

■ 国外电力名著译丛

Restructured Electric Power Systems

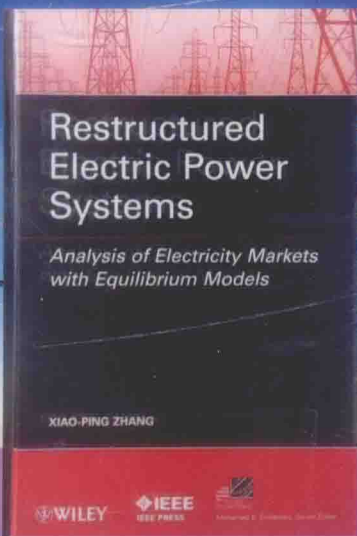
Analysis of Electricity Markets  
with Equilibrium Models

# 电力系统重组

## ——基于均衡模型的电力市场分析

[英] XIAO-PING ZHANG 主编

宋燕敏 王霄雁 李晓露 译



WILEY

IEEE  
IEEE PRESS



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司  
电力科技著作出版项目

■ 国外电力名著译丛

**Restructured Electric Power Systems**

**Analysis of Electricity Markets  
with Equilibrium Models**

# 电力系统重组

## ——基于均衡模型的电力市场分析

[英] XIAO-PING ZHANG 主编

宋燕敏 王霄雁 李晓露 译

WILEY

 **IEEE**  
IEEE PRESS



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书主要概述了电力市场行为和市场力分析与评价方法的最新进展——电力市场均衡模型,讨论了电力市场均衡模型的近期研究和进展,展望了这些模型及其计算技术在电力市场分析中的应用前景。第1~2章介绍了电力系统和电力市场的基础知识及其分析方法和工具;第3章综述了用于分析市场成员市场行为和市场力的各种电力市场均衡模型;第4章描述了电力市场均衡模型的公式,综述了物理、商业、经济模型及其用途;第5章提出了混合伯特兰德—古诺模型和伯特兰德模型并分析了其应用情形;第6章用一个非线性内点算法进行了电力市场均衡分析;第7章总结并提出了市场力建模的新方法及其应用。

本书适用于高校师生及广大工程技术人员阅读,可为电力系统、电力系统经济学、能源政策等专业领域的电力工程师、大学教授、本科生和研究生提供参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

电力系统重组:基于均衡模型的电力市场分析/(英)张小平主编;宋燕敏,王霄雁,李晓露译.—北京:中国电力出版社,2016.7

书名原文:Restructured Electric Power Systems: Analysis of Electricity Markets with Equilibrium Models

ISBN 978-7-5123-8815-4

I. ①电… II. ①张… ②宋… ③王… ④李… III. ①电力市场-市场分析 IV. ①F407.61

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第011718号

北京市版权局著作权合同登记

图字:01-2013-5430号

Title: Restructured Electric Power Systems: Analysis of Electricity Markets with Equilibrium Models by Xiao-Ping Zhang, ISBN: 978-0-4702-6064-7/0470260645

Copyright © 2010 by Institute of Electrical and Electronics Engineers.

All Rights Reserved. This Translation published under license. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with China Electric Power Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book maybe reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

版权所有。本翻译版本经 John Wiley & Sons Ltd. 授权出版。翻译的准确性完全取决于中国电力出版社, John Wiley & Sons Ltd. 不予负责。未经原版权持有人 John Wiley & Sons Ltd. 的书面许可,不得以任何形式复制本书内容。

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2016年7月第一版 2016年7月北京第一次印刷  
700毫米×1000毫米 16开本 18印张 497千字  
印数0001—3000册 定价68.00元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

随着“能源互联网”概念的提出，国际区域间的能源合作将加强，各洲各国将利用相互之间的资源互补优势，促进更大范围的可再生能源资源开发与消纳。构建全球能源互联网一方面需要构建坚强网架结构，逐步实现更广域的电力互联；另一方面则需要建立高效的电力交易运营模式，在各洲主要国家、地区之间实现更大范围的能源互动与输送。

2015年3月15日，中共中央、国务院出台了《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》（中发〔2015〕9号），重启了沉寂十多年的电力体制改革。按照9号文要求，发电侧和售电侧实行市场开放准入，引入竞争，放开用户选择权，将形成多买多卖的市场格局，进一步培育建设电力市场、健全完善市场机制，使市场在电力资源配置中发挥决定性作用。随着电力体制改革的逐步深入，电力市场主体的多元化竞争将引发电力市场的市场均衡问题。为了使已有均衡分析方法适应电力市场的规则和灵敏度，国内外进行了大量的研究工作，成果散见于论文文献之中。同时，在即将构建的市场结构和市场体系中，为提高电力市场效率还需对电力市场行为和市场力进行分析，这是电力市场领域一个极具挑战性的课题。

*Restructured Electric Power Systems: Analysis of Electricity Markets with Equilibrium Models* 一书系统地阐述了电力市场行为和市场力分析与评价的最新成果——电力市场均衡模型理论，其作者具有深厚的电力市场与博弈论应用的研究经验，资料主要来源于作者们深入参与的研究与工程开发项目。该书内容反映了电力市场均衡模型的近期研究和进展，系统全面地论述了相关的主要理论和分析方法，系统梳理了分析与评价电力市场行为与市场力的模型与方法，并预测了这些模型及其计算技术在电力市场分析中的应用前景。自英文版出版以来，该书已经在学术界和行业内产生了重大的反响，为电力系统、电力系统经济学、能源政策等专业领域的电力工程师、大学教授、本科生和研究生提供了宝贵的借鉴和参考，是近年来不可多得的优秀著作。在我国新一轮电力体制改革的大背景下，翻译该书对我国电力市场体系构建、市场交易及运营模式设计既有较高的学术价值，又有较大的实践参考意义。

本书第1章由宋燕敏、王霄雁共同翻译，第2章由王霄雁、宋燕敏共同翻译，第5章由李晓露翻译，第3、4、6、7章由宋燕敏、王霄雁、李晓露共同翻译。宋燕敏、王霄雁、李晓露共同对全书进行了审订。特别感谢原书作者张小平

博士在翻译过程中给予的大力支持。

本书的部分内容涉及电力系统和电力市场的专业理论和技术，一些专业术语目前国内尚无统一译法，这些因素给本书的翻译带来一定的困难，加之译者水平有限，书中难免会有不准确甚至错误之处，望广大读者予以批评指正！

译 者

2016年2月

电力工业解除管制使电力生产从垄断进入到竞争市场时代。电力生产的自由化引发了电力工业的市场均衡问题。为了使数学上的均衡分析方法能够适应电力市场的规则和灵敏性，学术界已经开展了许多相关研究。随着电力市场的发展，分析电力市场行为和市场力的相互作用以提高电力市场效率是一个极富挑战的重要任务。

本书的特殊贡献是概述电力市场行为和市场力分析与评价方法的最新进展，即电力市场均衡模型，同时讨论了这些模型在实际电力市场分析中的应用。本书主要反映电力市场均衡模型的近期研究和进展，展望了这些模型及其计算技术在电力市场分析中的应用前景：

(1) 电力系统基础知识，如系统结构与演变、系统运行与控制的分析技术，以及在电力市场环境下的的重要性。

(2) 从电力市场实践中总结的先进电力市场设计与运行技术。

(3) 回顾了电力市场行为和市场力的问题，概述了用于市场行为与市场力分析的电力市场均衡模型。

(4) 提出了带均衡约束的数学规划（MPEC）和带均衡约束的均衡问题（EPEC），论述了计算电力市场均衡问题的先进技术，以及求解电力市场均衡问题的挑战与新进展。

(5) 提出了电力市场均衡模型在电力市场建模与分析中的应用。

第1章首先讨论了电力系统基础知识，概述了电力系统的结构与演变。其中新的进展包括可再生能源发电的并网、新的运行与控制模式（如微电网）、虚拟电厂、插入式混合动力汽车以及超级（含特高压）电网的发展，这些将对电力系统和电力市场运营产生深刻影响。随后提出了电力系统运行与控制的概念、分析方法和工具，并扼要论述其在电力市场环境中的影响。最后，讨论了通过SCADA/EMS系统实现的电力系统实时控制，以及未来电力市场发展密切相关的运行与控制技术发展趋势。

第2章回顾了电力系统解除管制的历史，论述了电力市场的结构与演变；阐述了电力市场设计的关键目标和基本原则，尤其是先进的标准市场设计（SMD）框架、电力市场运营及其成功标准；此外，提出了支持电力市场运营的计算工具。本章主要探讨了从实际电力市场设计与运营中提炼出的电力市场结构、设计及运营的发展现状。

第3章论述了与电力市场发展相关的市场力问题。综述了用于分析市场成员市场行为和市场力的各种电力市场均衡模型，包括数学规划中相关的、带均衡约束数学规划（MPEC）和带均衡约束均衡问题（EPEC）的发展；概要描述了电力市场均衡计算所面临的挑战；论述了电力市场均衡问题研究的最新进展，并提出了未来的研究需求。

与其他研究领域相同，为使模型易于处理，必须对一些细节进行某种程度的抽象。然而，在电力市场中的处理尤为困难，一部分原因是由于电力市场尚在经验积累之中，另一部分原因则是由于电力市场具有其他市场所没有的一些特性。第4章描述了电力市场均衡模型的公式，区分了物理、商业及经济模型。基于使模型易于处理的多项基本假设，综述了这些模型的用途。

现有的大多数描述发电商之间竞争的纳什—古诺模型，都假设各发电公司按纯古诺方式或纯伯特兰德方式，响应独立系统运营商的输电决策。而该模型并不适用于电力市场中子网间断面潮流经常处于饱和，且各子网内阻塞状况不可预测的情形。为此，第5章提出了两种处理方法。第一种是混合伯特兰德—古诺模型，假设各发电公司在子网间输电量方面按照古诺方式考虑，但是在子网内输电价格方面按照伯特兰德方式考虑。第二种方法是伯特兰德模型，其中经常会阻塞的输电线路被设定为“常识性约束”，所有市场成员（包括ISO）和发电公司视其为等式约束。在仿射需求函数和二次成本函数中，这些模型的市场均衡变成双对称半正定矩阵的混合线性互补问题。

第6章用一个非线性原—对偶内点算法进行电力市场均衡分析，以求解具有全交流电网模型、基于竞标线性SFE电力市场模型。这个算法基于交流输电模型，全面考虑了运行的各个方面，包括发电容量限值、母线电压限值、输电线路约束、网损、变压器分接头变比控制，尤其是无功的影响。在提出的市场均衡算法中，分析了电网控制（如电压控制、变压器分接头变比调节）对市场均衡的影响。

为了应对重组电力市场对输电规划的新需求，加州独立系统运营商（CAISO）提出了一个输电系统升级的经济效益评估方法（见第7章）。所考虑的经济效益包括随着市场价格变化而降低的电厂建设与运营成本。第7章所述方法在计及历史竞标行为模式下，解释了输电系统升级如何通过提高发电商的地域市场规模来抑制市场力。该方法遵循五个基本原则：多角度的考虑（消费者、发电商、输电运营商、整个社会）；全电网模型；计及发电商策略行为的市场定价；不确定性的建模，包括作为防范极端事件的输电系统价值；发电、需求和输电三类资源如何相互替代。本章首次将该方法全面应用于已提议的帕洛弗迪—德弗斯第二回输电线路（PVD2）升级项目的评估，并就案例结果对该方法进行了总结。本章总结和应用于市场力建模的新方法，以及描述未来场景概率并分析不确定性影

响的新方法。该项目大部分效益来自市场力的抑制。

本书的资料主要源于作者们深入参与的研究与工程开发项目。本书可作为电力系统、电力系统经济、能源政策等专业领域的电力工程师、大学教授、本科生和研究生的学习参考用书，也可用于研究生课程以及行业培训课程。

最后，非常感谢所有编写人员的精诚合作，特别是 Ross Baldick、Benjamin Hobbs、Shmuel Oren 和 David Sun 为本书投入的热情和及时反馈，没有他们，不会有本书的面世。非常感谢 IEEE 出版社和 Wiley 的工作人员在本书编写过程中的耐心和友好的支持。我还要特别感谢电力工程资深编辑 Mohamed El-Hawary 博士，在本书的编写过程中他提出了很好的意见和建议。最后，我要对我的妻子 Zhong、女儿 Dorothy、儿子 George 在本书撰写过程中的耐心、理解和支持致以衷心的感谢。

张小平

2010 年 6 月于英国伯明翰



## 本书主编简介

张小平 (Xiao-Ping Zhang), 分别在 1988 年、1990 年、1993 年获东南大学电气工程学士、硕士和博士学位。1993~1998 年工作于中国电力科学研究院, 从事 EMS/DMS 高级应用软件研发。1998~1999 年为曼彻斯特理工大学 (UMIST) 访问学者。1999~2000 年为德国多特蒙德大学的亚历山大-冯-洪堡研究员。至 2007 年初为英国华威大学讲师和副教授。现为英国伯明翰大学电力系统教授, 能源研究院智能电网总监, 英国伯明翰国家储能中心副主任。2006 年出版的《灵活交流输电系统: 建模与控制》专著的作者之一, 2012 年该专著第二版发行。IEEE 高级会员及 CIGRE<sup>①</sup> 会员, IEEE PES<sup>②</sup> 杰出讲座计划讲师。2011 年 6 月, 提出“全球能源电力互联网”(Global Power & Energy Internet) 的概念。2015 年 7 月, 在 IEEE PES 年会提出了“世界能源组织 (World Energy Organization, WEO)”的概念。

## 本书参与者简介

Mohamed Labib Awad, 博士, 曾任 CAISO<sup>③</sup> 电网规划部 (DGP) 的电网规划主管工程师, 现为开罗大学工程学院教师。

Ross Baldick, 德州大学奥斯汀分校电气与计算机工程教授, 澳大利亚悉尼大学理学学士学位 (物理与数学)、工学学士学位 (电气工程), 加州大学伯克利分校硕士与博士学位 (均为电气与计算机科学)。1991~1992 年为劳伦斯伯克利实验室博士后, 从事输电政策研究。1992~1993 年为伍斯特理工学院副教授。哈佛大学约翰·F·肯尼迪政府学院哈佛电力政策组的研究员, 加州大学能源研究院访问学者。发表论文 40 余篇, 研究方向为电力系统。目前研究领域涉及电力系统运行的优化和经济学理论、解除管制的输电公共政策和技术问题, 以及电力系统的禁恐鲁棒性。IEEE 会员。

Keith E. Casey, 博士, CAISO 市场监视部部长。1997 年获加州大学戴维斯分校环境与资源经济学博士学位。加入 CAISO 之前, 在加州大学戴维斯分校进行博士后研究并讲授环境经济学。

Kwok W. Cheung, 1986 年获台湾成功大学学士学位, 1988 年获德州大学

---

译者注: ① 国际大电网会议。

② IEEE 电力与能源协会。

③ 加州独立系统运营商。

阿灵顿分校硕士学位，1991年获伦斯勒理工学院博士学位，均为电气工程方向。1991年加入 AREVA T & D<sup>①</sup>（前身为 ESCA），从事动态安全分析。自1995年起，从事电力批发市场应用和系统的开发工作。目前为全球电力市场管理系统的研发总监。研究领域包括基于优化的市场应用、电力系统安全和智能系统。IEEE 高级会员，华盛顿州注册工程师。

Glenn Drayton，新西兰基督城坎特伯雷大学运筹学（荣誉）学士和管理学博士。在开发 PLEXOS 电力系统仿真软件的 Drayton Analytics 公司任 CEO。工作经验涵盖电力市场设计、市场建模、运筹学和统计、微观经济分析应用等。

Anna S. Geevarghese，原 CAISO DMA<sup>②</sup>资深生产成本分析师和市场监督委员会（MSC）联络员，后为软件部门全球能源决策的市场分析产品总监，斯坦福大学工程经济系统硕士。

Benjamin F. Hobbs，美国约翰霍普金斯大学地理与环境工程系（DoGEE）教授。加州 ISO 市场监督委员会成员，ECN<sup>③</sup>政策研究部门的科学顾问。康奈尔大学环境系统工程博士学位。IEEE 会员。

Jeffrey C. Miller (M.)，原 CAISO 电网规划部区域输电经理。

Shmuel S. Oren，加州大学伯克利分校工业工程和运筹学系 Earl J. Isaac 讲座教授，电力系统工程研究中心（PSERC）伯克利负责人。具有 25 年电力工业学术研究与咨询经验，发表了多篇电力市场设计、资源优化和风险管理等方面的论文。担任美国和多国私有/政府组织的顾问。目前为德克萨斯州公共事业委员会（PUCT）市场监督司、加利福尼亚州公共事业委员会（CPUC）能源司以及 ISO-NE<sup>④</sup>市场监管的高级顾问。获斯坦福大学工程经济系统博士学位，IEEE 及 INFORMS<sup>⑤</sup>会员。

A. Farrokh Rahimi，博士（S. M.），原 CAISO 市场与产品开发的首席市场工程师，现为 Open Access Technology International 公司市场设计与咨询副总裁。获麻省理工学院电力工程博士学位。

Gary W. Rosenwald，分别于 1992 年和 1996 年获华盛顿大学电气工程学士和博士学位。2001 年加入 AREVA T & D 之前，在 ABB 从事机组组合和市场参与软件解决方案研究。目前研究重点为解除管制电力市场解决方案的开发与实现。IEEE 会员。

Anjali Y. Sheffrin，博士，CAISO 市场与产品开发首席经济师兼总监，有

---

译者注：① 阿海珅输配电公司。

② CAISO 市场分析部。

③ 荷兰能源研究中心。

④ 新英格兰独立系统运营商。

⑤ 管理科学与运筹学协会。

26年电力工业管理经验。目前管理市场设计方向、开发基础设施和监管政策、设计CAISO批发电力市场的新产品与服务等。加入CAISO之前，为萨克拉门托城市公用事业区的电力系统规划经理，管理一个由40名工程师、经济学家、统计学家、金融分析师组成的部门，该部门负责准备输电、发电和需求侧工程的战略商业计划。1981年获加州大学戴维斯分校经济学博士学位。

David I. Sun，积极参与许多全球领先的电能与输电市场的设计与实施，包括即时访问信息系统(OASIS)、新西兰、澳大利亚、新英格兰、PJM、ERCOT、MISO、SPP以及中国的华北电网(NCG)<sup>①</sup>。在从事竞争性电力改革之前，曾进行电力系统安全及优化应用的开发。发表多篇专业论文，包括IEEE电力与能源协会的一篇获奖OPF论文。获德州大学博士学位、伦斯勒理工学院学士和硕士学位。现为华盛顿州ALSTOM<sup>②</sup>能量管理业务的首席科学家，IEEE会员。

Eric Toolson，原为Pinnacle咨询公司的顾问，现为Plexos解决方案有限责任公司的顾问。

Xing Wang，1991年获华北电力大学电气工程学士学位，1996年获中国电力科学研究院(CEPRI)电气工程硕士学位，2001年获英国布鲁奈尔大学电气工程博士学位。1991~1998年于CEPRI从事能量管理系统的开发与工程实施。2001年加入AREVA T&D。此后一直从事电力市场管理系统的开发及解除管制电力市场的实施。IEEE高级会员。

Frank A. Wolak，博士，斯坦福大学霍尔布鲁克工作教授，CAISO MSC<sup>③</sup>主席。获哈佛大学经济学博士学位。专业领域为产业组织理论和计量经济学理论。加州大学能源研究院访问学者、美国国家经济研究局(NBER)副研究员。

Jian Yao，摩根士丹利资本国际公司(MSCI Barra)伯克利研究部门高级研究员。曾是资金管理团体的政府国债市场和外汇(FX)高级量化分析师，Oracle公司高级规划与计划安排产品软件工程师，IBM的B2B供应链集成研究助理。主要研究领域为优化，目前研究重点为金融优化和风险管理。获加州大学伯克利分校工业工程和运筹学博士学位、北卡罗来纳大学夏洛特分校计算机科学硕士学位、上海交通大学机械工程学士学位。

Mingxia Zhang，博士，曾任CAISO市场监视部的市场监视专家主管，现为独立顾问。获加州大学戴维斯分校经济学博士学位。

---

译者注：① 美国宾夕法尼亚-新泽西-马里兰联合电力市场(Pennsylvania-New Jersey-Maryland, PJM)、德州电力可靠性委员会(Electric Reliability Council of Texas, ERCOT)、中部独立系统运营商(Midcontinent Independent System Operator, MISO)、西南电力库(Southwest Power Pool, SPP)。

② 阿尔斯通。

③ CAISO市场监督委员会。

译者序

原版前言

<b>1</b>	<b>电力系统基础知识</b> .....	1
1.1	电力系统简介 .....	1
1.2	发电 .....	2
1.2.1	传统发电厂 .....	2
1.2.1.1	火力发电厂 .....	2
1.2.1.2	联合循环燃气电厂 .....	2
1.2.1.3	核电站 .....	3
1.2.2	可再生能源发电技术 .....	4
1.2.2.1	风力发电 .....	4
1.2.2.2	海洋能发电 .....	5
1.2.2.3	光伏发电 .....	5
1.2.2.4	生物质发电 .....	6
1.2.2.5	地热发电 .....	6
1.2.2.6	氢能发电 .....	6
1.3	电力系统结构 .....	7
1.3.1	结构 .....	7
1.3.2	互联电网的益处 .....	8
1.4	特高压输电 .....	9
1.4.1	特高压输电的概念 .....	9
1.4.2	超高压输电和特高压输电的经济比较 .....	11
1.4.3	特高压交流输电技术 .....	12
1.4.4	特高压直流输电技术 .....	12
1.4.5	中国特高压输电 .....	13
1.4.6	其他国家特高压输电 .....	14
1.5	电力系统模型 .....	15
1.5.1	输电线路 .....	15

1.5.2	变压器	16
1.5.3	负荷	17
1.5.4	同步发电机	17
1.5.5	高压直流输电 (HVDC) 系统和灵活交流输电系统 (FACTS)	17
1.6	潮流分析	18
1.6.1	潮流分析的节点分类	18
1.6.1.1	平衡节点	18
1.6.1.2	PV 节点	18
1.6.1.3	PQ 节点	18
1.6.2	潮流计算公式	19
1.6.3	牛顿—拉夫逊潮流算法	20
1.6.4	快速解耦法	21
1.6.5	直流潮流算法	22
1.7	电力系统最优运行	23
1.7.1	安全约束经济调度	23
1.7.1.1	不计网损的经典经济调度	23
1.7.1.2	具有安全约束的经济调度	25
1.7.2	最优潮流	25
1.7.2.1	最优潮流优化技术的发展	25
1.7.2.2	最优潮流公式	27
1.7.2.3	非线性内点最优潮流算法	28
1.8	电力系统运行与控制——SCADA/EMS	31
1.8.1	SCADA/EMS 简介	31
1.8.2	传统电力调度控制中心的 SCADA/EMS	33
1.8.3	电力调度控制中心 SCADA/EMS 的最新发展趋势	33
1.8.3.1	新环境	33
1.8.3.2	先进的软件技术	34
1.9	有功与频率控制	35
1.9.1	频率控制和有功备用	35
1.9.2	自动发电控制 (AGC) 的目标	36
1.9.3	涡轮机—发电机—调速器系统模型	36

1.9.4	单机系统的 AGC	38
1.9.5	两区域系统的 AGC	38
1.9.6	电力市场中的频率控制与 AGC	39
1.10	电压控制与无功管理	40
1.10.1	概述	40
1.10.2	电力系统元件的无功特性	41
1.10.3	电压和无功控制装置	41
1.10.4	电压和无功最优控制	42
1.10.5	电力市场中无功服务的规定	43
1.11	电力电子技术在电力系统控制中的应用	43
1.11.1	灵活交流输电系统 (FACTS)	43
1.11.2	基于 FACTS 的电力系统控制	44
	参考文献	45

## 2 电力系统重组与电力市场

2.1	电力系统重组的历史	50
2.1.1	纵向垂直一体化的电力公司和电力库	50
2.1.2	世界范围的电力工业重组	51
2.1.2.1	北欧国家	51
2.1.2.2	英国	52
2.1.2.3	欧洲大陆	52
2.1.2.4	新西兰	53
2.1.2.5	澳大利亚	53
2.1.2.6	美国	53
2.2	电力市场的结构	54
2.2.1	各利益相关者	55
2.2.2	电力市场的演变	56
2.2.3	市场与可靠性的协调	58
2.2.4	SMD 架构	59
2.2.4.1	输电服务	60
2.2.4.2	电能市场	60
2.2.4.3	辅助服务市场	60

2.2.4.4	市场监管和市场力抑制	60
2.3	电力市场设计	61
2.3.1	电力市场设计目标	61
2.3.1.1	电力系统安全可靠运行	61
2.3.1.2	市场成员的风险管理工具	61
2.3.1.3	公开透明的市场运营	62
2.3.1.4	市场化进程的分步实施	62
2.3.2	电力市场设计原则	62
2.3.2.1	建立电能交易机制	62
2.3.2.2	输电服务的开放准入	63
2.3.2.3	与市场运营相协调的系统运行	63
2.3.3	电能市场设计	64
2.3.4	金融输电权市场设计	65
2.3.5	辅助服务市场设计	66
2.4	电力市场运行	67
2.4.1	电力市场成功运行的准则	67
2.4.1.1	电力系统可靠性	67
2.4.1.2	市场透明度	68
2.4.1.3	金融确定性	69
2.4.1.4	市场运营效率	69
2.4.2	典型的业务流程时间表	70
2.4.2.1	新西兰电力市场	70
2.4.2.2	美国 PJM 电力市场	72
2.5	电力市场的计算工具	76
2.5.1	SCED 和相关的市场业务功能	77
2.5.1.1	经典最优潮流 (OPF)	77
2.5.1.2	用于市场出清的 SCED	78
2.5.1.3	电能与辅助服务的联合优化	79
2.5.1.4	SCED 算法示例	80
2.5.2	基于优化的机组组合	81
2.5.2.1	面向市场的机组组合问题	81
2.5.2.2	机组组合方法的进展	82

2.5.2.3	SCUC 示例：可靠性组合	84
2.5.2.4	SCUC 的性能考虑	85
2.5.3	系统实现	86
2.5.4	未来的技术发展	87
2.6	小结	88
	参考文献	88

<b>3</b>	<b>电力市场均衡问题和市场力分析</b>	92
3.1	博弈论及其应用	92
3.2	电力市场和市场力	92
3.2.1	电力市场的类型	92
3.2.1.1	基于报价的竞拍市场/PoolCo/现货市场	92
3.2.1.2	双边协议、远期合同和差价合约	94
3.2.2	竞争的类型	95
3.2.2.1	完全竞争	95
3.2.2.2	不完全竞争或寡头垄断控制下的竞争	95
3.3	市场力的监视、建模和分析	96
3.3.1	市场力的概念	96
3.3.2	市场力的衡量技术	96
3.3.2.1	价格—成本边际指数	97
3.3.2.2	赫芬达尔—赫希曼指数 (HHI)	97
3.3.2.3	通过仿真分析的定价行为评估	97
3.3.2.4	寡头垄断均衡分析	97
3.3.3	寡头垄断均衡模型	98
3.3.3.1	伯特兰德均衡	98
3.3.3.2	古诺均衡	98
3.3.3.3	供给函数均衡 (SFE)	99
3.3.3.4	斯坦克尔伯格均衡	99
3.3.3.5	猜测供给函数均衡	99
3.3.4	使用均衡模型的市场力建模	99
3.4	电力市场中均衡模型的应用	101
3.4.1	伯特兰德均衡模型	101



3.4.2	古诺均衡模型 .....	101
3.4.3	电力市场供给函数均衡模型 .....	103
3.4.3.1	供给函数均衡模型的应用 .....	103
3.4.3.2	电网建模 .....	104
3.4.3.3	合同的建模 .....	105
3.4.3.4	选择合适的策略变量 .....	105
3.4.3.5	猜测供给函数均衡模型 .....	106
3.4.4	推测变差与 CSF 均衡模型 .....	106
3.5	电力市场均衡模型及市场力的计算工具 .....	106
3.5.1	带均衡约束的数学规划 (MPEC) .....	107
3.5.2	双层规划 .....	108
3.5.3	带均衡约束的均衡问题 (EPEC) .....	108
3.5.3.1	MPEC 的单主从博弈公式 .....	108
3.5.3.2	EPEC 的多主从博弈公式 .....	110
3.5.4	MPCC 的 NCP 函数 .....	111
3.5.4.1	Fisher-Burmeister 函数 .....	111
3.5.4.2	Min 函数 .....	111
3.5.4.3	Chen-Chen-Kanzow 函数 .....	111
3.6	MPEC 的求解技术 .....	112
3.6.1	SQP 方法 .....	112
3.6.2	内点法 .....	112
3.6.2.1	松弛互补约束的内点法 .....	112
3.6.2.2	双边松弛内点法 .....	113
3.6.2.3	带惩罚因子的内点法 .....	113
3.6.3	混合整数线性规划 (MILP) 方法 .....	114
3.6.4	人工智能方法 .....	115
3.7	EPEC 的求解技术 .....	116
3.7.1	对角化求解法 .....	116
3.7.1.1	非线性雅可比方法 .....	116
3.7.1.2	非线性高斯—赛德尔方法 .....	117
3.7.2	联立求解方法 .....	117
3.8	求解 MPEC 和 EPEC 的技术挑战 .....	118