需求方面的独有特性, 造成电力的需求曲线为一近似垂直于横轴的直线, 供给曲线呈现为曲棍球杆状, 如图2所示^[12]。当供给曲线

平行移动后, 其与需求曲线的交点可能会位于价格高点, 即价格钉的出现成为可能。供给曲线的移动原因, 既可能是由于市场的机组强迫停运、电网线路故障等原因, 亦可能是由于市场中具有较大市场力的供应商为获得超额垄断利润而持留电量, 改变竞标曲线所造成^[13]。

除上述特性外, 对绝大部分类型的发电机组, 都存在较高的启动成本, 因此, 在系统负荷波动期

表1 价格钉的主要影响因素^[9]

Tab.1 Factors related to price spikes

供给方面因素	
装机容量	当需求等于或超过装机容量时价格钉将可能出现。最可能出现高电价价格钉的情况是装机容量达不到预测负荷基础上的目标备用水平, 而最可能出现低(负)电价价格钉的情况则是装机容量远大于预测负荷
停运	即使备用容量达到目标水平, 发电机组的非计划停运也可能导致容量不足
发电机组种类构成	市场上各种燃料和技术的发电机组构成将影响发电的边际成本, 而市场上机组的构成状况将决定需要从多大程度以价格钉来弥补长期边际成本。另外, 若市场被一个或几个发电商所垄断, 存在较大市场力时, 更易产生价格钉
传输限制	若电网存在传输瓶颈, 则尽管市场从总体上有充足的备用容量, 也可能在某些地区引发价格钉
需求方面因素	
负荷持续时间	负荷持续曲线将影响发电机组的选择以及发电边际成本
天气敏感性	在一个系统中, 若空调消耗负荷占系统总负荷的比例很大, 则系统需求不可避免地因气候原因出现较大幅度波动
经济活动	当地的重大经济活动将引起负荷曲线的短期波动
零售价格	零售电价将影响电力的需求。如果零售电价因批发价格价格钉而上涨, 那么最终用户将减少用电, 从而减轻引起价格钉的需要压力
市场组织及设计方面因素	
零售电价限额	零售电价限额虽然阻止了零售价的上涨, 但也同时阻止了其抑制需求的功能, 从而促进了批发价的价格钉出现
现货交易比例	如果发电商能够在非现货市场获得部分的收入, 则其从现货市场获得足够收入以补偿其成本的压力要比只有现货市场要小得多
容量要求	有些市场要求用户购买一定量的容量权以能满足其用电负荷及备用负荷, 这样, 系统的装机容量得到了有效保障, 系统可靠性水平也提高了一个档次, 价格钉发生率明显下降, 但这些多余容量的成本被转移给用户, 长期的平均电价随之上升
批发价限额	市场强行设定批发价的限额可以立即阻止价格钉的发生, 但却对系统的可靠性有负面影响, 并且增加了在限额内的价格钉发生频次

间,为了减少机组起停的损失,一些发电厂宁愿以低于发电变动成本,甚至为负数的电价维持机组的运转,以便在系统负荷提高时,能够获得盈利机会。

1.2 价格钉的影响因素

除了供给及需求方面的决定因素外,电力市场的结构、组织以及监管等因素也影响着价格钉的产生及其幅值大小。影响价格钉的主要因素见表1。

1.3 价格钉的判别

电价时间序列中存在着一些异常值,这些与众不同的数据,有的产生于随机偏差,有的则产生于完全不同的机制,形成了价格钉。对于价格钉,通常远高于价格平均值,也可能很低甚至为负数。对于价格钉的判别标准,文献[15]总结出四种不同的方法:

(1) 基于历史数据的异常价格统计方法,即把价格处于 $[\mu - 2\sigma, \mu + 2\sigma]$ 以外的异常值作为价格钉,其中 μ 为电价的均值, σ 为电价的标准差。

(2) 基于经验的方法,即设定一价格阈值 P_t ,将所有大于此值的电价视为价格钉。

(3) 基于价格变化量的方法,即若当前价格与前一时间点价格的变化量 ΔP ($\Delta P = P(t) - P(t-1)$)大于正常变化量的最大值时,认定当前电价为价格钉。

(4) 所有数值为负数的价格视为价格钉。

2 价格钉的预测与控制

2.1 价格钉的预测模型

对价格钉的预测,目前的模型主要有以下几种:

(1) 跳跃-扩散模型

文献[16]建立了一个带有跳跃因子的均值回复模型,突出体现了电价的均值回复特性,并实现了对价格钉的模拟。尽管这类模型突出体现了价格的均值回复特性,但却不能体现价格波动的随机性特征,对价格钉的预测精度较低。

(2) 区间选择模型

Deng于1998年最早提出抓住电价价格钉特性的几个区间-选择模型^[17],2003年Huisman和Mahieu假定每一时刻电价必处于三个不同区间之一,并且假定价格从一个区间到另一个区间的转移满足常数的马尔柯夫转移概率^[18]。Kholodnyi(2005)建立电价的非马尔柯夫模型,将电价分解为含价格钉过程与不含价格钉的过程两个部分,而含价格钉的过程假定为一两状态的马尔柯夫过程^[19]。Mount等(2006)建立了时变参数的区间-选择价格钉预测模

型^[12]。此类模型的重点与难点在于确定转移概率的影响因素及概率值。

(3) 数据挖掘模型

文献[15]基于数据挖掘技术,分三个步骤实现对价格钉的预测:首先预测某一时点价格钉发生的可能性,然后预测价格钉的大致范围,最后再预测价格钉的数值。使用数据挖掘方法对于价格钉发生可能性的预测效果较差,因为价格钉的发生伴随复杂的随机因素。作为改进,文献[15]定义了价格钉的存在指数,以判断某一时点的价格是否为价格钉,是则指数值为1,否则为0。由于价格钉发生的聚集性特征,引入存在指数,对于指数值为1的后续时点发生价格钉的概率较之指数值为0的后续点分别处理,以此提高价格钉是否发生的预测精度。

(4) 结构化模型。

Kanamura在文献[20, 21]中假定电力的供给曲线是两条不同斜率的直线通过二次曲线进行连接,形成曲棍球杆形状,并且当供给处于斜率较小的平缓段直线时电价处于无价格钉的区间,而供给落在二次曲线或斜率较大的陡峭段时电价处理价格钉区间。假定需求与历年均值的变化量是一Ornstein Uhlenbeck过程,即需求受气温的影响偏离均值,但却有回复至均值的趋势,在此基础上得出供给与需求相均衡的电价模型。供给在这两个区间之间的转移概率是当前需求水平、确定性的需求变化趋势、以及偏离长期均值回复趋势的函数。该类模型以函数描述电力市场的供给与需求,以此为基础得到价格钉的预测值,虽然思路清晰并能得到价格的解析式,但由于电力市场的复杂性,市场的实际供给与需求和给出的函数值有较大差距,因而模型对价格钉的预测值也不宜用于实际的市场交易中,而更适合于制度的设计与分析。

2.2 价格钉的控制途径

电力行业放松管制的改革一方面在引入了竞争机制,避免了过去垂直一体化管理体制下的诸多问题,提高了效率并降低了成本,但同时也产生了价格钉现象,成为电力市场的一个潜在威胁。因此要使得电力体制改革能够产生积极影响,必须采取有效措施来解决大量存在的价格钉问题。目前控制价格钉的途径主要包括价格上限、期货合约、容量认购、电网加强、以及需求管理等。

作为电力市场的监管部门,对于电价巨幅变动的直接想法就是对价格设定上限。文献[9, 11]价格上限只会扭曲市场的调节作用,有时甚至会使情况更为恶化。从长期来看,批发价格上限不仅不能降低市场的平均价格,而且由于对新装机容量投资的抑

制作用, 还会削弱供给的可靠性。零售价格上限阻碍了市场通过价格手段对于负荷需求的调节作用, 也无助于甚至是有害于价格钉的控制。但文献[22]通过建立考虑价格上限的博弈模型, 并基于Kuhn-Tucker向量优化理论寻找纳什均衡, 得出在合适价格上限的情况下, 市场力能够被降低, 从而使得价格钉得到控制。

价格钉与高价通常都是伴随着强大的市场力而产生, 文献[11]中Stoft认为降低市场力最佳的期货合约是长期期货合约。Young等运用博弈理论论证了虽然在一般情况下长期合约能够减轻现货市场中市场力的影响, 并因此而减少价格钉的发生, 但当传输能力限制电力的交易时, 长期合约将导致发电商施行市场力, 并将导致社会福利期望下降^[23]。Hyungna与Mount为了验证期货合约是否能够减少市场力, 从而稳定现货合约, 选用四个计算机智能代理以及两个学生团队来模拟发电公司的报价行为。作者对无期货合约、永久性期货合约(即期货价格固定)以及可修订期货合约(即当前现货价格可影响未来的期货价格)三种情形分别进行了模拟, 并且得出了如下结论: 若存在永久性期货合约, 高现货价将被抑制; 如果可修订期货合约的可修订期足够长而使得当前现货价对未来期货合约价不能产生影响时, 也将产生相同的后果。因此作者认为应加大永久性期货合约的比重, 以有效降低高现货价^[24]。

在电力行业放松管制的改革前, 作为公用事业的电力企业有保证电力稳定供应的义务, 电力系统的装机容量由其统一规划并进行投资决策, 但改革后, 没有一家企业承担此项义务, 每个企业根据自己对于未来电力市场的发展趋势判断决定自己的投资决策。由于改革后的电力市场并没有形成完全竞争市场, 而更接近于寡头垄断, 加之电力行业的固有特征, 如建设周期长、投资大、需求受气候等因素波动性大等原因, 以及价格上限等因素, 造成市场对新机组的投资不足, 成为多个市场价格钉产生, 甚至电力危机产生的重要原因。为解决市场化后装机容量不足的问题, 目前多个市场都作出了容量认购或容量付费的要求^[25]。由于容量认购或容量付费将会诱发市场对新增容量的投资, 虽然能够提高系统的稳定性, 但维持高稳定性的成本将会使得市场平均电价同时上涨, 这与电力市场化改革的初衷背道而驰^[26]。文献[27~30]等研究如何设计容量认购或容量付费的政策, 以使得市场对容量的需求与供给达到较为合理的均衡水平。

电网传输瓶颈是造成价格钉^[31]和电力危机产

生的另一个重要原因^[8,11]。因此, 加强电网建设, 减少拥塞的发生, 从物理上加强电网内部的合作与交流, 可以有效降低价格钉的发生频率。

文福拴^[32]等在分析加州电力市场2001年失败教训时, 认为冻结用户电价是引起加州电力危机的主要原因。如果将用户对电力价格弹性完全与电力市场相隔离, 那么市场将无法通过经济手段对电力的最终需求进行调节, 造成了电力市场价格钉^[31]以及电力危机的产生。Rassenti等在文献[33]中报道通过在需求侧引入竞价机制, 能够规范发电商的行为, 降低市场力, 从而减少甚至消除价格钉的发生。

3 未来研究展望

对于电价价格钉的研究, 未来仍将集中于两个方面: 一方面是对价格钉的发生和幅值的预测方法, 另一方面则是对价格钉控制途径的研究。由于影响价格钉的因素众多, 价格钉发生的频次低, 因此预测难度大, 尤其是对于价格钉何时发生的预测。对于某一时点是否会出现价格钉的预测很难取得令人信服的结果, 因此预计未来的研究需要对价格钉发生的概率及价格钉幅值变化范围进行具有一定置信度的研究。对价格钉的控制研究, 则将结合电力市场体系结构、制度设计等方面进行, 着重将研究如何利用市场化的手段, 尤其是金融衍生工具减少价格钉的发生及其对市场的影响。

4 结语

本文对电力市场环境有关价格钉现象进行了较为全面的综述, 对其产生机制、影响因素、判别标准、预测方法及控制途径等方面文献作出了较为详细的归纳, 并对未来的研究方向进行了探索。对价格钉的产生、预测和控制的研究对于电价预测、制订竞价策略、市场规则制定以及对交易监管等方面都将具有非常明显的现实指导作用。

参考文献

- [1] Knittel C R, Roberts M R. An Empirical Examination of Restructured Electricity Prices[J]. *Energy Economics*, 2005, 27:791-817.
- [2] Werona R, Bierbrauer M, Trück S. Modeling Electricity Prices: Jump Diffusion and Regime Switching[J]. *Physica A*, 2004, 336:39-48.
- [3] Simonsen I. Measuring Anti-correlations in the Nordic Electricity Spot Market by Wavelets[J]. *Physica A*, 2003, 322: 597-606.
- [4] Deng S J, Johnson B, Sogomonian A. Exotic Electricity Options and the Valuation of Electricity Generation and

- Transmission Assets[J]. *Decision Support Systems*, 2001, 30(3):383-392.
- [5] LU Xin, DONG Zhao-yang, LI Xue. Electricity Market Price Spike Forecast with Data Mining Techniques[J]. *Electric Power Systems Research*, 2005, 73(1):19-29.
- [6] Woo Chi-Keung, Lloyd Debra, Tishler Asher. Electricity Market Reform Failures: UK, Norway, Alberta and California[J]. *Energy Policy*, 2003, 31(11):1103-1115.
- [7] Rose Judah L. Why the June Price Spike was not a Fluke [J]. *Electricity Journal*, 1998, 11(9): 65-70.
- [8] 张显, 王锡凡. 短期电价预测综述[J]. *电力系统自动化*, 2006, 30(3):92-101.
ZHANG Xian, WANG Xi-fan. Review of the Short-term Electricity Price Forecasting[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2006, 30(3):92-101.
- [9] 陈思杰, 周浩. 电力市场电价预测方法综述[J]. *继电器*, 2006, 34(11):54-60.
CHEN Si-jie, ZHOU Hao. Electricity Price Forecast Methods of Electricity Market [J]. *Relay*, 2006, 34(11):54-60.
- [10] Hughes William R, Parece Andrew. The Economics of Price Spikes in Deregulated Power Markets[J]. *The Electricity Journal*, 2002, 15(6):31-44.
- [11] Stoft Steven. *Power System Economics* [M]. IEEE / Wiley, 2002.
- [12] Timothy M D, NING Yu-me, CAI Xiao-bin. Predicting Price Spikes in Electricity Markets Using a Regime-switching Model with Time-varying Parameters[J]. *Energy Economics*, 2006, 28(1):62-80.
- [13] 刘亚安, 管晓宏, 等. 电力市场电价飞升机理分析[J]. *中国电力*, 2001, 34(8):4-7.
LIU Ya-an, GUAN Xiao-hong, et al. Mechanism of Price Spiking in Electric Power Market[J]. *Electric Power*, 2001, 34(8):4-7.
- [14] GUAN Xiao-hong, HO Yu-Chi, Pepyne D L. Gaming and Price Spikes in Electric Power Markets[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2001, 16(3): 402-408.
- [15] ZHAO Jun-hua, DONG Zhao-yang, et al. A General Method for Electricity Market Price Spike Analysis[A]. In: *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*[C]. 2005.286-293.
- [16] Johnson, Barz. *Selecting Stochastic Processes for Modeling Electricity Prices*[M]. London: Risk Publications, 1999.
- [17] Deng S. *Stochastic Models of Energy Commodity Prices and Their Applications: Mean Reversion with Jumps and Spikes*[M]. 1998. PSERC. 98-128.
- [18] Ronald H, Ronald M. Regime Jumps in Electricity Prices [J]. *Energy Economics*, 2003, 25(5): 425-434.
- [19] Valery K A. Modeling Power Forward Prices for Power with Spikes: a Non-Markovian Approach[J]. *Nonlinear Analysis*, 2005, 63(5-7):958-965.
- [20] Kanamura T, Ohashi K. A Structural Model for Electricity Prices with Spikes: Measurement of Jump Risk and Optimal Policies for Hydropower Plant Operation[Z]. Hitotsubashi University Working Paper, 2004.
- [21] Kanamura T, Ohashi K. On Transition Probabilities of Regime Switching in Electricity Prices[D]. Hitotsubashi University, 2004.
- [22] YU Zu-wei. A Market Power Model with Price Caps and Compact DC Power Flow Constraints[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2003, 25(4):301-307.
- [23] Nam Y W, et al. Effects of Long-term Contracts on Firms Exercising Market Power in Transmission Constrained Electricity Markets[J]. *Electric Power Systems Research*, 2006, 76(6-7):435-444.
- [24] Oh H, Tim M. Testing the Effects of Holding Forward Contracts on the Behavior of Suppliers in an Electricity Auction [A]. In: *Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'05) - Track 2*, 2005.
- [25] Wen F S, Wu Felix F, Ni Y X. Generation Capacity Adequacy in the Competitive Electricity Market Environment [J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2004, 26(5):365-372.
- [26] Tim M, Hyungna O H. On the First Price Spike in Summer[A]. In: *Proceedings of the 37th Hawaii International Conference on System Sciences*[C]. 2004.
- [27] Andrew F. Cycles in Competitive Electricity Markets: a Simulation Study of the Western United States[J]. *Energy Policy*, 1999, 27(11): 637-658.
- [28] Brennan Timothy J. Electricity Capacity Requirements: Who Pays?[J]. *The Electricity Journal*, 2003, 16(8): 11-22.
- [29] Krapels Edward, Flemming Paul, Conant Stephen. The Design and Effectiveness of Electricity Capacity Market Rules in the Northeast and California[J]. *The Electricity Journal*, 2004, 17(8): 27-32.
- [30] 文福拴, 吴复立, 倪以信. 电力市场环境下的发电容量充裕性问题[J]. *电力系统自动化*, 2002, 26(19):16-22.
WEN Fu-shuan, Wu Fu-li, Ni Yi-xin. Generation Capacity Adequacy in the Deregulated Electricity Market Environment [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(19):16-22.
- [31] Michaels Robert J, Ellig Jerry. Electricity: Price Spikes by Design [J]. *Regulation*, 22(2):20-22.

(下转第 62 页 continued on page 62)

法大,特别是随着电网频率波动的增大,误差会被放大到5%左右。因此准同步法的实际应用需满足三个条件:(1)估算的谐波参数次数不高;(2)频率波动不是很大;(3)精度要求不高。

加窗插值FFT法的优点是精度能控制在0.5%以内,至少比准同步法高一个数量级,并且误差随电网频率的波动变化不大^[9]。基于海宁窗的插值法在精度上不如布莱克曼窗。但是从第3节的分析中可以看到,海宁窗算法实现要比布莱克曼窗简单,它更加容易在数字信号处理芯片上实现。在实际谐波监测系统中,要考虑谐波监测系统设计的成本和可实现性。若不要求特别高的精度,应该优先选用基于汉宁窗的插值FFT算法,其完全能满足一般的精度和稳定性要求。布莱克曼窗适合在谐波参数精度要求很高或者频率波动剧烈的场合使用。

参考文献

- [1] 王兆安,杨君,刘进军.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,1998.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonic Exclusion and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [2] 肖湘宁,徐永梅.电力系统谐波及其综合治理[J].中国电力,1998,31(4):59-61.
XIAO Xiang-ning, XU Yong-mei. Problems and Comprehensive Control of Power System Harmonics[J]. Electric Power, 1998,31(4):59-61.
- [3] Santamaria-Caballero I, Pantaleon-Prieto C J, Ibanez-Diaz J, et al. Improved Procedures for Estimating Amplitudes and Phases of Harmonics with Application Analysis[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(1):209-214.
- [4] 潘文,钱俞淘,周鄂.基于加窗插值FFT的电力谐波测量理论(I)窗函数研究[J].电工技术学报,1994,8(1):50-54.
PAN Wen, QIAN Yu-tao, ZHOU E. Power Harmonics Measurement Based on Windows and Interpolated FFT (I) Dual Interpolated FFT Algorithms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1994, 9(1): 50-54.

- [5] 潘文,钱俞寿,周鄂.基于加窗差值FFT的电力谐波测量理论(II)双插值FFT理论[J].电工技术学报,1994,9(2):53-56.
PAN Wen, QIAN Yu-shou, ZHOU He. Power Harmonics Measurement Based on Windows and Interpolated FFT (II) Dual Interpolated FFT Algorithms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1994, 9(2): 53-56.
- [6] 赵文春,马伟明,胡安.电机测试中谐波分析的高精度FFT算法[J].中国电机工程学报,2001,21(12):83-87.
ZHAO Wen-chun, MA Wei-ming, HU An. FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in the Electric Machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 83-87.
- [7] 庞浩,李东霞,俎云霄.应用FFT进行电力系统谐波分析的改进算法[J].中国电机工程学报,2003,23(6):50-54.
PANG Hao, LI Dong-xia, ZU Yun-xiao et al. An Improved Algorithm for Harmonic Analysis of Power System Using FFT Technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6):50-54.
- [8] 戴先中.准同步采样及其在非正弦功率测量中的应用[J].仪器仪表学报,1984,5(4):390-396.
DAI Xian-zhong. The Quasi-synchronous Sampling and Its Application in the Measurement of Nonsinusoidal Power[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1984, 5(4): 390-396.
- [9] 张伏生,耿中行,葛耀中.电力系统谐波分析的高精度FFT算法[J].中国电机工程学报,1999,19(3):63-66.
ZHANG Fu-sheng, GENG Zhong-xing, GE Yao-zhong. FFT Algorithm with High Accuracy for Harmonic Analysis in Power System[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63-66.

收稿日期:2007-03-26; 修回日期:2007-05-18

作者简介:

邱海锋(1983-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统电能质量分析和测量;E-mail: qiuhaifeng@126.com

周浩(1963-),男,副教授,主要研究方向为电力系统过电压分析测量及电力系统自动化。

(上接第56页 continued from page 56)

National Academy of Science, 2003, 100(5):2998-3003.

- [32] 文福拴, Davial A K. 加州电力市场失败的教训[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(5):1-5.
WEN Fu-shuan, Davial A K. Lessons from Electricity Market Failure in California[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(5):1-5.
- [33] Rassenti Stephen J, Smith Vernon L, Wilson Bart J. Controlling Market Power and Price Spikes in Electricity Networks: Demand-side Bidding[J]. Proceedings of the

收稿日期:2007-04-11; 修回日期:2007-09-20

作者简介:

李正欣(1973-),男,博士生,从事电力市场与电价预测研究;E-mail:lizhengxin@jsgx.net

赵林度(1965-),男,教授,博士生导师,从事复杂系统分析与决策研究。