

复杂能源系统水电竞价 理论与方法

周建中 张勇传 等 © 著



61



科学出版社

www.sciencep.com

- 47

复杂能源系统水电竞价 理论与方法

周建中 张勇传等 著

科学出版社

北京

无

F426.61

2779

内 容 简 介

本书针对梯级水电能源系统在多级电力市场中的优化运营,结合流域梯级电站的发电特性和电力市场结构特征,综合考虑多种交易形式的差异性,运用博弈论和经济学原理等系统科学与系统工程方法,系统地阐述了复杂能源系统水电竞价理论与方法,研究、分析和制定了梯级水电能源系统在单个市场中的最优竞价策略和多个市场的组合竞价策略,并介绍了相关理论在三峡梯级竞价上网和竞价决策支持系统中的应用。

本书旨在培养电力系统市场化改革背景下的电力行业专业人才,适合电力市场专家和研究人员、各高校相关专业的教师和研究生,以及各流域梯级调度与市场运行管理机构相关人员阅读与参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂能源系统水电竞价理论与方法 / 周建中等著. —北京:科学出版社,2010

ISBN 978-7-03-026680-4

I. ①复… II. ①周… III. ①水力发电-电力系统-经济管理-中国
IV. ①FE426.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第019407号

责任编辑:耿建业 / 责任校对:钟 洋
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年1月第一版 开本:B5(720×1000)

2010年1月第一次印刷 印张:19 1/4

印数:1—2 500 字数:374 000

定价:60.00元

如有印装质量问题,我社负责调换

序

抑制碳排放、低碳经济已成为各国面临的重要问题,在这个背景下,水电开发和科学运行更有了特别重大的意义。水电的价值和其在电力市场中的价格取向是紧密联系的,但由于电力市场的不健全,使这一点又常常被电力供应的垄断和价格调控所掩盖。

电力电量是能源最直接使用的方式,它的属性是商品,在市场机制中具有竞争性是固有的规律,也是推动市场进步的主要因素。市场机制对于提高资源利用率,优化资源配置都是十分有利的。但盲目的自由竞争往往会导致垄断,而垄断反过来又会破坏市场机制,排斥竞争,从而导致效率降低,阻碍资源配置的优化。有效竞争双赢模型的建立,既保持竞争活力,又充分利用规模经济的竞争格局,在鼓励竞争的同时,限制垄断的弊端,排除不正当的竞争和过度竞争。电力市场双赢策略的显著效果表现在:通过均衡价格,把电力市场交易主体的分散决策的秩序变得有序化,从而避免了信息不完备和人为造成的市场交易混乱,尤其是可以避免丰水期送电端电量弃水,而受电端使用燃油、燃煤发电的现象,提高资源利用效率。

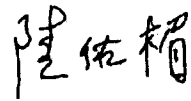
现代水电能源及其电力市场是一个开放的复杂巨系统,其生产运行不是孤立的,而是处在一定的自然环境和经济环境之中,具有高度非线性、时变、随机、不确定和强耦合等特性。其中的梯级水电又由于水文的不确定性和水库调蓄带来的灵活性提供了优化控制运行的充分空间。该书介绍了作者对复杂水电能源系统在多级市场中运营理论与方法的研究成果,包括市场出清电价预测,单个、多级市场最优竞价策略,组合竞价策略,市场均衡动态演化分析,交易形式设计和风险分析等,深化和发展了市场条件下水电能源系统运行竞价理论与方法,是一本具有重要学术价值的著作。

该书系统地阐述了复杂能源系统水电竞价理论与方法,极大地丰富和拓展电力市场环境梯级水电能源系统的优化运行理论的内涵和外延,不仅是一部理论联系实际,面向基础研究,面向应用,介绍新理论、新进展、新趋势的专著。而且是现代自然学科类交叉科学的重要著作,可为相关研究人员提供

借鉴和指导,具有重要的学术价值。

希望这本书对推动这一领域的研究和实际应用能起到重要作用。

中国工程院院士

Handwritten signature of Gao Yizhi in black ink.

2009 年于北京

前 言

水电能源及其互联电力系统在电力市场竞争中的复杂性科学问题一直被国内外学者视为水电能源科学与复杂性科学交叉发展的前沿问题之一。在这一研究领域中,一个极富挑战性的问题是如何针对现代水电能源及其电力市场所构成的复杂系统与传统科学范式中的众多假设的不同之处,对其动力学特性的范式假定进行系统化研究,从而使水电能源及其互联电力系统在电力市场竞争中最优运作。与这一目标相联系的关键问题之一在于探索一种全新的、基于动态均衡和双赢策略驱动的复杂系统演化分析的理论与方法,以解决目前水电能源系统在复杂电力市场竞争中优化控制的理论和实现方法等科学问题。

本书系统地对梯级水电能源系统在多级电力市场环境下的优化运营策略进行了总结,不仅充分考虑了集中调度模式下梯级电站的发电特点和约束条件,而且对梯级电站所处市场中交易形式、结算规则、电价制度等多方面的因素进行了详细的分析,根据多种优化竞价策略,探讨并制定了梯级电站在单个市场的最优竞价策略和多级市场下的组合竞价策略。研究内容不仅包括电力市场的基础理论和对梯级电站上网竞价的详细分析,梯级电站单个市场最优竞价策略分析和多级市场组合竞价策略研究,还包括梯级电站竞价理论在流域梯级市场化运营中的应用。全书围绕梯级水电能源系统在多级电力市场环境下的优化运营策略展开,系统地阐述了电力市场竞价的原理与方法,详细分析和推导了相关理论,并附有充足的算例对理论进行验证,所得结果真实可信,部分研究成果已用于指导工程实践,具有很高的实际应用背景和较高的实用价值。

针对研究工作提出的科学问题,本书有关作者系统地对复杂水电能源系统在多级市场下运营的理论与方法进行了深入的研究,并在市场出清电价预测、单个市场最优竞价策略、多级市场组合竞价策略等方面取得了研究成果,在市场均衡动态演化分析、市场交易形式设计和市场竞价风险分析等方面也有所突破,多项研究成果和结论在本书中首次出现。同时,相关研究成果已成功应用于市场环境三峡梯级的优化运营及其梯级电站上网竞价决策支持系统的设计和工程实践。

本书相关研究内容主要来源于国家自然科学基金“水电能源及其在电力市场竞争中的混沌演化与双赢策略研究(50579022)”和自然科学基金重点项目“市场条件下流域梯级水电能源联合优化运行和管理的先进理论与方法(50539140)”的研究内容,同时也包含了国家科技支撑计划课题“三峡及长江上游特大型梯级枢纽群联合调度技术(2008BAB29B08)”、科技部水利部公益性行业科研专项“面向生态调度的长江中上游复杂水库群多维调控策略研究(200701008)”、高等学校博士学科点专项科研基金项目“电力市场环境下水电能源优化运行的先进理论与方法(20050487062)”和三峡工程重点科研项目“电力市场环境下游梯级水电联合调度的优化及对策研究(CT-03-06-04)”等项目中的部分研究内容。

本书组织内容丰富、简捷精炼、重点突出。在写作方法上,遵循传统的层次结构,但不拘泥于利用这些结构帮助读者理解原理中的关键技术问题,而是采用独立于层次结构的方法来组织基本概念的讨论,特色鲜明,相信能够激发读者的兴趣。

周建中教授和张勇传院士负责全书大纲的拟定与审定工作,并具体负责统稿和定稿。此外,周建中教授主要负责第1、2、5、6、10章的撰写工作;张勇传院士主要负责第7、8、9章的撰写工作;曹广晶教授级高级工程师负责第6、7、12章的撰写工作;吴玮博士负责第4、7、8、9、11章的撰写工作;莫莉博士负责第1、10章的撰写工作;李清清博士研究生负责第5、6、12章的撰写工作;彭明鸿博士、游义刚博士研究生参与了第1、3章的撰写工作;李清清博士研究生和莫莉博士协助周建中教授工作并负责全书校订和插图绘制工作。书中的一些内容是作者在相关研究领域工作成果的总结,在研究工程中得到了相关单位以及有关专家、同仁的大力支持,同时,本书也吸收了国内外专家学者在这一研究领域的最新研究成果,在此一并表示衷心的感谢。

由于电力市场正在发展和完善中,且影响因素较多,许多理论与方法尚处于研究探索之中,加之作者水平有限,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者
2009年

目 录

序 前言

第 1 篇 面向电力市场的梯级电站竞价模式

第 1 章 电力市场基础	3
1.1 电力系统基本特征	4
1.2 电力市场基本原理与内涵	8
1.3 电力市场结构与运营	13
1.4 国内外电力市场现状及发展趋势	19
第 2 章 水电能源特征及梯级电站竞价模式	28
2.1 水电能源特征	29
2.2 梯级电站水力电力联系及其复杂适应系统	31
2.3 梯级电站在竞价上网中的优势	35
2.4 市场条件下梯级电站竞价上网面临的问题	38
2.5 梯级电站竞价基本概念与模式	44

第 2 篇 现货市场中梯级电站的竞价策略

第 3 章 现货市场中发电商的竞价策略	53
3.1 现货市场规则及其交易流程	53
3.2 发电商竞价策略及其优劣势分析	57
3.3 基于发电成本分析的竞价策略	59
3.4 基于预测竞争对手行为的竞价策略	63
3.5 基于市场情景模拟的竞价策略	64
第 4 章 市场出清电价预测及其在竞价中的应用	90
4.1 市场出清电价的形成机理及预测方法	90
4.2 基于人工神经网络的市场出清电价预测	94
4.3 基于 RBF 神经网络的市场出清电价预测	98
4.4 基于混沌时间序列分析的市场出清电价预测	106

4.5	基于市场出清电价预测的竞价策略	113
第5章	基于非合作博弈的梯级电站现货市场竞价策略	123
5.1	非合作博弈及其在市场竞价中的应用	124
5.2	基于收益矩阵的梯级电站竞价模型	126
5.3	基于产量竞争博弈的梯级电站竞价模型	128
5.4	基于序贯博弈模型的梯级电站竞价策略	130
5.5	基于供给函数均衡的竞价市场动态演化分析	138
5.6	基于市场出清电价预测和 Bayesian 博弈的竞价模型	147
第6章	基于合作博弈的梯级电站现货市场演化分析	151
6.1	合作博弈及其在市场竞价中的应用	151
6.2	梯级电站与单一购电方的演化博弈及其双赢策略	152
6.3	梯级电站与电网公司在现货市场中的合作博弈	156

第3篇 多级市场中梯级电站的组合竞价

第7章	基于无套利分析理论的区域电力市场电价均衡	169
7.1	无套利均衡分析理论概述	169
7.2	区域电力市场中影响发电商上网竞价的套利机会分析	171
7.3	区域市场中的无套利分析模型	172
第8章	基于套利定价理论的梯级电站上网竞价最优交易组合策略	178
8.1	套利定价理论分析	178
8.2	梯级电站竞价模式与组合交易方式	179
8.3	梯级电站在合约市场和日前市场下的最优交易组合	182
8.4	基于序贯决策的梯级电站多级市场最优电量分配	197
第9章	多种购买方下梯级电站跨区组合竞价策略	206
9.1	区域电力市场竞价规则	206
9.2	梯级电站跨区竞价中的风险	209
9.3	考虑市场风险的水电跨区组合竞价方法	211
9.4	梯级电站在不同区域市场中的日前组合竞价策略	214
第10章	基于金融衍生工具的梯级电站优化运行	218
10.1	电力市场金融衍生工具	218
10.2	面向电力市场的发电权交易特性	224
10.3	发电权委托代理交易模式分析	228
10.4	基于承包式的发电权委托代理交易模式	230

10.5	基于聘用式委托代理的发电权交易多赢策略·····	236
10.6	基于多任务委托代理的发电权交易激励机制·····	242
第4篇 三峡梯级电站日前市场竞价模型及其决策支持系统		
第11章	区域分时电价下三峡梯级电站日前市场发电竞价模型 ·····	253
11.1	区域电力市场分时电价制度·····	253
11.2	基于混合贝叶斯 SVM 的分时电价预测·····	255
11.3	三峡梯级电站跨区竞价分析·····	262
11.4	分时电价下三峡梯级日前发电竞价模型·····	264
第12章	梯级电站上网竞价决策支持系统设计及实现 ·····	270
12.1	梯级电站上网竞价决策支持系统设计原则·····	271
12.2	上网竞价决策支持系统需求分析和功能设计·····	272
12.3	上网竞价决策支持系统逻辑结构·····	280
12.4	上网竞价决策支持系统集成与实现·····	280
参考文献 ·····		283
附录A	市场状态变量对需求函数斜率的导数 ·····	293
附录B	市场状态变量对发电商成本函数二次项系数的导数 ·····	295

第 1 篇 面向电力市场的梯级 电站竞价模式

针对电力市场环境下流域梯级水电能源系统的优化运行,分析了梯级水电能源及其互联电力系统的基本特征,阐述了电力市场基本原理,回顾了国内外电力市场改革历程,分析并揭示了电力市场的发展规律;结合梯级电站复杂适应系统的基本特征,分析了梯级电站在市场竞价中的优势、面临的问题及其解决方案,提出了面向电力市场的梯级电站竞价基本模式,为市场竞争条件下流域梯级水电能源系统制定市场战略提供了决策依据。

第 1 章 电力市场基础

电力工业的发展是一个不断打破地域限制,提高能源利用效率,优化能源资源配置的过程。从地方分散电网独立运行到区域电网互联,逐步呈现出行业性垄断经营局面。全国互联大电网的形成,使电力工业具备了打破行业壁垒,大范围调配电力资源的基础。然而,随着能源供需关系的演化和人们对经济规律认识的深化,尤其是洁净、新能源开发带来的全球性低碳经济的发展,使得大电网背景下电力行业的垄断经营方式越来越不适应电力工业的发展和资源优化配置的迫切需求。人们开始探求在保持大电网优势下进一步提高电力工业运行效率的途径。电力市场化改革正是一种有效途径,它通过建立商业化的电力企业运作方式,并在电力系统各个环节引入竞争,以形成合理的电价体系,能有效地解决垄断经营的体制性缺陷,提高电力系统各环节的运行效率,从而进一步实现全国范围内的资源优化配置,促进电力工业健康发展。

20 世纪 80 年代至今,世界上许多国家先后进行了电力体制改革,开展电力市场培育和建设,其中包括英国、美国、澳大利亚等西方工业发达国家和以中国为代表的一些发展中国家。这些国家在电力系统的发、输、配和用电各个环节放松或解除了管制,并实现了电力系统多级市场的竞争。市场机制特别是其核心电价机制在能源资源配置中起着基础性的作用,一个动态的电力电量市场将会对电力系统优化运营方式产生直接影响。特别是竞争机制的引入,为各国电力工业发展注入了新的活力,不仅提高了电力系统各个环节的效率,而且促使终端电价下降,降低了电力用户的购电成本,保护了公众的消费权益。

研究表明,电力市场化确实能够带来许多经济效益,如降低发电成本、提高供电水平、实现公平调度和吸引新投资等。但是,随着电力市场化改革的深入,一些新的问题也不断凸显。如电力工业(尤其是发电行业)的投资规模过大,从而形成较强的市场进入壁垒;电力商品的一些物理特征(如电力不可大量储存和电网的物理约束等),决定了电力市场不可能是完全竞争的,其市场形态与一般商品市场存在本质的不同,更接近于寡头垄断。在这样的电力市场中,发电商可通过拥有市场力,实施以自身利润最大化为目标的各种策略性行为。因此,发电商对市场力的滥用,必将损害电力市场的竞争程度,最终导

致电价上涨,从而造成电力市场的不稳定。美国加州电力市场危机,深刻揭示了电力市场的特殊性:市场中的商品(即电能)无法大规模存储,其生产和消费必须在瞬间完成,以达到实时平衡;市场中的用户须不受地理时间等因素的影响,要求在电网中任意取用电能;电网的物理特性决定了功率的流动方向,它不能按人们的意愿去任意改变;电网是电力传输的唯一通道,也是电能实现交易的唯一平台等等。此外,电力市场改革不仅受到垄断体制受益方的阻挠,而且面临着巨大的风险。一方面,电力工业体制改革造成电力系统各方利益的重新分配,原有体制下因垄断而受益的市场主体缺乏进行改革的动力,需要强有力的法律政策来督促和监管。另一方面,电力市场改革尚未形成成熟的理论体系,各国需要承受改革带来的风险,加州电力市场危机就是一个典型的例子。这些问题对各国电力市场改革带来了极大的挑战。

经过多年的探索和实践,以英国、美国为代表的工业发达国家的电力市场改革取得了巨大的成功,其他正在推行电力市场改革的国家也取得了一些宝贵的成果。借鉴这些国家电力市场改革的经验,可以有效地指导我国电力市场建设,明确改革方向,从而更好地推进我国电力工业的市场化进程。

本章在介绍电力系统基本特征和电力市场基本概念、原理和结构的基础上,回顾国内外电力市场改革历程,分析电力市场改革的发展趋势,总结发展规律和改革经验,以期为我国电力市场建设提供借鉴和指导。

1.1 电力系统基本特征

1.1.1 电力系统基本结构

电力系统是指由发电、输电、变电、配电和用电等环节以及相应的辅助设备按照规定的技术和经济要求组成的电能生产与消费系统。其结构如图 1-1 所示。

电力系统按组成部分功能的不同,可划分为发电侧、输(配)电侧和用电侧。其主要功能是将自然界的一次能源通过发电动力装置及电厂辅助生产系统转化成电能,经输、变电系统及配电系统将电能供应到各负荷中心及用户,再通过各种用电设备转换成动力、热、光等不同形式的能量,为国民经济和人民生活服务。

电力系统运行涉及电力生产、传输、消费等方面,具有以下基本特点:

(1) 电能不能大规模存储,发电、变电、输电和用电同时进行。

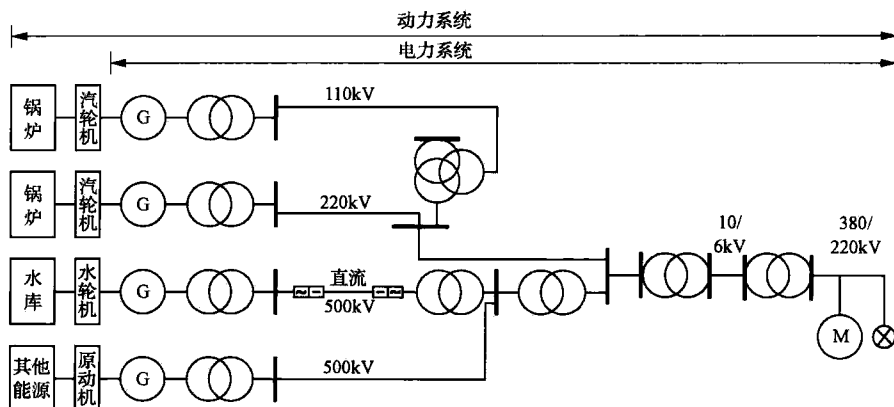


图 1-1 电力系统结构示意图

(2) 电力系统暂态过程持续时间短,必须采用自动化装置进行状态监控。

(3) 电力系统对电能质量要求高,系统电压、频率、波形均须严格遵守国家标准。

电力系统的基本任务是安全、可靠、优质、经济地生产、输送和分配电能。电能作为一种特殊商品,与一般商品的不同之处在于:首先,电力行业具有公共服务性,中断供电或供给不足会给国民经济和广大用户造成巨大损失,因此,实行电力市场化改革必须以安全、可靠供电为前提,不仅需要保证实时电力供需平衡,而且必须留有足够的发电备用容量,以跟随负荷变化和应对突发事件。其次,电能不能大规模长时间储存,其生产和消费同时进行,需要电力调度机构统一实时调度。电能除遵循一般商品的价值规律外,还具有显著的技术和经济特性。

1.1.2 电能的技术特性

电能在生产、传输、分配和消费过程中,具有以下技术特性:

(1) 电能产量受限于电厂生产能力和用户消费能力,即生产和消费必须保持平衡。

(2) 电能传输必须满足克希霍夫定律,保证网络各节点功率平衡。

(3) 功率潮流的方向和数值取决于节点电压和传输线路的物理参数,网络传输线路具有发热、电压降落和稳定等潮流极限。

(4) 为保证电能生产和消费的物理可行性,电力传输网络结构需要满足严格的物理运行约束条件,否则系统会发生阻塞。

1.1.3 电能的经济特性

电能作为商品,具有以下经济特性:

1. 不易储存性

与其他商品不同,电力商品生产和销售必须同时完成。而且,由于各种发电机组都具有起、停时间要求,使得供给只能被动地响应并总是滞后于需求变化。在电力市场条件下,电力商品不易储存的特性必然引起价格的大幅度波动,尤其当需求接近供给上限时,市场价格可能大幅攀升。

2. 缺乏弹性

由于电力商品不易储存以及电力开发和营运的技术属性,电力供求在短期呈现出较强的刚性,而在长期内表现出一定的滞后调整效应。由于电力实际需求变化范围很大,备用容量难以及时应对市场需求的急剧变化。因此,当需要使用备用容量时,供给增加将随着备用容量的属性而呈阶梯状。但在备用容量使用完后,供给能力达到极限,供给曲线演变为一条垂直于产量线的直线,短期内将不随价格变化而变化。同时,由于我国销售电价一直采用国家制定的标准,电力用户缺乏调整需求的意识,电力需求弹性很低。为了增强电力供给和需求的弹性,一方面要扩大装机容量,保证足够的电力供给;另一方面要加强对用电侧的管理和控制,提高电力需求弹性。

3. 成本特性

发电成本受一次能源价格影响较大,使电能价格具有极强的波动性。如我国火力发电厂的燃料成本约占发电成本的70%,燃料价格波动对其发电成本影响极大。

4. 电价时空差异性

不同类型电力能源的发电成本及其影响因素有较大差异:水电出力受水文径流影响,呈现较强的季节性;火电受燃料价格及其运输距离的影响;核电、风电等新能源受技术条件和投资规模影响;各地区电源结构不同,使得电力成本相差较大,最终导致终端电价不同。同时,由于电能的发、输、配、用等环节必须实时平衡,且负荷随季节和时段变化较大,导致电价具有极大的时间差异性。

5. 准公共特性

电力商品不同于一般商品,它既具有普通商品的特性,同时作为社会生产、发展的必要能源,还具有公共物品的特征。公共物品是指相对私人物品,在消费或使用上不具有竞争性的物品。一般可分为两类:纯公共物品和准公共物品。纯公共物品是指既不具备竞争性,又不具备排他性的公共物品。准公共物品是指不具有竞争性的公共物品。前者无法定价,后者则可被定价。由于电力生产必须满足社会电力需求,电力商品具有准公共物品的特性。

由于电力产品的二重性,它既可以由政府来提供,也可以由市场来提供。这种产品特性决定了电力难于采用完全市场化方式进行经营。由于电力产品的准公共特性,为了确保电力市场竞争的高可靠性,电价必须受到政府管制。

准公共物品的一个显著特点是“拥挤性”,即当消费者数量超过拥挤点之后,产品消费就会产生竞争性,新增消费者将减少原有消费者的效用,使社会边际成本不断上升,最终达到容量极限,再增加额外消费者的边际社会成本将趋于无穷大,如图 1-2 所示。其中,直线 DD 表示需求数量,曲线 MSC 和 MPC 分别表示社会边际成本和个人边际成本。当需求超过 Q_1 时,每个消费品的社会边际成本包含个人边际成本和因为拥挤增加的成本或费用。此时的边际成本曲线应该采用 MSC 代替 MPC 。由图 1-2 中曲线的变化趋势可以看出,当需求超过一定数量并继续增加时,社会边际成本将不断增加,而且始终高于个人边际成本,表现为 MSC 曲线位于 MPC 曲线上方。

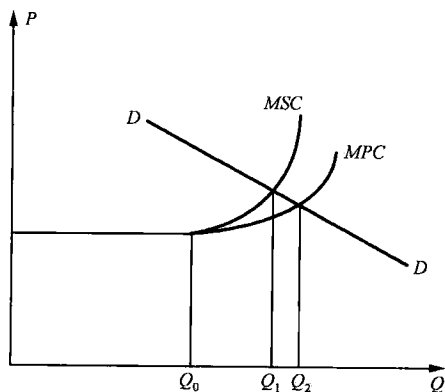


图 1-2 公共产品实际边际成本

电力产品的准公共物品特征体现在电力的“拥挤性”上。在实际电力系统