

当量电价定价机制 与发电厂商报价策略研究

作者： 李晓刚

专业： 控制理论与控制工程

导师： 言茂松

谢贤亚



上海大学出版社

· 上海 ·

2004 年上海大学博士学位论文

当量电价定价机制 与发电厂商报价策略研究

作 者： 李晓刚

专 业： 控制理论与控制工程

导 师： 言茂松

上海大学出版社

• 上 海 •

Shanghai University Doctoral Dissertation (2004)

A Study of Electricity Value Equivalent Pricing Method and Bidding Strategies of Power Suppliers

Candidate: Li Xiao-gang

Major: Control Theory and Control Engineering

Supervisors: Prof. Yan Mao-song

Prof. Xie Xian-ya

Shanghai University Press

• Shanghai •

上海大学

本论文经答辩委员会全体委员审查，确认符合上海大学博士学位论文质量要求。

答辩委员会名单：

主任：	韩祯祥	中科院院士，浙江大学	310027
委员：	薛禹胜	工程院院士，国电自动化研究院	210003
	陈 陈	教授，上海交通大学	200030
	刘维烈	教授级高工，华东电网公司	200002
	龚幼民	教授，上海大学	200072
导师：	言茂讼	教授，上海大学	200072
	谢贤亚	教授，上海大学	200072

评阅人名单:

韩祯祥	中国科学院院士, 浙江大学	310027
王锡凡	教授, 西安交通大学	710049
文福拴	教授, 浙江大学	310027

评议人名单:

周孝信	中国科学院院士, 电力科学研究院	100085
薛禹胜	中国工程院院士, 国电自动化研究院	210003
任 震	教授, 华南理工大学	510641
倪以信	教授, 香港大学	
甘德强	教授, 浙江大学	310027
程浩忠	教授, 上海交通大学	200030

答辩委员会对论文的评语

李晓刚同学的博士学位论文《当量电价定价机制与发电厂商报价策略研究》立足于电力市场研究的前沿,系统而深入地研究了定价机制、报价策略以及定价机制和报价策略两者之间的关系,取得了丰富的成果.作者的主要贡献和创新如下:

(1) 给出了当量电价的解析表达形式;

(2) 提出了水电上网的当量电价方法,发展了当量电价体系;

(3) 指出当量电价具有自动抑制发电厂商不良市场行为的机理,从而优于统一出清电价和PAB电价,表明,即使在电力短缺情况下也可以开放电力市场;

(4) 发展了基于ARMAX模型的短期出清电价预测模型;

(5) 提出了等效竞争对手的概念和依据市场公开信息估计其报价概率的方法,在此基础上研究了发电厂商的最优报价策略;

(6) 发展了计及竞价失败损失和不同风险取向情况下发电公司的最优报价策略.

论文表明作者具有较扎实的电力市场专业理论基础和系统深入的专门知识,有很强的科研能力,学风严谨.论文已完全达到工学博士学位论文的要求,是电力市场研究领域一篇优秀的博士论文.李晓刚同学在答辩中能正确回答专家提问.

答辩委员会表决结果

经答辩委员会表决,全票同意通过李晓刚同学的博士学位论文答辩,建议授予工学博士学位.

答辩委员会主席: 韩祯祥

2003 年 11 月 28 日

摘 要

电力市场改革的目的是在提高电力工业生产效率,降低用户用电费用的同时,使电力工业持续健康发展,并最终实现电力生产的社会福利最大化。其中电价机制是电力市场改革的核心问题,科学合理的电价能引导市场的供需平衡,包括短期的和长期的供需平衡,达到电力资源的最有效利用。由于电力工业的特殊性,在实际的电力市场中,发电厂商从自身利益最大化的角度出发,往往会利用其具有的市场势力,通过策略性报价获取超额利润,这将损害市场效率和用户利益。而电价机制对发电厂商的策略性报价有重要的诱导作用。本文针对电力市场中发电市场定价机制与发电厂商报价策略两大基础核心问题展开了研究。

首先,发电侧日前现货市场是整个电力市场的核心与基础,因而发电侧现货市场定价机制的研究具有重要的基础意义,分析了现有发电定价机制存在的问题,介绍了电力市场的三个基本原则,缺电情况下开放电力市场的基本要求及发电竞价上网的当量电价方法,建立了当量电价法的解析表达形式,并介绍了当量电价的右端点原理和十大市场特性。

第二,发展了考虑水电竞价上网的当量电价法。在电力市场环境,通过电力调度交易中心与水电调度中心交互协调,水电同样可以参与上网竞争。水电竞争上网的原则是优先利用水电,但水电的上网电价取决于火电市场竞争的结果。还分析了当量电价下,水电厂的年收支平衡问题,给出了年收支平衡的水电还贷年限与单位容量成本、还贷利率以及火电市场容量成本参考系

四者之间的关系式，并给出了说明性算例。

第三，分析了统一出清电价、PAB 电价和当量电价下发电厂商的价格决策和产量决策。在价格决策方面，统一出清和 PAB 电价下，发电厂商均有偏离成本报高价倾向。在当量电价下，证明了发电厂商所得的上网电价不敏感于报价，并且其最优报价是按成本报价。在产量决策方面，在统一出清电价下，发电厂商可利用其市场力，通过持留发电容量获取超额利润。在 PAB 电价下，发电厂商可先持留发电容量造成供应紧张，再通过报高价获利，而在当量电价下，持留容量将导致发电厂商利润损失，因此没有持留容量激励。从价格决策和产量决策两方面来看，当量电价都有抑制发电厂商市场力的自律机制，并且在缺电情况下也可自动抑制发电厂商的不良报价行为。研究了容量成本参考系对发电厂商报价策略的影响，为更好的设置容量成本参考系提供了有益的启示。

第四，出清电价的短期预测是发电厂商报价的基础，本文建立了基于 ARAMX 模型的出清电价预测方法。根据负荷和出清电价的历史数据，采用相关度比较的方法确定模型的输入量，并采用了 k 步最优预测方法，并给出了以美国 New England Pool 2002 年实际数据为基础的仿真算例，结果表明该方法有较高的预测精度。结合实际数据研究了电价预测模型中参数辨识的最佳历史数据量及模型中残差多项式阶次的选择问题。

第五，估计其他发电厂商的报价行为是构造报价策略的重要途径之一。本文用等效竞争对手的概念，将除自身以外的其他发电厂商视作一个整体，并采用 ARMAX 预测模型预测统一出清电价下等效竞争对手报价的概率分布。在获得等效竞争对手报价概率分布的情况下，进一步研究了统一出清和 PAB 电价下，

按容量段报价的最优报价策略及统一出清电价下按连续供应函数报价的最优报价策略,给出了相关算例,结果表明在统一出清和 PAB 电价下,最优报价均高于发电厂商的实际成本。

最后,发电厂商的行为特性对其报价策略的选取有重大影响。本文通过指数型效益函数计入发电厂商的风险取向,得到考虑竞价失败损失和发电厂商风险取向的最优报价策略。由于风险取向的不同,发电厂商的报价策略各不相同。但在统一出清电价下,无论发电厂商是何种风险类型,其最优报价在形式上均为在其运行成本减去竞价失败损失的基础上再加上一个提升量。在成本相同的情况下,风险进取者的报价高于风险回避者。避免竞价失败损失是发电厂商低于成本报价的根本原因。理论分析和数值算例都说明了上述结论;并用 Monte Carlo 模拟验证了最优报价的正确性。

关键词 电力市场, 电价机制, 报价策略, 当量电价, 市场力

Abstract

The objective of power system restructuring is to improve efficiency of electricity production, reduce customer tariffs, and to make power industry develop continual as well to maximize the social welfare. Electricity pricing is the key issue in power system restructuring. A scientific and reasonable pricing method should lead the market on to arrive at the balance of demand and supply for both short term and long term and lead to effective use of electricity resource. However, because of the particularity of electric power system, the real electricity market is not a perfect competitive market but rather locational oligarchic market and the power suppliers often maximize their own profits by strategy bidding. Pricing methods have great effects on the bidding strategies of power suppliers. In this dissertation, the pool purchase pricing method in electricity market and bidding strategies of power suppliers, which are two key issues in electricity market, are mainly studied. Six sub-issues will be addressed.

The first, the day-ahead pool market is the base and core of the whole electricity market. So the study of pool purchase pricing is of key importance. After analyzing the problems of existing pricing methods, the basic principles of developing electricity markets and basic requirement of an open power market with electricity shortage are introduced. Then the Electricity Value Equivalent (EVE) Pricing Method is also introduced. Analytical expression of EVE Pricing

Method is established. The right terminal principle and the ten market characteristics of EVE Pricing Method are described.

The second, a trade mode for hydro-units in electricity market and a corresponding EVE pricing method are presented. The basic principle of this pricing method is that the hydro-energy is preferentially used, while the pool purchase price of it is determined by its equivalent unit in the thermo-unit pool market. Hydro-units' abilities to repay loans are discussed. And the relations between the hydro-units' repayment periods, capacity costs, interest rates of loans and the capacity cost references in the thermo-market are obtained. A simple case study is presented.

The third, the effects of different pricing methods on the bidding strategies of power suppliers are studied. In the aspect of price decision-making, under uniform and PAB (pay as bid) pricing methods, power suppliers tend to bid above their true costs. However, it is proved that under the EVE pricing method, the payments to power suppliers are not sensitive to their bids, and their best bidding strategies are to bid the true costs. As for production decision-making, under the uniform pricing method, some power suppliers can get excessive profits by withholding generation capacities; but under PAB and EVE pricing methods, power suppliers will lose their profits if they withhold generation capacities. In the aspect of the inducing the power suppliers to play fair in bidding, EVE pricing method is better than the uniform and PAB pricing methods, expressing the internal autonomy mechanism of the EVE pricing method. Under electricity shortage, the bad bidding

action are also restrained by EVE pricing method. The effect of the capacity cost reference on bidding strategies of power suppliers is preliminarily studied, which is useful for setting reference more reasonable.

The fourth, short term market clearing price prediction is the base for power supplier's bidding. A market clearing price prediction method based on ARMAX model is developed. The inputs of the prediction model are selected by comparing the correlations between the historical loads and market clearing price. A k step ahead optimal prediction method is then employed. Case study based on real data of the New England Pool is given, and the results show that this prediction method has good precision. The optimal amount of historical data for parameter estimation and for the determination of the order of error polynomial are studied by using real data.

The fifth, estimating other power supplier's bids is the main way to build bidding strategies. Using the concept of equivalent rival, we regard all other power suppliers as one equivalent virtual power supplier. The ARMAX prediction model is used to predict the probability distribution of equivalent rival's bids under uniform pricing method. Then the optimal bidding strategies of block bidding under uniform and PAB pricing methods are presented. A case study is given. The results show that the optimal bids are higher than power supplier's real costs under uniform and PAB pricing method. The optimal supply function bids under the uniform pricing method are also studied.

Finally, power supplier's behaviors have great effects on their

strategic bidding. With exponential utility function, the optimal bid, considering the risk type of power supplier and the possible loss due to bidding failure, is obtained. The bidding strategies of the power suppliers vary with their risk types. Under uniform clear pricing method, no matter what risk type the power supplier takes, the optimal bid always appears as its cost minus the possible loss due to bidding failure plus a markup, which depends on the risk type taken by the suppliers. With the same cost, the optimal bid of a risk-taker is proved to be higher than that of a risk-avoider. The ultimate reason that power supplier bids under its cost is to avoid loss of bidding failure. The above results are proved by theoretic analysis and numeric computations. Monte Carlo simulation is also used to check the results.

Key words electric power market, electricity pricing method, bidding strategies, electricity value equivalent (EVE), market power

目 录

第一章 前 言	1
1.1 论文的课题背景	1
1.2 发电市场定价机制与发电厂商报价策略的 研究现状	5
1.3 本文的主要工作和创新点	18
第二章 发电竞价上网的当量电价法	21
2.1 引 言	21
2.2 现有定价机制及其存在的问题	23
2.3 建立电力市场的基本原则	26
2.4 容量短缺的现实背景下, 开放统一出清电力 市场有其固有风险	31
2.5 容量短缺情况下开放电力市场的基本要求	32
2.6 发电竞价上网的当量电价法	34
2.7 当量电价法的解析表达	39
2.8 当量电价的右端点原理	41
2.9 当量电价的市场特性	44
2.10 当量电价体系简介	49
2.11 本章小节	53
第三章 电力市场中水电的当量定价方法	54
3.1 引 言	54
3.2 电力市场环境下水电的竞争上网模	55
3.3 电力库联营交易的次日水电调度与定价方法	58

3.4	水电峰修整及峰修整后分框插入技术	60
3.5	考虑水电竞价上网的当量电价法	61
3.6	水电厂的年收支平衡问题	62
3.7	说明性算例	64
3.8	本章小节	68
第四章	当量电价自动抑制报高价行为的自律新机制	69
4.1	引 言	69
4.2	统一出清电价下发电厂商有报高价的倾向	70
4.3	PAB 电价下发电厂商报高价的倾向更严重	71
4.4	当量电价下发电厂商没有报高价的倾向	73
4.5	在缺电情况下,当量电价仍然能使发电厂商报价 回归成本	80
4.6	容量成本参考系对发电厂商策略性报价的诱导 机理初探	82
4.7	对容量成本参考系设置的几点启示	88
4.8	本章小节	89
第五章	当量电价自动抑制持留容量行为的自律新机制	90
5.1	引 言	90
5.2	统一出清电价下危害市场安全的持留容量行为	91
5.3	PAB 电价下发电厂商的持留容量行为	92
5.4	外置的补救性措施无法从根本上解决问题	93
5.5	当量电价下单个发电单元不良持留容量行为被 抑制的机理	94
5.6	当量电价下多个发电单元不良持留容量行为被 抑制的机理	99
5.7	在缺电情况下, 当量电价同样能自动抑制持留	

容量行为	104
5.8 三种定价机制的市场特性比较	105
5.9 本章小节	106
第六章 基于 ARMAX 模型的短期出清电价预测方法	108
6.1 引 言	108
6.2 预测短期出清电价的 ARMAX 模型 及其参数辨识	109
6.3 出清电价的 k 步最优预测	117
6.4 参数辨识的最佳历史数据量	121
6.5 预测电价的概率分布	123
6.6 已知出清电价的概率分布下发电厂商的 报价策略	124
6.7 本章小节	125
第七章 基于对手报价估计的最优报价策略	126
7.1 引 言	126
7.2 对手报价的估计	126
7.3 发电厂商的最优报价	128
7.4 报价成功概率的计算方法	132
7.5 算例分析	133
7.6 PAB 定价下的最优报价	140
7.7 按连续供应函数报价的最优策略	141
7.8 本章小节	146
第八章 计入报价失败损失及发电厂商风险取向的 最优报价策略	147
8.1 引 言	147