

电力市场电价预测方法综述

陈思杰, 周浩

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 电价是反映电力市场运营状况, 评价市场竞争效率的核心指标, 是电力市场决策的基础。阐述了电力市场电价预测问题的特点、内容和方法, 分析和比较了短期预测和中长期预测的各种方法, 指出了各种方法的优缺点, 提出了一些提高预测精度的改进措施, 并对电价预测中的一些关键问题进行了分析探讨。

关键词: 电力市场; 电价预测; 神经网络; 小波分析; 遗传算法; 模糊推理

中图分类号: TM73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)11-0054-07

0 引言

随着全球电力市场化的不断发展, 电价在电力市场中的核心地位受到人们越来越多的重视, 近年来人们开始对电价进行了比较深入的研究, 提出了不少电价预测方法。电价预测就是指: 在考虑市场供求关系, 市场参与者的市场力, 电力成本, 以及电力市场体制结构、社会经济形势等重要因素影响的条件下, 通过利用数学工具对历史数据进行分析和研究, 探索事物之间的内在联系和发展变化规律, 在满足一定精度和速度的情况下, 对未来电力市场中的电力交易价格进行预测。

本文首先介绍了电价预测的特点和分类, 然后分析和比较了短期预测和中长期预测的各种方法, 指出了各种方法的优缺点, 提出了一些提高预测精度的改进措施, 最后对电价预测中的一些关键问题进行了分析探讨。

1 电价预测的特点和分类

电价预测除具有与负荷预测一样的周期性特点外, 还具有自身的特殊性: 它不具备总体上的增长和上升趋势, 而是处于不断的波动变化之中^[1,2]。一般来说, 电价的波动除受燃料价格, 竞价机组可用容量, 水力发电量, 用电需求弹性, 输电阻塞等电力系统特有约束的影响外, 还受到电力市场体制结构、社会经济形势, 发电商实施市场力等主客观因素影响。因此, 电价预测相对负荷预测难度要大, 一些用于电力负荷预测的方法也就无法用来进行有效的电价预测, 如用点对点倍比法、一元线性回归法进行电价预测的结果往往都是不准确的^[3]。

根据预测点的类型, 将电价预测分为系统边际电价或者市场统一出清电价预测、区域边际电价预

测、节点边际电价预测。通常情况下, 我们所说的电价预测都是对系统的统一出清电价的预测, 在系统不发生阻塞的情况下, 各个地区的区域出清电价和系统统一出清电价是相同的。

根据预测内容的不同, 可以分为确定性预测和电价空间分布预测, 前者是当前讨论比较多的热点, 主要针对短期电价预测, 预测的结果就是给出一个确定的电价预测数值, 后者主要基于概率论与数理统计知识, 确定预测结果的可能波动范围及其一段时期内的电价均值, 主要是针对中长期电价预测, 目前国内外在这方面研究得还比较少。

根据预测机理的不同, 将电价预测分为短期预测和中长期预测。由于电价波动大的特点, 具体分为小时预测、日预测、月度、季度预测。针对周末边际电价的特殊性, 文献[4]还将周末边际电价进行单独预测。

电价预测是电力市场化以后新出现的研究方向。研究尚不够充分, 目前还没有一种通用的预测方法能较好地适合于所有的电力市场, 因此有必要充分地利用各个电力市场本身的特点进一步展开研究, 从而提高预测精度。下文将根据电价预测机理的不同, 分别针对短期电价预测和中长期电价预测进行深入的分析。

2 短期电价预测

短期电价预测是电价预测的重要组成部分, 它主要用于预测未来几小时、1天至几天的电价。准确的短期电价预测将有助于发电商最优报价策略的选择, 从而最大化其利润, 使购电方的动态成本控制成为可能, 同时也为监管部门的实时监管提供了重要的科学依据, 保证电力市场的正常运行。目前, 短期电价预测主要有四种方法: 1. 时间序列法, 2. 神经

网络(ANN)预测法,3.基于小波理论的预测方法,4.组合预测方法等。

2.1 时间序列预测法^[5,6]

时间序列模型分为自回归(AR)模型、动平均(MA)模型、ARMA模型、累积式自回归—动平均(ARMA)模型,已被广泛应用于短期负荷预测中,考虑到各时段系统边际电价本身就构成一个等间距的随机时间序列,因此有不少学者尝试将时间序列模型应用于短期电价预测,当前比较常用的主要是ARMA模型^[7,8]和ARMA模型^[9,10]。

ARMA是一种典型的时间序列预测模型。它是AR模型和MA模型的结合,即序列当前值 y_t 是现在和过去的误差($a_t, a_{t-1}, \dots, a_{t-q}$)以及先前的序列值($y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-p}$)的线性组合,其数学表达式为:

$$y_t = \alpha_1 y_{t-1} + \alpha_2 y_{t-2} + \dots + \alpha_p y_{t-p} + a_t - \beta_1 a_{t-1} - \dots - \beta_q a_{t-q} \quad (1)$$

其中: p, q 分别表示自回归与滑动平均的阶数, $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p$ 和 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_q$ 分别称为自回归和滑动平均系数。

传统ARMA模型预测方法仅仅从序列自身来探索电价发展规律,未充分考虑市场因素对电价的影响,因此存在一定的局限性,预测效果往往不理想,可以考虑引入外生回归变量^[3],以改进传统时间序列方法的不足。

ARMA模型、AR模型和MA模型应用的前提都是以时间序列为平稳随机序列为依据。有学者^[10]认为电价时间序列的变化常常是一个非平稳的随机过程,相应提出了基于ARMA的电价预测模型,即对一个非平稳电价时间序列,先用差分方法将非平稳过程平稳化,然后采用AR,MA或ARMA对处理后的平稳序列进行建模和预报。由于电价的随机波动性比较强,一般很难有效地去除电价时间序列的非平稳过程,从而在很大程度上影响了预测的效果,使时间序列方法在电价预测领域没有多少优势。当然,如果能使序列较好的平稳化,时间序列方法也能取得比较好的效果^[7]。

时间序列方法的主要难点在于如何选择恰当的模型,如果模型选择不准确,则即使参数估计再准确,预测的效果也不会好。考虑到在时间序列分析中,选用何种因子和用何种表达式有时只是一种推测,影响电价的因子的多样性和某些因子的不可测,使得时间序列分析在某些情况下受到限制,预测的精度较低。

2.2 神经网络方法

由于时间序列方法仅依靠分析电价自身发展规律进行预测,无法处理多变量问题,存在一定的片面性,为此可采用多变量模型,从而提高时间序列法的预测精度。神经网络对大量非结构性、非精确性规律具有自适应功能,能够有效处理多变量和非线性问题,从而成为目前国内外专家学者研究得比较多的一种电价预测方法。

一般神经网络是由大量神经元组成的,每个神经元输入输出关系可简化描述为:

$$y_i = f\left(\sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - \theta_i\right) \quad (2)$$

其中: x_j 为神经元的输入; w_{ij} 为从神经元 j 到神经元 i 的连接权值; θ_i (可正或可负,相应地增加或降低传递函数的网络输入)是神经元 i 的阈值; $f(\cdot)$ 称为传递函数,它决定神经元 i 受到输入信号 x_1, x_2, \dots, x_n 的共同刺激到达阈值时以何种方式输出, y_i 为神经元的输出。

较早的研究是基于传统BP神经网络预测模型^[11,12],虽然预测结果与真正实用化有一定差距,但是它为后来神经网络方法在电价预测中的研究工作起了一定的引导作用。近年来国内外学者对神经网络预测方法进行了积极的探索,分别采用了回归神经网络^[13]、径向基函数(RBF)神经网络^[14,15]、自适应神经网络^[16]、递归神经网络^[17]、模块神经网络^[18]、小脑模型关节控制器(CMAC)神经网络^[19]等进行日前电价预测的尝试,取得了一些效果。

应用神经网络模型进行预测时,研究的重点大多在于如何构成预测样本,如何构成输入层数据等。由于模型的网络结构(如网络的层数和各层神经元个数)的选取大多凭借经验,或者在没有其他经验知识时采用试凑法,即取测试集预测误差相对较小时的那组数值,因此神经网络存在难以确定合理的网络结构和容易收敛到局部最优解等问题,使得神经网络在预测精度和收敛性方面存在一定的限制。

2.3 基于小波理论的预测方法

小波理论是在傅里叶分析基础上发展起来的一种信号处理方法,小波变换能将各种交织在一起的不同频率混合信号分解成不同频带上的块信号,然后在各个时频区域分别进行观察和处理,在时域和频域都具有良好的分辨能力^[20]。

基于小波变换良好的局部化特性,以及ARMA模型简捷实用的特点,有些学者^[21]将小波变换和ARMA相结合建立电价预测模型:即运用小波分解

方法将原始电价序列分解成多个子序列,根据不同子序列的特点分别建立相应的 ARMA 模型进行预测,最后将各子序列预测结果进行重构得到最终的电价预测结果。相对于单一的 ARMA 方法,基于小波变换的 ARMA 方法在预测精度有一定的提高。但是由于此模型仅依靠分析电价自身发展规律进行预测,所以还是无法避免地存在一定的片面性。

鉴于小波变换具有良好的时频局部化性质和变焦性质,而神经网络具有自学习、强鲁棒性和推广能力,有些学者将小波变换与神经网络相结合建立电价预测模型。小波与神经网络的结合主要有以下两种途径^[22]:一是辅助式结合^[23,24],即利用小波变换对信号进行预处理,然后用神经网络进行学习与判别;二是嵌套式结合^[25],即直接以小波函数(有时还有尺度函数)代替常规神经网络的 Sigmoid 或辐射基函数作为神经网络的隐节点激励函数,以小波的尺度和平移参数作为神经网络的权值和阈值参数,构成一种新型的前馈神经网络。

小波神经网络与 BP 神经网络相比,预测精度和收敛性方面都有明显的提高。但是在用辅助式小波神经网络进行预测时,需注意小波基和分解尺度的选择,同时处理好小波变换过程中的边界问题,否则即使各个子序列预测得再准确,总体的预测效果也不会很好。而在用嵌套式小波神经网络进行预测时,需注意小波基的数量和网络初始参数的选择,选择不当会导致网络收敛速度缓慢甚至出现不收敛。

2.4 组合预测方法

由于电价的影响因素比较多而且关系错综复杂,有时候无论采用时间序列法、神经网络方法等都难以达到理想的预测效果。鉴于单一预测方法的一些弊端,有些学者开始对组合预测方法进行探索,当前的主要思路是直接从电价预测机理的角度将单一预测模型进行组合,即先对各种已有的单一预测方法优缺点进行分析,然后通过将两种或者多种方法进行组合,扬长避短,从而建立最优的组合预测模型。

基于数据挖掘技术强大的数据处理能力,能从大量的数据中发现有用的规律、规则、联系、模式等知识,有学者^[26]提出一种基于数据挖掘中的相似搜索技术和加权回归技术相组合的电价预测方法:即对临近日和相似搜索所得到的相似日的负荷——电价数据用加权回归进行电价预测,这种方法比较适合于负荷与电价强相关性的电力市场如加州电力市场。

神经网络方法具有很强的自学习能力,可以逼

近任何连续的函数,但是它存在学习速度慢和易陷入局部极小点等问题。所以近年来有不少学者尝试以其它数学方法的优点来弥补神经网络方法的不足,提出了许多有关神经网络的组合预测模型,除上面所提到的小波神经网络模型外,还有模糊神经网络模型^[27~29],遗传算法优化的神经网络模型^[30],基于动态聚类的 BP 神经网络模型^[31]等。研究表明,神经网络的组合模型在预测精度方面明显高于传统的神经网络模型,在学习速度和优化能力方面也比 BP 网络具有更大的优势。

借鉴电力负荷预测^[32]的思想,可以考虑组合预测方法的另一种思路,即将单一模型预测结果直接加权组合,其主要出发点是,不同方法的预测结果一般都有差异,通过在上述预测结果的基础上综合判断,根据“预测时期内组合预测误差最小”的原则赋予每个预测模型不同权重,从而得到一个预测效果更好的综合模型。

虽然从单一预测模型走向组合预测模型,普遍被认为是一种预测策略的进步,但是我们也应该意识到:并非任意两个或者多个数学方法的组合就一定能取得更好的预测结果,这需要实践检验其预测效果,才能评价某种新的数学方法的应用前景。

3 中长期电价预测

准确的中长期电价预测能够为发电企业生产计划的制定和电力投资商的长期投资提供很好的参考,为监管部门制定和实施有效的监管措施提供客观依据,同时也有助于电网企业合理安排电网运行与发供电平衡。所以,对电力市场中长期电价预测的研究具有非常重要的意义。

由于影响电价水平的因素较多^[33],而且这些因素本身存在极大的不确定性,加上中长期预测的周期较长,所以中长期电价预测的难度相当大。目前为止,国内外关于中长期预测^[34~38]的研究远远少于短期预测。在中长期预测中,往往将电价看成随机变量,一般研究它的分布函数,建立其分布区间的预测模型。

模糊方法对长周期不确定性处理的思想与神经网络理论有所不同,不是追求确定性预测的精度,而是寻求预测数据的最小分布;而回归分析方法是通过对变量的观测数据进行统计分析,确定变量之间的相关关系,从而实现预测的目的^[6],故常将模糊方法和回归方法相结合应用于中长期电价预测。文

献 [35] 将模糊推理和回归方法相结合,讨论了长期电价的贝塔分布情况;文献 [37] 通过神经网络优化模糊回归模型参数,再利用线性规划方法对模型进行求解,获得了电价可能的最小分布边界,从而估计了电价分布的最小区间,为电力市场各个成员提供了决策参考。

在中长期电价预测的过程中,应注重分析电价的中长期影响因素,将系统的中长期供求状况和电价有机结合起来,如考虑发电商长期实施市场力的情况 [38],系统剩余容量百分比与电价之间的关系 [39] 等,侧重于对电价的整体变化趋势的研究,确定预测电价的置信区间比仅仅确定中长期电价的单点预测值的意义更大。

中长期电价预测方面的研究比较少也不够深入,需要继续深入研究。

4 电价预测关键问题分析与探讨

4.1 预测中输入参数的选择

电力系统的预测问题并不仅仅局限于电力系统内部,它实际上要受到许多外界因素的影响。因此如何在预测输入参数中引入一些主要的相关因素来提高预测精度,就成为一个非常值得深入研究的关键问题。

电价受到许多诸如发电方报价模式等人为因素的影响,但这些人为了因素在数学模型中是难以确定的,由于历史报价在一定程度上反映了发电方的报价模式,所以通常将其作为影响未来电价的一个主要因素 [40]。除此之外,人们普遍认为电价受电力需求的影响比较大,所以常将负荷作为模型的另一个主要输入参数,但有学者 [41] 指出:并非所有的市场模式下负荷与电价都强相关,因此,仅仅以预测负荷和历史电价作为模型的输入参数并非一定是合理的。考虑到电价受电力市场供求状况的影响比较大,因而近年来不少学者定义并选取了一些能较好反映市场供求状况的指标作为模型输入参数,如表 1 所示。文献 [38] 通过引入衡量市场力的新指标 - 必须运行率 (MRR),从而充分考虑了发电方实施市场力对电价走势的影响。

为了更好地提高电价预测精度,预测模型的研究应基于对实际电力市场的细致研究,与相关因素分析相配合,尝试对历史数据进行数据挖掘,从而找出影响预测精度的主要相关因素作为模型输入参数。

表 1 反映供求关系的输入参数

Tab 1 Input parameters reflecting the relation of electricity supply and demand	
系统负荷率 (SLR) [23]	$SLR = \frac{\text{系统负荷}}{\text{系统可用容量}}$
竞价空间 (Bidding Space) [24, 42]	$S_B = \frac{\text{系统负荷} - \text{系统外机组承担的负荷}}{\text{竞价机组总可用容量}}$
系统剩余容量百分比 (SSCP) [39, 43]	$SSCP = \frac{\text{竞价机组总可用容量} - \text{竞价机组应发负荷}}{\text{竞价机组总可用容量}} \times 100\%$
供求平衡指数 (SDI)	$SDI = \left[\frac{\text{第 } t \text{ 时刻系统备用容量}}{\text{第 } t \text{ 时刻系统负荷}} \right] \times 100\%$
相对需求指数 (RDI) [44]	$RDI = \frac{\text{第 } t \text{ 时刻系统负荷}}{\text{交易日开始时刻系统负荷}}$

4.2 预测中“重近轻远”原则 [6]

预测中“重近轻远”原则即:物理量未来的变化趋势更多地取决于历史时段中近期的发展规律,远期的历史数据与未来发展趋势的相关性较弱。在考虑“重近轻远”原则的情况下,其处理思路应该是:区别对待各时段的拟合残差,近期的发展规律应该得到更好的拟合,远期历史数据的拟合程度可以稍低。

为实现“重近轻远”原则,主要采用加权参数估计的方法 [45],即对近期数据给予较大的权值,远期数据给予较小的权值。在短期预测中,可以通过输入参数的选择来实现“重近轻远”原则,即选择与预测时段比较接近的时段信息构成主要的输入参数,如前一时段、前一天的电价、负荷、反映供求关系的参数等,根据实际情况适当考虑电价的周期性,即前一周相同时段的电价作为输入参数之一。

4.3 预测评估标准的定义 [46]

4.3.1 传统的评价指标及其缺点

在预测中,传统的误差评价指标是平均绝对百分比误差 MAPE (Mean Absolute Percentage Error)。设 v_{ai} 是实际值,而 v_{fi} 是预测值,则 MAPE 定义为:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_{fi} - v_{ai}) / v_{ai} \times 100\% \quad (3)$$

MAPE 评价指标被广泛地应用于负荷预测当中,但是在电价预测里,该指标有时却不能正确反应预测的好坏。这是因为电价序列不是一个正值序列,它经常会出现零值和负值。当电价为零值的时候,上式就失去意义了,当出现负值时却可能使误差度量变小,从而导致不合理的结果。

4.3.2 适用于评价电价的 MAPE 指标

针对传统 MAPE 的问题,重新定义 MAPE 如下:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_{fi} - v_{ai}) / \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_{ai} \right) \times 100\% \quad (4)$$

这样重新定义 $MAPE$ 后就不会出现除数为零的情况,从而能够正确地反映预测的效果。

4.4 预测中对电价形成机理的分析

文献 [39] 通过比较 14 个电力市场工作日和节假日的电价模式,发现不同电力市场的电价因市场模式的不同存在很大的差别,因此,在做电价预测时,应深入分析实际电网的运营情况,在找出影响电价变化的主要因素及进一步弄清电价发展变化内在规律的基础之上,对实际电价形成机理进行深入分析研究,提出适合本地区实际情况的电价预测模型,优化模型参数,提高电价预测精度。如果直接套用已有的一些预测方法,则很难达到预期的效果。

5 结论

本文将目前的电价预测方法作了一个综合的归纳。针对不同的电力市场,预测方法的选择也有所不同。由于时间序列方法不能考虑各种不确定因素对电价的影响,BP神经网络方法存在易陷入局部最小,收敛性差等固有的缺点,人们开始从最初单一的预测模型向多种方法相组合进行预测的角度转变,发现组合预测模型能集结尽可能多的有用信息,充分利用了不同数学方法的各自优点,在预测速度和精度方面都有了明显的提高。可见,随着人们对电价预测问题的深入研究,电价预测将在电力系统中发挥越来越大的作用。

参考文献:

- [1] 周佃民,赖菲,刘亚安,等. 电力系统负荷预测与电价预测[J]. 继电器, 2000, 28(10): 31-33
ZHOU Dian-min, LAI Fei, LIU Ya-an, et al. Electric Power System Load Forecast and Electricity Price Forecast [J]. Relay, 2000, 28(10): 31-33.
- [2] Benini M, Marracci M, Pelacchi P, et al. Day-ahead Market Price Volatility Analysis in Deregulated Electricity Markets [A]. Proc of IEEE PES Summer Meeting 2002 1354-1359.
- [3] 黄日星,康重庆,夏清. 电力市场中的边际电价预测[J]. 电力系统自动化, 2001, 24(22): 9-12
HUANG Ri-xing, KANG Chong-qing, XIA Qing. Systems Marginal Price Forecasting in Electricity Market [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 24(22): 9-12.
- [4] 李郁侠,石晓俊,段凌剑,等. 电力市场中周末边际电价预测方法研究[J]. 西安理工大学学报, 2005, 21(1): 91-94
LI Yu-xia, SHI Xiao-jun, DUAN Ling-jian, et al. Research on Forecasting Weekend SMP in Electric Power Market [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2005, 21(1): 91-94.
- [5] 刘晨曦. 电力系统负荷预报理论与方法[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1987.
LIU Chen-hui. Theory and Methodology of Power System Load Forecasting [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1987.
- [6] 牛东晓,曹树华,赵磊,等. 电力负荷预测技术及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
NIU Dong-xiao, CAO Shu-hua, ZHAO Lei, et al. Power Load Forecasting Technology and Its Application [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [7] Nogales F J, Contreras J, Conejo A J, et al. Forecasting Next-day Electricity Prices by Time Series Models [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2).
- [8] Cuarema J C, Houskova J, Kosmeier S, et al. Forecasting Electricity Spot-prices Using Linear Univariate Time-series Models [J]. Applied Energy, 2004, 77(1): 87-106.
- [9] Contreras J, Espinola R, Francisco J, et al. ARMA Models to Predict Next-day Electricity Prices [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 1014-1020.
- [10] 周明,严正,倪以信,等. 含误差预测校正的 ARMA 电价预测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 63-68
ZHOU Ming, YAN Zheng, NI Yi-xin, et al. A Novel ARMA Approach on Electricity Price Forecasting with the Improvement of Predicted Error [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 63-68.
- [11] Wang A, Ram Say B. Prediction of System Marginal Price in the UK Power Pool Using Neural Networks [A]. International Conference on Neural Networks Houston (USA): 1997. 21-20.
- [12] 杨莉,邱家驹,江道灼. 基于 BP 网络的下一交易日无约束市场清算价格预测模型[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(19): 11-14, 33.
YANG Li, QIU Jia-ju, JIANG Dao-zhuo. BPN Based Day-ahead Unconstrained Market Clearing Forecasting Model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(19): 11-14, 33.
- [13] HONG Ying-yi, Hsiao Chuan-ya. Locational Marginal Price Forecasting in Deregulated Electricity Markets Using Artificial Intelligence [J]. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 2002, 149(5): 621-626.
- [14] Guo Jau-jia, Luh P B. Selecting Input Factors for Clusters of Gaussian Radial Basis Function Networks to Improve Market Clearing Price Prediction [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(3): 665-672.
- [15] 夏吉广,张维存,尹怡欣. 基于 RBF 网络的电力市场

- 清算电价预测 [J]. 中国制造业信息化, 2005, 34 (5): 138-140.
XIA Ji-guang, ZHANG Wei-cun, YN Yi-xin. The Power Market Clearing Price Forecasting Based on RBF Network [J]. MIE of China, 2005, 34 (5): 138-140.
- [16] Yam in H Y, Shahidehpour S M, Li Z Adaptive Short-term Electricity Price Forecasting Using Artificial Neural Networks in the Restructured Power Markets [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2004, 26 (8): 571-581.
- [17] 杨洪明, 段献忠. 电价的混沌特性分析及其预测模型研究 [J]. 电网技术, 2004, 28 (3): 60-64.
YANG Hong-ming, DUAN Xian-zhong. Research on Chaotic Characteristics of Electricity Price and Its Forecasting Model [J]. Power System Technology, 2004, 28 (3): 60-64.
- [18] 杨莉, 黄民翔, 邱家驹, 等. 基于模块网络的市场清算价格预测模型 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (8): 44-48.
YANG Li, HUANG Min-xiang, QIU Jia-ju, et al. A Market Clearing Price Predictor Based on Modular Networks [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (8): 44-48.
- [19] 陈建华, 周浩. 基于小脑模型关节控制器神经网络的短期电价预测 [J]. 电网技术, 2003, 27 (8): 16-20.
CHEN Jian-hua, ZHOU Hao. Short-term Electricity Price Forecasting Using Cerebellar Model Articulation Controller Neural Network [J]. Power System Technology, 2003, 27 (8): 16-20.
- [20] 崔锦泰. 小波分析导论 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1997.
CUI Jin-tai. An Introduction to Wavelets [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1997.
- [21] 周明, 聂艳丽, 李庚银, 等. 基于小波分析的短期电价ARMA预测方法 [J]. 电网技术, 2005, 29 (9): 50-55.
ZHOU Ming, NIE Yan-li, LI Geng-yin, et al. Wavelet Analysis Based ARMA Hourly Electricity Prices Forecasting Approach [J]. Power System Technology, 2005, 29 (9): 50-55.
- [22] 陈哲, 冯天瑾. 小波分析与神经网络结合的研究进展 [J]. 电子科学学刊, 2000, 22 (3): 496-504.
CHEN Zhe, FENG Tian-jin. Research Advance on Combining of Wavelet Analysis and Neural Networks [J]. Journal of Electronics, 2000, 22 (3): 496-504.
- [23] 张显, 王锡凡, 陈芳华, 等. 分时段的短期电价预测 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (15): 2-6.
ZHANG Xian, WANG Xi-fan, CHEN Fang-hua, et al. Short Term Electricity Price Forecasting Based on Period-decoupled Price Sequence [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (15): 2-6.
- [24] 魏平, 李均利, 陈刚. 基于小波分解的改进神经网络MCP预测方法及应用 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (11): 17-21.
WEI Ping, LI Jun-li, CHEN Gang. Forecasting MCP Using a Wavelet-improved Neural Network Method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (11): 17-21.
- [25] 董福贵, 张世英, 谭忠富, 等. 基于遗传算法的小波神经网络在电价预测中的应用 [J]. 计算机工程, 2005, 31 (4): 33-34, 55.
DONG Fu-gui, ZHANG Shi-ying, TAN Zhong-fu, et al. Application for Electricity Price Forecasting Using Improved Wavelet Neural Networks Based on GA [J]. Computer Engineering, 2005, 31 (4): 33-34, 55.
- [26] 李邦云, 袁贵川, 丁晓群. 基于相似搜索和加权回归技术的短期电价预测 [J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (1): 42-45.
LI Bang-yun, YUAN Gui-chuan, DING Xiao-qun. Electricity Price Forecasting Based on Similarity Search & Weighted Regression [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (1): 42-45.
- [27] 赵庆波, 周原冰, 郭蓉, 等. 模糊神经网络在电力系统边际电价预测中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28 (7): 45-48.
ZHAO Qing-bo, ZHOU Yuan-bing, GUO Rong, et al. Application of Fuzzy Neural Network in Power System Marginal Price Forecasting [J]. Power System Technology, 2004, 28 (7): 45-48.
- [28] Rodriguez C P, Anders G J. Energy Price Forecasting in the Ontario Competitive Power System Market [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19 (1): 366-374.
- [29] HONG Ying-yi, Lee Chuan-fang. A Neuro-fuzzy Price Forecasting Approach in Deregulated Electricity Markets [J]. Electric Power Systems Research, 2005: 151-157.
- [30] 杨朴, 游大海, 谢培元. 基于遗传算法和BP神经网络的电价预测 [J]. 水电能源科学, 2003, 21 (2): 84-86.
YANG Pu, YOU Da-hai, XIE Pei-yuan. Price Forecasting Based on Genetic Algorithm and BP Neural Network [J]. Water Resources and Power, 2003, 21 (2): 84-86.
- [31] 李彩华, 郭志忠, 王志伟. 混合式短期边际电价预测模型 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (21): 29-33.
LI Cai-hua, GUO Zhi-zhong, WANG Zhi-wei. Short-term Marginal Price Forecasting with Hybrid Model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (21): 29-33.
- [32] 程旭, 康重庆, 夏清, 等. 短期负荷预测的综合模型 [J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (9): 42-44.
CHENG Xu, KANG Chong-qing, XIA Qing, et al. Integrated Model of Short-term Load Forecasting [J]. Auto-

- mation of Electric Power Systems, 2000, 24(9): 42-44.
- [33] 刘挺. 电力规划中电价水平预测 [J]. 华中电力, 2001, 14(6): 27-29.
LU Ting Electricity Price Level Prediction in Power Development Planning [J]. Central China Electric Power, 2001, 14(6): 27-29.
- [34] Niemeyer V. Forecasting Long-term Electric Price Volatility for Valuation of Real Power Options[A]. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Science. IEEE Computers Society. Los Alamitos (CA): 2000. 1399-1406.
- [35] Cabero J, Garcia A, Ventosa M. Forecasting Long Term Electricity Prices [EB/OL]. Available: <http://www.iitupca.es/docs/03JCB01.pdf>
- [36] 潘昌, 纪昌明. 基于模糊回归的电价预测 [J]. 水电能源科学, 2003, 21(3): 86-88.
PAN Chan, JI Chang-ming Electricity Price Forecast by Fuzzy Regression [J]. Water Resources and Power, 2003, 21(3): 86-88.
- [37] Nmnura T, Ko Hee-sang, Ozawa K. A Day-ahead Electricity Price Prediction Based on a Fuzzy-neural Autoregressive Model in a Deregulated Electricity Market [A]. Proc of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks 2002. 1362-1366.
- [38] 胡朝阳, 孙维真, 汪震, 等. 考虑市场力的短、中、长期电价预测 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 16-22.
HU Zhao-yang, SUN Wei-zhen, WANG Zhen, et al Short Term, Medium Term and Long-term Forecasting of Electricity Price with Consideration to Market Power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 16-22.
- [39] 周浩, 陈建华, 孙维真. 电力市场中的电价分析与调控 [J]. 电网技术, 2004, 28(6): 37-40.
ZHOU Hao, CHEN Jian-hua, SUN Wei-zhen Analysis and Adjustment of Electricity Price in Electricity Market [J]. Power System Technology, 2004, 28(6): 37-40.
- [40] Hogan W W. Contract Networks for Electric Power Transmission [J]. Journal of Regulatory Economics, 1992, 6(3): 257-270.
- [41] LI Ying, Flynn P C. Power Price in Deregulated Markets [A]. Proc of IEEE PES General Meeting Toronto (Canada): 2003. 874-879.
- [42] 刘正国, 付祥明, 高伏英, 等. 基于神经网络的浙江发电市场清算电价预测方法 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(9): 49-52.
LIU Zheng-guo, FU Xiang-ming, GAO Fu-ying, et al Forecasting Market-clearing Price in Zhejiang Generation Market Using Neural Network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(9): 49-52.
- [43] 陈建华, 周浩. 电力市场中的短期电价调控 [J]. 价格理论与实践, 2003, (9): 25-26.
CHEN Jian-hua, ZHOU Hao Adjustment of the Short-term Electricity Price in Electricity Market [J]. Price Theory and Practice, 2003, (9): 25-26.
- [44] XN Lua, ZHAO Yang-dong, LI Xue. Electricity Market Price Spike Forecast with Data Mining Techniques [J]. Electric Power Systems Research, 2005: 19-29.
- [45] 康重庆, 夏清, 刘梅, 等. 应用于负荷预测中的回归分析的特殊问题 [J]. 电力系统自动化, 1998, 22(10): 38-41.
KANG Chong-qing, XIA Qing, LIU Mei, et al Special Issues of Regression Analysis in Load Forecasting [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(10): 38-41.
- [46] Shahidehpour M, Yam in H, LI Zu-yi. Market Operations in Electric Power Systems [J]. Forecasting, Scheduling, and Risk Management, 2002: 78-79.

收稿日期: 2005-11-07; 修回日期: 2006-01-03

作者简介:

陈思杰 (1982-), 女, 研究生, 从事电力市场和电力系统方面的研究; E-mail: csj-zqbx@hotmail.com

周浩 (1963-), 男, 副教授, 从事电力市场分析和电力市场监管方面的研究。

Electricity price forecast methods of electricity market

CHEN Si-je, ZHOU Hao

(Electrical Engineering College, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Price is the key index evaluate the market competition efficiency and reflects the operation condition of electricity market for electricity market decision-making. This paper illustrates the characteristics and methods of the electricity price forecast. It analyzes and compares the various methods used in the short-term, medium and long-term forecast. The merits and faults of methods are put forward. Some key problems improvement measures and in the electricity price forecast are put forward respectively.

Key words: electricity market; electricity price forecast; nerve network; wavelet analysis; genetic algorithm; fuzzy reasoning