

# 电力市场辅助报价决策的灰色博弈模型研究

顾洁

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 鉴于发电商报价决策中, 存在着诸如负荷需求、竞价对手信息等大量不确定因素, 为了保障发电企业的竞争利益、降低决策风险, 引入了灰色理论, 通过对目标市场的负荷需求与出清电价样本的统计分析, 形成了负荷需求与出清电价的灰数, 进一步将主市场报价决策问题转换为灰色零和博弈问题, 建立了报价决策的灰色博弈模型, 应用灰色优化理论进行求解后能够为企业根据自身风险承受能力和市场情况形成报价方案提供参考。应用该模型对 PJM 市场数据进行分析, 结果显示本模型能更为精细地反映市场真实情况, 并为发电企业提供了更为详细的市场信息和备选方案, 从而验证了所建立的模型在辅助报价决策中的应用价值。

**关键词:** 日前电力市场; 不确定性; 灰色系统; 灰区间; 报价决策; 出清电价; 灰色博弈

## Study on bidding strategy model for power market based on grey game theory

GU Jie

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** For the amount of uncertain factors existing in the bidding procedure of power market, such as the load demand, the information of rival and so on, the grey theory is introduced to formulate the bidding model for the power market in this paper to decrease the risk of the power provider. By means of making statistic analysis of load demand samples and market clearing price (MCP) samples in object market, the grey number of load demand and MCP could be established. Furtherly the bidding procedure would be converted to the zero-sum game problem and then the bidding strategy model based on grey game theory could be formulated. It could provide the basis for the final bidding strategy of enterprises according to their own risk tolerance and market situation according to the grey optimization theory. With the application of the model into PJM, the results demonstrate that the model proposed here is more sophisticated to reflect the real situation of the market and it can also provide more detailed market information and options for power provider. Thus, it is shown that the grey game theory model has a great practical value in the power market.

**Key words:** day-ahead power market; uncertainty; grey system; grey interval; bidding strategy; market clear price; grey game theory

中图分类号: TM73; F123.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)10-0012-05

## 0 引言

近十余年来, 发电公司投标策略问题成为了电力市场研究中的一个热点问题。

国内外关于发电公司报价策略的研究成果众多, 主要有基于拍卖理论的方法、预测市场出清价的方法、博弈论的方法、市场仿真的方法、优化的方法<sup>[1-2]</sup>。在基于博弈论的方法中, 又分为联盟博弈和非合作博弈的方法。不少研究结论往往基于较强的假设, 诸如发电公司的成本信息为公共信息或者对手行为信息符合某种统计规律等等<sup>[3-4]</sup>, 而实际电

力市场中这些信息的获得往往存在较大困难, 如何面对存在大量不确定信息的电力市场环境进行投标策略优化值得深入探讨<sup>[5-6]</sup>, 参考文献[7]即利用未确知数进行发电商报价的相关研究并取得了不错的效果。

考虑到发电商报价决策中, 存在着诸如负荷需求、竞价对手的信息等大量不确定因素, 本文引入了灰色理论, 把电力系统中间“不完全信息”的一面充分展现出来。运用灰数运算等灰色系统的概念和方法, 对原有的博弈论模型进行分析推导, 建立起了基于灰色博弈理论的辅助报价决策模型, 为电

力市场的报价策略提供了一种新的思路。

## 1 灰色博弈理论概述

### 1.1 灰色理论简介<sup>[8]</sup>

1982年,中国学者邓聚龙教授创立的灰色系统理论,是一种研究少数据、贫信息不确定性问题的新方法。

灰色系统理论的研究对象是“部分信息已知、部分信息未知”的“小样本”、“贫信息”不确定性系统,它通过对“部分”已知信息的生成、开发实现对现实世界的描述和认识。

电力市场的营运行中,由于成本的动态变动、市场公布的负荷波动、对手信息的缺失等等都给电力市场的报价决策工作带来了太多信息的不确定性,难以对未来的报价做准确的决策判断,发电商报价决策问题本质上即为部分信息已知部分信息未知的优化问题,应用灰色系统理论加以解决应当是一个不错的尝试。

### 1.2 灰数的定义与运算<sup>[9]</sup>

#### 1.2.1 灰数运算的定义

定义1 设  $A$  为经典非空实数集,函数  $w: A \rightarrow [0, 1]$  满足: 存在唯一的  $x \in A$ , 使  $w(x)=1$ , 则称  $x$  为  $A$  上的一个灰数, 记为  $(\otimes(x), A, w)$ , 或简记为  $\otimes(x)$ ,  $x$  称为  $\otimes(x)$  的核;  $w$  为  $\otimes(x)$  的白化函数;

#### 1.2.2 灰数运算的定义

定义2 设有灰数  $\otimes_1 \in [a, b]$ ,  $a < b$ ;  $\otimes_2 \in [c, d]$ ,  $c < d$ , 用符号  $*$  表示  $\otimes_1$  与  $\otimes_2$  间的运算。有关文献已证明, 若  $\otimes_3 = \otimes_1 * \otimes_2$ , 则  $\otimes_3$  亦应为区间灰数, 因此应有  $\otimes_3 \in [e, f]$ ,  $e < f$  且对任意的  $\tilde{\otimes}_1, \tilde{\otimes}_2$ ,  $\tilde{\otimes}_1 * \tilde{\otimes}_2 \in [e, f]$ 。

灰数的运算抽象于各个灰数之间的真实关系, 其具体计算方法见参考文献[8-9], 这里不再赘述。

## 2 日前市场辅助报价决策的灰色博弈理论模型

本文引入了灰色系统理念, 通过对目标市场的负荷需求与出清电价样本的统计分析, 形成了负荷需求与出清电价的灰数, 进一步将主市场报价决策问题转换为灰色零和博弈问题, 建立基于灰色博弈理论的辅助报价决策模型, 并应用灰色优化理论进行求解。

### 2.1 辅助报价决策问题的相关灰数表达

#### 2.1.1 电力负荷需求的灰数表达

电力市场运行中, 市场出清价与负荷变化密切相关, 而实际系统负荷与市场管理者公布的预测值

间往往存在偏差, 即负荷变化具有不确定性, 考虑采用灰数来描述系统负荷需求——进行负荷需求灰化。

首先将负荷的时间段灰化, 考虑到相邻时段负荷变化关联性较大, 把研究时段  $N$  拓展为时段  $N-1 \sim N+1$ , 从而将时段  $N$  的相邻时段负荷都做为研究对象, 并对灰化时段内所有样本进行统计分析确定该时段负荷值的灰色特征。同时, 为保证后续建模的准确性, 对各灰化时间段内负荷进行正态分布校验。本文以 PJM 市场为对象进行计算分析, 结果表明, 在各灰化时间段内的实际负荷统计结果符合正态分布。

根据某灰化时间段确定该时段负荷值灰区间的过程比较复杂, 本文以 PJM 日前市场数据为例, 选定 1 095 个样本, 计算得出当负荷值灰化为  $(p - \sigma/6, p + \sigma/6)$  ( $p$  为该时间段内的负荷均值,  $\sigma$  为对应负荷序列的方差) 时, 样本特征较好, 能反映该灰化时间负荷及其波动情况。

#### 2.1.2 历史电价均值灰数的表达

同理, 对各灰化时间段的日前市场历史出清电价进行统计及正态分布校验, 结果显示灰化时间段的历史出清电价接近正态分布<sup>[10-11]</sup>, 进一步计算历史电价的平均值和方差, 并确定历史电价灰数。

分析发现如果出清电价灰化范围取为  $\pm \sigma/6$  ( $\sigma$  为历史出清电价的方差), 会导致竞价方案范围过宽, 电价区间很大, 使得基于此进行的报价决策意义不大。经过大量计算分析后, 确定历史电价均价灰化为  $(p - \sigma/100, p + \sigma/100)$  时, 样本区间能够获得广度与精细度的协调, 其中  $p$  为该时间段内的出清电价均值,  $\sigma$  为对应电价方差。

#### 2.1.3 成本函数的灰数表达<sup>[7]</sup>

成本是制定上网电价的基础, 因此报价的确定首先应能够相应地反映出成本。

考虑到在生产运行中, 发电成本可能因多种原因发生一定的变化, 因此对成本函数进行适当灰化。假定灰化后成本函数为:

$$Cost(x_i) = \otimes_a x_i^2 + \otimes_b x_i + \otimes_c \quad (1)$$

其中:  $x_i$  为机组出力;  $\otimes_a$ 、 $\otimes_b$ 、 $\otimes_c$  分别为机组成本函数的灰参数, 算例中取为确定性成本函数的  $a$ 、 $b$ 、 $c$  原始值的 99%~101%, 以表征发电成本变化中存在的 uncertainty。

### 2.2 基于灰色博弈理论的报价策略

#### 2.2.1 竞价模型的数学基础

电力市场竞价问题, 以发电商与市场间的零和二人博弈模型来进行分析时, 发电厂商采用的策略

是目标时段的机组出力, 即其纯策略  $x$  为竞标出力; 对发电商而言, 市场可能采用的策略就是预测的成交电价  $Y$  的概率分布  $G(y)$ <sup>[7]</sup>。

基于此, 对发电商的得益函数进行计算分析, 得出最佳的竞价方案。

如前所述, 根据对 PJM 市场大样本模拟, 得到出清电价  $y$  灰区间服从灰正态分布, 其概率密度函数为:

$$f(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \otimes_{\sigma}} e^{-\frac{(y-\otimes_{\bar{y}})^2}{2\otimes_{\sigma}^2}} \quad (2)$$

其中:  $\otimes_{\bar{y}}$  为出清电价均值灰数;  $\sigma$  为出清电价序的方差;  $\otimes_{\sigma}$  为其均方差灰数。

在近乎完全竞争的电力市场环境下, 假设市场采用的混合策略是  $G(y)$ , 则出清电价的概率分布为:

$$G(y) = \int_y^{+\infty} f(\xi) d\xi = \int_{-\infty}^{-y} f(-t) dt = \int_{-\infty}^{-y} g(y) dy \quad (3)$$

其中:

$$g(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \otimes_{\sigma}} e^{-\frac{(y-\otimes_{\bar{y}})^2}{2\otimes_{\sigma}^2}} \quad (4)$$

假设电力生产的成本函数如式(1)所示,  $\otimes_a$ ,  $\otimes_b$ ,  $\otimes_c$  同(1)中定义。

计及发电成本后, 出力为  $x$  的机组期望收益函数  $u(x)$  为:

$$u(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} xy \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(y-\otimes_{\bar{y}})^2}{2\sigma^2}} dy - \otimes_a x^2 - \otimes_b x - \otimes_c = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} x(y - \otimes_{\bar{y}}) e^{-\frac{(y-\otimes_{\bar{y}})^2}{2\sigma^2}} dy + \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} \otimes_{\bar{y}} e^{-\frac{(y-\otimes_{\bar{y}})^2}{2\sigma^2}} dy - \otimes_a x^2 - \otimes_b x - \otimes_c \quad (5)$$

由于

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} x(y - \otimes_{\bar{y}}) e^{-\frac{(y-\otimes_{\bar{y}})^2}{2\sigma^2}} dy = 0$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{y^2}{2}} dy = \sqrt{2\pi}$$

从而式(5)可简化为:

$$u(x) = x \otimes_{\bar{y}} - \otimes_a x^2 - \otimes_b x - \otimes_c \quad (6)$$

### 2.2.2 竞价模型

综上, 建立基于灰色博弈理论的发电商竞价模

型如下:

$$\max \{u(x) = x \otimes_{\bar{y}} - \otimes_a x^2 - \otimes_b x - \otimes_c\} \quad (7)$$

$$\text{S.T.} \quad 0 \leq x \leq Q_{\max} \quad (8)$$

$$C(x_i) \leq P(x_i) \leq \tilde{P}_{\max} \quad (9)$$

其中:  $\otimes_{\bar{y}}$  为电价的均值的灰数;  $\otimes_a$ ,  $\otimes_b$ ,  $\otimes_c$  分别是成本函数参数的灰系数;  $Q_{\max}$  表示机组最大出力;  $P(x_i)$  表示出力为  $x_i$  时对应的优化申报电价;  $C(x_i)$  表示出力为  $x_i$  时机组的发电成本;  $x_i$  表示机组期望上网电力;  $\tilde{P}_{\max}$  为由出清电价的灰化过程得到的电价灰上界。

### 2.2.3 竞价模型的求解

由式(7)~(9)可知, 优化的目标函数  $u(x)$  是以  $\otimes_a$ ,  $\otimes_b$ ,  $\otimes_c$  为参数的关于机组出力  $x$  的上凸的二次灰色函数, 其物理意义比较明显, 即收益减去成本。

该优化问题中是一个目标函数为二次函数的有约束灰色非线性规划问题, 应用灰色优化理论<sup>[8-9]</sup>, 即可得到该问题的优化解。

对于市场规则要求发电商每个交易时段申报多个容量与电价的问题, 可以采用以该优化解为中心, 根据线性插值法对其余段的容量与电价进行申报, 在此不再赘述。

## 3 模型计算流程

将灰色系统理论引入经典的博弈论中建立了基于灰色博弈理论的辅助报价决策模型, 模型求解流程如图1。

## 4 算例分析

鉴于形成建模所需的负荷需求、出清电价等灰数, 需要有丰富的历史样本积累, 故采用美国 PJM 市场数据进行基于灰色博弈理论的报价策略计算与分析, 对所建立的模型进行校核论证。

### 4.1 负荷需求与日前市场出清价格统计分析

#### 4.1.1 需求的统计及其灰数生成

以 PJM 市场 2007 年 hour1000 报价时段为例(即 PJM 市场中 9:00~10:00 之间时间段), 按照负荷灰化过程选取 2006 年 1 月 1 日到 12 月 31 日共 365 天 8:00~11:00, 3 个时段数据作为历史数据, 用于负荷灰数的生成。利用 Matlab 的统计绘图函数进行正态分布校验, 研究表明: 如果数据是来自一个正

态分布，则该线为一直线形态；如果它是来自其他分布，则为曲线形态。该灰化时段内历史负荷数据的正态分布校验结果如图 2 所示。显然，采用正态分布进行灰时间段内负荷变化模拟是可行的。

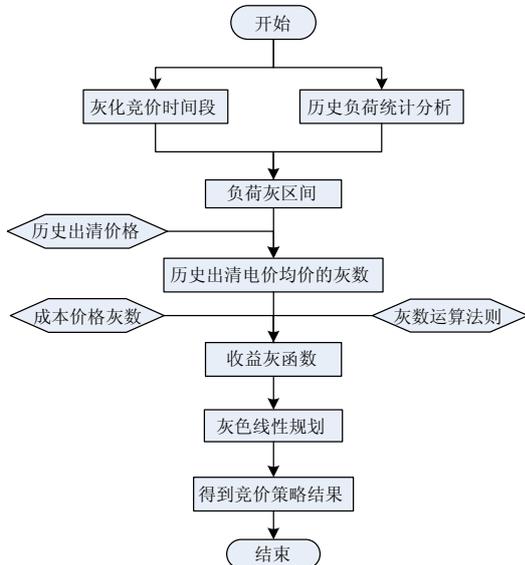


图 1 基于灰色博弈理论的竞价策略形成流程  
Fig.1 Flow chart of the bidding strategy based on the grey game theory

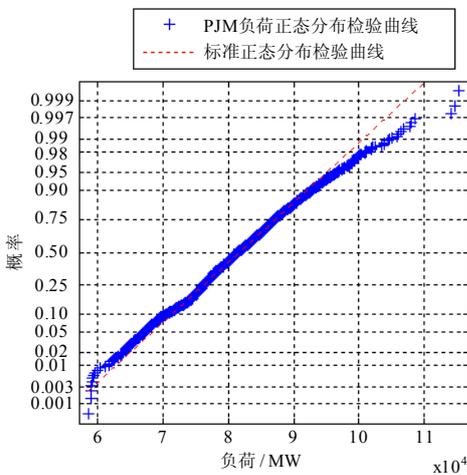


图 2 PJM 负荷的正态分布校验图

Fig.2 Test figure of normal distribution for power load in PJM

计算出负荷的标准差为：8 843.429 MW。选定 2007 某天的负荷范围按本文 2.1.1 中方法对负荷需求进行灰化。

#### 4.1.2 出清价格统计与灰数生成

类似地进行日前市场出清价格的统计分析及出清价格灰数的生成。例如 2007 年 6 月 30 日，9 点至 10 点的负荷为：75 556 MW，该负荷区间内历史

出清电价的正态分布校验结果如图 3 所示。检验结果表明出清电价样本近似来自于正态分布。

计算标准差为：10.695 美元/MWh，按本文 2.1.2 方法得到出清电价的均值灰化。

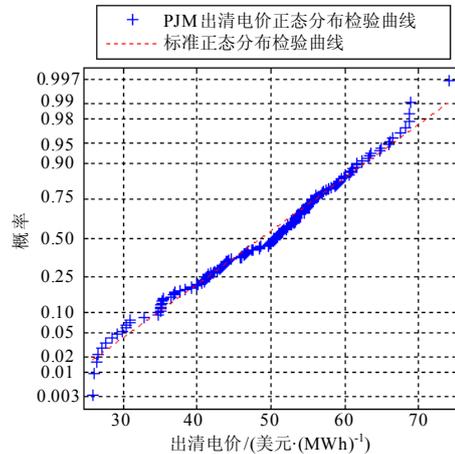


图 3 指定负荷灰区间出清价格正态分布校验图

Fig.3 Test figure of normal distribution for MCP within the certain power load area

#### 4.2 基于灰色博弈理论的报价策略

得到负荷及历史出清电价的灰区间基础上，可以利用给定的机组特性，进行报价策略的制定。

假定所研究的机组确定性成本参数为：

$$Cost = 0.02x^2 + 38x$$

其中： $x$ 为机组出力；机组技术出力范围为[280 MW, 700 MW]

以 2007 年 hour800 时段某几天为例，分析本文所提出的模型的决策过程。这里随机选取了负荷不同的 7 个对象。按预测负荷值由低至高排序后，负荷灰化结果如表 1。

表 1 负荷灰化结果表

Tab.1 Grey result of load

负荷预测值 / MW	负荷灰化后的下限 / MW	负荷灰化后的上限 / MW
73 111	71 637.166 67	74 584.833 33
83 624	82 150.166 67	85 097.833 33
87 477	86 003.166 67	88 950.833 33
90 261	88 787.166 67	91 734.833 33
93 522	92 048.166 67	94 995.833 33
97 756	96 282.166 67	99 229.833 33
104 721	103 247.166 7	106 194.833 3

把上述表格中的结果代入式 (7) ~ (9) 所描述的报价决策的模型中，得到表 2 和表 3 所示的该机组优化报价及机组出力的灰数。

表 2 竞价机组优化报价的灰数

Tab.2 Grey number for price bid of the generator

负荷 / MW	申报电价 / (美元·(MWh) <sup>-1</sup> )	出清电价 / (美元·(MWh) <sup>-1</sup> )
73 111	(31.508 981, 38.207 545)	36.08
83 624	(52.802 715, 57.152 161)	53.59
87 477	(52.321 051, 57.291 483)	52.43
90 261	(52.702 214, 57.503 030)	58.0
93 522	(53.506 551, 58.631 602)	59.4
97 756	(55.964 530, 63.361 456)	55.2
104 721	(70.596 137, 80.830 517)	76.0

表 2 的结果说明:

(1) 当负荷变动 73 111~83 624 MW 段和 97 756~104 721 MW 段时, 优化报价突变较严重, 说明在负荷需求较高或较低时, 相邻两个负荷水平间机组报价变化较大, 机组的优化报价随负荷预测结果变化较为敏感;

(2) 当负荷需求在中间段变化时, 报价变化相对平稳, 例如负荷为 83 624~97 756 MW 区间内, 相邻两个负荷段间报价变化幅度最小, 即该负荷段内报价对负荷的变化不敏感;

(3) 就报价结果总体而言, 随着负荷需求的上升, 机组优化报价也会随之上升, 与实践及理论分析后得出的结论完全吻合。

(4) 同时, 将该地区市场实际出清电价统计与本模型得出的申报电价进行比较后发现, 除了在负荷水平为 97 756 MW 的负荷时段下本机组申报电价下限高于市场的实际出清电价外, 其余各负荷水平下, 按照本文模型得出的申报电价都能够为发电商竞价收益的获得提供有力的参考。

表 3 竞价机组的申报出力灰数

Tab.3 Grey number for capacity bid of the generator

负荷 / MW	申报出力 / MW
73 111	(280, 386.5)
83 624	(407.597 893, 441.614 182)
87 477	(402.899 853, 437.762 121)
90 261	(557.391 019, 598.147 630)
93 522	(559.290 218, 594.515 856)
97 756	(586.908 058, 621.588 411)
104 721	(700, 700)

表 3 结果显示, 负荷在 83 624~87 477 MW 及 90 261~93 522 MW 段内变化时, 申报出力对负荷需求比较不敏感, 优化出力基本没有什么变动(负荷在 73 111 MW 时, 考虑到机组技术出力约束, 机

组申报出力灰数下限进行了调整)。而出力的灰区间总体上随着负荷的上升, 优化出力也会随之上升。

## 5 结论

本文在电力市场报价决策的经典博弈论模型基础上, 考虑到发电商报价决策中, 存在大量不确定因素, 引入了灰色系统的概念, 把电力系统中间“不完全信息”的一面充分展现出来, 运用灰数运算等灰色系统理论, 建立了报价决策的灰色博弈论模型, 并应用该模型对美国 PJM 市场某一个时段的竞价过程进行分析, 说明了灰色博弈论用于发电企业竞价策略的运用框架, 为企业根据自身风险承受能力和市场情况形成最后的报价方案提供依据。算例计算结果显示, 本模型比传统方法更为精细地反映市场的真实情况, 能够为发电企业提供更为详细的市场信息和备选方案。

## 参考文献

- [1] 王锡凡, 王秀丽, 陈皓勇. 电力市场基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2003.  
WANG Xi-fan, WANG Xiu-li, CHEN Hao-yong. The foundation of power market[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2003.
- [2] 尚金成, 黄永皓, 夏清, 等. 电力市场理论研究与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
SHANG Jin-cheng, HUANG Yong-hao, XIA Qing, et al. Electricity market theory research and application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [3] 李灿, 龚乐年. 基于市场总体信息的发电公司优化竞价策略[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(3): 15-18.  
LI Can, GONG Le-nian. Optimal bidding strategy for generators based on market global information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(3): 15-18.
- [4] 谭忠富, 王绵斌, 尚金成, 等. 区域电力市场环境下的省电力公司报价策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 8-14.  
TAN Zhong-fu, WANG Mian-bin, SHANG Jin-cheng, et al. Study on the bidding strategies for provincial electricity power company under regional electricity power market[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(22): 8-14.
- [5] Gajjar G R, Khaparde A, Nagaraju P, et al. Application of actor-critic learning algorithm for optimal bidding problem of a genco[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(1): 11-18.
- [6] Guan Xiao-hong, Ho Yu-Chi, Lai Fei. An ordinal optimization based bidding strategy for electric power suppliers in the daily energy market[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(4): 788-798.

(下转第21页 continued on page 21)

和光伏阵列电压曲线变化趋势与实测数据的变化趋势基本一致, 仿真曲线略高于实测曲线。出现仿真值偏高的主要原因在于采用光伏组件出厂参数计算的光伏阵列五参数模型仍然是一种理想模型, 光伏组件在现场实际运行中的转换效率要小于理想转换效率, 同时模型采用了理想逆变电路, 没有考虑逆变器损耗, 因而实际输出功率略低于仿真值, 另外光伏阵列表面覆尘也可能是原因之一。从图 6 (c) 可见, 光伏电站输出功率的相对误差在 2.2%~6.9% 之间, 仿真值偏高引起的固有误差约为 4%, 光伏阵列电压误差不超过 3.2%。输出功率的仿真误差在早晨和傍晚时略大, 中午时偏小, 出现这种趋势的主要原因在于实际逆变器在早晨和傍晚的输出功率比中午的输出功率低得多, 逆变器效率在早晚低功率时的运行效率降低较多, 逆变器相对损耗也较大, 而仿真中为使模型简洁、计算量减少、仿真时间缩短, 没有考虑逆变器损耗, 从而带来仿真误差。综上所述, 并网光伏发电系统整体模型能够较为准确地模拟实际并网光伏发电系统的运行特性。

## 5 结论

建立准确的数学模型是保证并网光伏发电系统分析与规划合理准确性的重要手段, 同时通过模型仿真研究, 也可获得不同形式并网光伏发电系统运行特性, 从而为分析不同形式并网光伏发电系统对电网的影响及其成因提供依据。

本文首先研究了跟踪式光伏阵列模型, 提出跟踪式光伏阵列改进模型以及考虑跟踪闭锁和步进跟踪的有效太阳辐射计算方法, 并进行了模型验证和

仿真分析研究。

## 参考文献

- [1] Saha S, Sundarsingh V P. Novel grid-connected photovoltaic inverter[J]. IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(2): 219-224.
- [2] Wasynczuk O. Modeling and dynamic performance of a line-commutated photovoltaic inverter system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1989, 4(3): 337-343.
- [3] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [4] Rodriguez C, Amaratunga G A J. Dynamic stability of grid-connected photovoltaic systems[A]. in: Proceedings of the 2004 IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. 2004.2193-2199.
- [5] 王一波, 李晶, 许洪华. 考虑电网安全稳定约束的光伏电站最大安装容量计算与分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(8): 971-975.
- [6] De Soto W, Klein S A, Bechman W A. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance[J]. Solar Energy, 2006, 80(1): 78-88.
- [7] De Soto W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance[D]. University of Wisconsin-Madison, 2004.

收稿日期: 2009-07-03; 修回日期: 2009-11-26

作者简介:

徐维(1969-), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为电工应用技术、绿色能源技术。E-mail: xwei@czu.cn

(上接第 16 页 continued from page 16)

- [7] 黄涛. 区域电力市场中发电企业市场报价策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.  
HUANG Tao. Study on bidding strategies of generation enterprise in regional power market[D]. Shanghai: Shanghai JiaoTong University, 2007.
- [8] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
LIU Si-feng, DANG Yao-guo, FANG Zhi-geng, et al. Grey system theory and its application[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [9] 罗党. 灰色决策问题分析方法[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2005.  
LUO Dang. Analysis method for grey decision problem[M]. Zhengzhou: Yellow River Conservancy

Press, 2005.

- [10] Nogales F J, Contreras J, Conejos A J, et al. Forecasting next-day electricity prices by time series models[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(2): 34-348.
- [11] 柯于刚, 顾洁. 混沌递阶遗传神经网络在组合预测中的应用[J]. 电气应用, 2007, 26(4): 35-38.  
KE Yu-gang, GU Jie. Application of chaotic and hierarchical genetic algorithm for artificial neural networks to combination forecasting[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(4): 35-38.

收稿日期: 2009-07-08; 修回日期: 2009-09-07

作者简介:

顾洁(1971-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为电力市场及电力系统优化, 智能电网。E-mail: gujie@sytu.edu.cn