

Risk Management in Deregulated Power Systems

——Modelling, Analysis and Preventative Strategies

电力市场风险管理

——建模分析与预防策略

周 浩 文福拴 张富强 李晓刚 孙维真 陈思杰 著

浙江大學出版社

在过去的 20 多年间,世界上许多国家开展了以厂网分开、发电竞价上网为主要特征的电力工业的市场化改革,以期降低成本,提高服务质量,优化资源配置,最终促使电力工业乃至整个国民经济健康发展。

随着我国社会主义市场经济体制的逐步形成,电力工业的一些管理体制和运行机制已经不能适应新的形势要求。经过几年的艰苦努力,我国的电力工业改革已经取得了很大的进展,为建立竞争性电力市场奠定了必要的基础。在国家电力监管委员会的积极领导下,我国的区域电力市场建设取得了很大的进展。目前,东北、华东区域电力市场已试运行,南方电力市场模拟运行,其他区域电力市场也正在筹备之中。

伴随着国内外电力工业改革的进行,电力市场已经成为电力系统及其自动化学科以及其他相关的经济与管理学科的一个重要研究方向。其中,电力市场环境下的风险管理是一个被广泛关注的、需要深入研究的重要课题。在过去的几年中,国内外在这一领域做了相当多的研究工作。

本书比较全面地论述了电力市场环境下的风险管理问题。作者长期从事电力市场方面的研究工作,承担了教育部新世纪优秀人才支持计划、国家 973 项目子课题、国家自然科学基金以及来自实际运行单位的科研项目。本书的很多内容都是作者的研究工作结晶,覆盖面广,也有相当的理论深度。

本书的出版不仅为我国电力系统专业的大学生、研究生提供了一本很好的教材,同时也为从事电力市场管理、运营、研究与分析的相关人员提供了很有价值的参考书。

韩祯祥

2006 年 9 月

在 2000~2001 年发生的美国加州电力危机在国际上引起了对电力市场中风险管理问题的普遍关注。在电力市场环境下,如何识别引起风险的因素并尽可能准确地预测和评估相关的风险程度,以及如何管理这些风险,成了从事电力市场管理、设计、运营和研究的相关人员所关心的重要问题。在此背景下,国内外近年来在这一领域开展了相当多的研究工作。本书作者近五年来也一直致力于这一领域的研究工作,并在其中的很多方面取得了比较系统的成果。本书就是在这样的背景下写成的,着重介绍了作者所完成的研究成果。

本书共分为二十八章,包括电力市场与风险管理概述、电价预测、电价金融风险分析与评估、电力市场报价行为分析、风险防范措施、新的风险管理方法在电力市场中的应用以及应用案例等七篇内容。

本书第一章~第二章、第九章~第十二章、第十四章~第十五章、第十七章~第十八章、第二十二章、第二十八章由周浩编写,第三章、第十九章~第二十一章、第二十四~第二十七章由文福拴编写,第八章和第十六章由张富强编写,第四章和第五章由李晓刚编写,第十二章和第二十三章由孙维真编写,第六章、第七章由陈思杰编写。周浩、文福拴负责全书主编工作。

在本书正式出版之际,周浩副教授首先非常感谢导师韩祯祥院士和言茂松教授对本书的指导和帮助,同时也感谢浙江大学博士研究生陈建华、硕士康建伟、硕士张权、硕士研究生熊祥鸿所做的研究工作;文福拴教授感谢他以前在香港大学工作时的研究助理华北电力大学副教授马新顺博士和华南理工大学副教授王健博士,他在浙江大学培养的博士研究生、目前在国家电力监管委员会工作的赵学顺博士和在国家电网公司北京经济技术研究院工作的杨宁博士,以及他现在的研究生王钦同学所做的研究工作;另外还要感谢浙江大学甘德强教授、浙江省电力公司戴铁潮高工、高国宁高工等人对本书的帮助,感谢浙江大学出版社为本书出版所做的大量认真细致的编辑工作。

本书所介绍的研究工作得到了国家科技部 973 项目《提高大型互联电网运行可靠性的基础研究》第五课题(课题编号:2004CB217905)和 2004 年度教育部“新世纪优秀人才支持计划”(项目编号:NCET-04-0818)的资助。特此致谢。

本书可以作为高等院校电气工程及其自动化、电力系统及其自动化、农业电气化与自动化、经济管理类专业的研究生教材或本科生高级选修课的教材,还可作为从事与电力市场相关的人员、工程技术人员和管理人员的参考用书。

由于作者水平有限,书中难免有不当甚至错误之处,恳请读者批评指正。可通过以下 Email 与作者联系: zhouhao_ee@zju.edu.cn (周浩); fushuan.wen@gmail.com (文福拴)。

作者
2006 年 7 月

第一篇 电力市场与风险管理概述

第 1 章 电力工业市场化改革及其风险	3
1.1 世界电力工业市场化改革的现状与发展	3
1.1.1 20 世纪 80 年代:电力市场化改革的酝酿启动阶段	3
1.1.2 20 世纪 90 年代:电力市场的建立和探索阶段	3
1.1.3 21 世纪初期:电力市场的总结、普及阶段	4
1.2 中国电力工业市场化改革的现状与发展	5
1.2.1 我国电力工业现状	6
1.2.2 我国电力市场化改革的简要回顾	6
1.2.3 区域电力市场建设	7
1.2.4 区域电力市场建设的进展和重点工作	8
1.3 电力工业市场化改革的必要性及其风险	9
1.4 美国加州电力危机的启示	12
1.4.1 改革中潜在的风险	12
1.4.2 风险的发生和后果	13
1.4.3 加州危机的风险分析	14
1.5 美加大停电对电力市场安全风险评估和防范的启示	15
第 2 章 电力市场中的电价金融风险	18
2.1 引 言	18
2.2 电力市场的交易模式和竞价机制	18
2.2.1 交易模式	18
2.2.2 竞价机制	19
2.3 电力市场中报价与电价金融风险的关系	20
2.4 电力市场金融风险的特点	20
2.5 电力市场电价金融风险的研究现状	21
第 3 章 风险管理与会约束规划方法	26
3.1 风险管理	26
3.2 机会约束规划	27
3.3 遗传算法	29

3.3.1 遗传算法原理	30
3.3.2 遗传算法的实现	31
3.4 蒙特卡罗方法	33
3.4.1 机会约束的检验	33
3.4.2 计算目标值	34
3.4.3 基于蒙特卡罗仿真的遗传算法	34

第二篇 电价预测

第4章 概述	39
4.1 电力市场中的电价	39
4.1.1 电价的形成	39
4.1.2 电价的影响因素	39
4.1.3 电价的特点	40
4.1.4 电价在电力市场中的核心作用	40
4.2 电价预测的基本概念及其意义	41
4.2.1 电价预测的基本概念	41
4.2.2 电价预测的意义	41
4.3 电价预测的分类	42
4.4 电价预测与负荷预测异同点及其相互影响	42
4.5 电价预测的主要难点	44
4.6 电价预测误差分析	46
4.6.1 产生误差的原因	46
4.6.2 预测误差评价指标	46
4.7 本章小结	47
第5章 基于神经网络的电价预测模型	50
5.1 人工神经网络简介	50
5.1.1 人工神经网络的特点和基本原理	50
5.1.2 人工神经网络应用于电价预测的基本原理	51
5.2 BP神经网络(Back Propagation Neural Network)	52
5.2.1 BP网络结构及其算法	52
5.2.2 BP网络的优缺点	53
5.2.3 基于BP神经网络的电价预测模型的构建	53
5.2.4 仿真实例与分析	56
5.3 RBF神经网络	61
5.3.1 RBF网络的结构	61
5.3.2 RBF网络的学习训练过程	62

5.3.3 RBF 网络与 BP 网络的区别	63
5.3.4 仿真实例与分析	63
5.4 CMAC 神经网络(Cerebellar Model Articulation Controller Neural Network)	65
5.4.1 CMAC 网络结构	65
5.4.2 CMAC 网络的学习训练过程	66
5.4.3 CMAC 网络与 BP 网络的区别	66
5.4.4 仿真实例与分析	67
5.5 其他神经网络预测方法综述	69
5.6 本章小结	70
第 6 章 基于小波变换的电价预测模型	72
6.1 小波变换简介	72
6.1.1 小波变换理论的发展概况	72
6.1.2 小波变换的基本理论	74
6.1.3 小波变换理论应用于电价预测的基本思想	78
6.2 基于小波变换的 BP 神经网络预测模型	78
6.2.1 预测模型的基本思路	78
6.2.2 预测模型 A 的构建	79
6.2.3 预测模型 B 的构建	80
6.2.4 仿真实例与分析	80
6.3 其他基于小波变换的电价预测模型简介	85
6.4 本章小结	86
第 7 章 其他电价预测方法	87
7.1 时间序列预测方法	87
7.1.1 时间序列的概念	87
7.1.2 时间序列法的基本模型	87
7.1.3 基于 ARIMA 的电价预测基本模型	88
7.2 模糊回归分析法	89
7.3 组合预测方法	90
7.4 本章小结	92
第 8 章 电力市场中的电价分布	94
8.1 引 言	94
8.2 浙江电力市场电价分布的异常情况	95
8.3 总供给曲线	96
8.4 理论证明	98
8.5 实证研究	98

8.5.1 加州电力市场的电价分布	98
8.5.2 PJM 市场的电价分布	101
8.5.3 浙江电力市场的电价分布	101
8.6 结 语	102

第三篇 电价金融风险分析与评估

第 9 章 VaR 计算电力市场金融风险初探	107
9.1 VaR 计算的基本原理	107
9.2 利用历史模拟方法计算电力市场金融风险	107
9.3 VAR 计算的分析方法:DELTA-类模型	111
9.3.1 分析模型	111
9.3.2 DELTA-类模拟方法计算电力市场金融风险	112
9.4 VaR 计算的 MONTE CARLO 模拟方法	116
9.4.1 Monte-Carlo 方法的基本原理	116
9.4.2 MOTE CARLO 模拟方法计算电力市场金融风险	117
9.5 历史模拟法、分析法和 Monte Carlo 方法在电力市场金融风险分析中的适用性 讨论	118
第 10 章 短期金融风险评估	120
10.1 引 言	120
10.2 系统剩余容量百分比与电价的统计关系	121
10.3 Monte-Carlo 方法在电力市场短期金融风险评估中的应用	122
10.3.1 Monte-Carlo 方法计算 VaR 的基本思路	122
10.3.2 电价上限、电价下限和中值电价的定义	122
10.3.3 购电费用	122
10.3.4 建立 SCP 金融风险评估模型	123
10.4 算例分析	125
10.4.1 计算结果	125
10.4.2 SCP 金融风险评估模型与历史模拟法的比较	127
10.5 结 论	128
第 11 章 中长期电价金融风险评估	130
11.1 引 言	130
11.2 利用系统剩余容量百分比与电价的关系改进 Monte-Carlo 方法	130
11.2.1 系统剩余容量百分比与电价的统计关系	130
11.2.2 Monte-Carlo 方法计算 VaR 的基本原理	131
11.3 Monte-Carlo 方法在电力市场中长期金融风险评估中的应用	132

11.3.1 购电费用上限、下限和中值购电费用的定义	132
11.3.2 购电费用	132
11.3.3 购电费用随机模拟模型	132
11.4 算例分析	134
11.4.1 月份	134
11.4.2 季度	136
11.4.3 半年、年	136
11.5 结论	137

第四篇 电力市场报价行为分析

第 12 章 量价指数分析	141
12.1 量价指数	142
12.1.1 机组报价数据形式	142
12.1.2 量价指数定义	142
12.1.3 量价指数算例	143
12.2 应用量价指数对电力市场发电商进行报价分析	145
12.2.1 发电商报价时段分析	145
12.2.2 发电商报价日分析及月分析	146
12.2.3 发电商报价综合分析	146
12.2.4 量价指数初步判据	148
12.2.5 C_{PI} 指数频度分布分析	148
12.3 结 论	149
第 13 章 采用报价差异度分析发电商的报价行为	151
13.1 引 言	151
13.2 报价差异度	152
13.2.1 报价差异度的定义	152
13.2.2 差异度的取值范围	152
13.3 报价差异度的判据	153
13.3.1 最低出力下的报价	153
13.3.2 80% 额定容量减去最低出力下的报价	153
13.3.3 20% 的额定容量下的报价	154
13.4 报价差异度的应用	155
13.4.1 单机组连续段的应用	155
13.4.2 双机组对应段的应用	157
13.4.3 多机组对应段的应用	159
13.5 结 论	160

第 14 章 发电商报价聚类分析	162
14.1 聚类分析原理简介	162
14.1.1 距离定义	163
14.1.2 相似系数定义	163
14.1.3 聚类方法简介	164
14.2 平均电价差值积分模型	165
14.2.1 报价曲线的分段量化	165
14.2.2 进行平均电价差值积分得到机组报价曲线的表征向量	165
14.3 确定报价聚类分析方法	166
14.3.1 确定聚类分析方法	166
14.3.2 确定报价分段数目	169
14.4 聚类计算结果及其分析	170
14.4.1 量价指数分析	171
14.4.2 HHI 指数分析	172
14.5 小结	172
14.6 附录——机组信息及其数字标识	173
第 15 章 电力市场中经济持留的研究	175
15.1 引言	175
15.2 经济持留分析的理论基础	175
15.3 两种衡量经济持留的指标	179
15.3.1 绝对指标	179
15.3.2 相对指标	180
15.4 采用持留指标分析实际电力市场的报价情况	181
15.5 利用持留指标抑制发电商的持留行为	182
15.6 结论	183
第 16 章 发电商的物理持留	185
16.1 引言	185
16.2 单个发电商的最优持留模型	186
16.3 规模不等的多个发电商的持留均衡	189
16.4 算例	190
16.4.1 $\lambda=1$ 时的情况	190
16.4.2 $\lambda=2$ 的情况	191
16.5 资产拆分对发电商最优持留量的影响	192
16.6 结论	193

第五篇 风险防范措施

第 17 章 电力市场短期金融风险防范	197
17.1 采用 SCP 来监管和调控电价	197
17.1.1 SCP 与电价的统计关系	198
17.1.2 采用 SCP 实现短期电价调控的计算实例	199
17.1.3 电价与 SCP 关系曲线在短期电价调控中的应用	201
17.2 利用持留指标抑制发电商的持留行为	202
第 18 章 采用金融工具控制电力市场中长期金融风险	204
18.1 差价合约在电力市场中的应用	204
18.1.1 差价合约模型分析	204
18.1.2 差价合约的作用	206
18.1.3 差价合约模式在不同供求关系市场中的适应性分析	206
18.1.4 考虑差价合约的电力市场金融风险分析(采用历史模拟法)	208
18.2 电力期货在电力市场中的应用	213
18.2.1 电力期货交易的概念	213
18.2.2 电力期货交易在各国电力市场中的实践	213
18.2.3 建立电力期货市场的可行性	214
18.2.4 在我国推出电力期货交易的必要性	215
18.2.5 电力期货的套期保值策略	216
18.3 期权交易的基本知识	218
18.4 电力收入保险——发电商理想的风险管理工具	221
第 19 章 不考虑输电系统容量约束的市场势力分析	223
19.1 引 言	223
19.2 电力市场中的市场势力问题	223
19.2.1 市场势力的分类	223
19.2.2 电力市场中发电公司的市场势力的来源	224
19.2.3 市场势力的表现	224
19.3 市场势力分析方法	224
19.3.1 基于指数的市场势力分析方法	225
19.3.2 基于仿真模拟的市场势力分析方法	226
19.4 发电公司行使市场势力的方法	227
19.5 抑制发电公司滥用市场势力的措施	227
19.6 加州电力市场失败后的监管	228
19.7 结束语	228

第 20 章 计及输电系统容量约束的市场势力分析	230
20.1 输电阻塞管理概述	230
20.2 输电阻塞引起的风险及其规避	230
20.2.1 输电阻塞对市场主体带来的风险	231
20.2.2 风险的规避措施	231
20.3 输电阻塞引起的市场势力问题	233
20.3.1 本地市场势力的来源	233
20.3.2 本地市场势力的识别	233
20.3.3 本地市场势力的抑制	234
20.4 阻塞管理的实用方法和风险防范的经验教训	234
20.4.1 PJM 电力市场的经验	234
20.4.2 加州电力市场的经验	234
20.4.3 北欧电力市场的经验	235
20.5 小 结	235
第 21 章 保证发电容量充裕性的措施	236
21.1 引 言	236
21.2 仅靠能量市场是否可以引导出充足的发电容量	237
21.3 是否应该设置电价上限	238
21.4 为什么需要向发电公司支付容量费用或建立容量市场	239
21.5 应该怎样确定容量费用	240
21.6 现有的确定容量费用的方法	241
21.6.1 容量责任模式	241
21.6.2 行政方法	241
21.6.3 显式的额外容量费用模式	242
21.7 容量市场和辅助服务市场的关系	242
21.8 政府或监管机构应该扮演的角色	243
21.9 结 语	244
第 22 章 电力市场中电价上限设定模型的探讨	245
22.1 SCP 与平均上网电价的关系	246
22.1.1 浙江电力市场简介	246
22.1.2 SCP 介绍	246
22.1.3 SCP 与平均上网电价的统计学关系	247
22.2 不同电价上限下 SCP 与平均上网电价的关系模型	247
22.2.1 不同电价上限下 SCP 与平均上网电价的关系模型	247
22.2.2 总平均上网电价的计算	249
22.3 电价上限与总平均上网电价间的关系研究	249

22.3.1 可用容量与竞价负荷均保持不变	250
22.3.2 可用容量不变,竞价负荷变化	250
22.3.3 竞价负荷不变,可用容量变化	251
22.3.4 竞价负荷和可用容量均变化	252
22.3.5 对电价上限与总平均上网电价的关系的小结	252
22.4 根据总平均上网电价设定合理的电价上限	253
22.4.1 根据总平均上网电价设定电价上限的模型	253
22.4.2 算例分析	253
22.5 结 论	254
第 23 章 其他防范措施	256
23.1 严格控制电力市场中的市场力	256
23.1.1 单边开放电力市场中发电厂商的市场力分析	256
23.1.2 市场集中度分析	257
23.1.3 市场力的防范对策	257
23.2 禁止串通报价	258
23.3 慎重选择电力市场运行模式	260
23.4 采用定量分析手段监管和控制发电商的异常报价	261
23.5 信息安全对电力市场的重要性	263

第六篇 新的风险管理方法在电力市场中的应用

第 24 章 基于机会约束规划方法的发电公司最优报价策略	269
24.1 引 言	269
24.2 电力市场环境下的发电投标问题概述	270
24.2.1 拍卖与投标规约	271
24.2.2 多部分投标	272
24.2.3 单部分投标	272
24.2.4 需求侧投标	272
24.3 计及风险的发电报价决策的数学模型	273
24.4 求解方法	274
24.4.1 x_{-i} 的模拟	275
24.4.2 π 的确定	275
24.4.3 实数编码遗传算法	275
24.5 数值例	276
24.6 结 语	277
第 25 章 基于机会约束规划的输电系统规划方法	279
25.1 引 言	279

25.2	传统电力工业中的输电规划	280
25.3	在电力市场环境下输电规划所面临的挑战	281
25.3.1	输电规划与发电规划的关系及相互间的协调	282
25.3.2	不确定因素更多、风险更大	282
25.3.3	对网络灵活性和强壮性的要求更高	282
25.3.4	投资者和公众利益的协调	283
25.3.5	潮流模式的变化	283
25.3.6	新的输电规划准则	283
25.3.7	可靠性准则	284
25.3.8	RTO 或 ISO 在输电系统规划和投资中的作用	284
25.4	电力市场改革后的输电系统规划框架	284
25.5	输电系统规划的数学模型	285
25.5.1	不确定性因素的模拟	285
25.5.2	基于机会约束规划的输电系统规划数学模型	286
25.6	求解方法及步骤	286
25.6.1	输电系统规划中机会约束的检验	286
25.6.2	基于蒙特卡罗仿真的遗传算法求解输电系统机会约束规划模型	287
25.7	算例分析	288
25.8	结 语	291
第 26 章	基于机会约束规划的发电公司最优检修策略研究	293
26.1	引 言	293
26.2	基本假设	294
26.3	发电公司为价格接受者	295
26.4	发电公司不是价格接受者	296
26.5	算例	297
26.5.1	发电公司是价格接受者	298
26.5.2	发电公司不是价格接受者	299
26.6	结 语	299
第 27 章	基于机会约束规划的供电公司在合同市场和现货市场的最优购电策略	301
27.1	引 言	301
27.2	电价的模拟	302
27.2.1	现货交易	302
27.2.2	合同交易	302
27.3	供电公司运营状况分析	303
27.4	基于机会约束规划的最优购电策略	304
27.5	算例分析	304
27.6	小 结	308

第七篇 应用案例

第 28 章 电力市场金融风险评估和辅助决策系统设计与实现	311
28.1 引 言	311
28.2 系统理论体系和模型	312
28.3 软件设计与实现	312
28.3.1 系统设计思想与原则	312
28.3.2 软件系统开发与部署	313
28.3.3 系统软件特点	313
28.4 本系统及其主要功能模块	313
28.4.1 总体功能模块图	313
28.4.2 系统维护	314
28.4.3 金融风险评估	314
28.4.4 发电商报价行为分析	316
28.4.5 电价预测	319
28.4.6 剩余容量百分数	319
28.4.7 综合查询	319
28.5 结 语	320

第一篇

part 1

电力市场与 风险管理概述

电力工业市场化改革及其风险

1.1 世界电力工业市场化改革的现状与发展

1.1.1 20 世纪 80 年代:电力市场化改革的酝酿启动阶段

20 世纪 80 年代,电力行业天然垄断的概念已在某种程度上得到部分消除,开始注入竞争性力量,世界电力工业体制改革浪潮开始席卷全球,二十多个国家和地区解冻电力行业的垄断局面。

现代意义上的电力工业改革始于智利。1982 年,智利颁布电力服务法,为电力工业结构重组、私有化以及自由竞争制定法律框架。1983 年,智利开始对 Endesa 和 Chilectra 进行结构重组。前者分离成 9 个配电公司,4 个发电公司和 1 个发/输电公司;后者分离成 2 个配电公司,1 个发电公司和 1 个发/输电公司。1985 年,智利成立发电库。对所有发电厂实施集中的、以各电厂发电成本为基础的调度方案。实行按边际成本确定趸售价格的管制方式。

然而对以后的电力改革有更大影响的却是以新自由主义经济理论为导向的英国的电力企业民营化计划。1989 年,英国议会通过了关于苏格兰、威尔士、英格兰电力企业民营化计划,并批准了新的《电气法》。英国电力市场改革全面启动。英国的电力市场化改革始于撒切尔时代,撒切尔夫人坚信“市场万能”,减少政府对经济的直接干预,廉价出售政府拥有的企业,进行了一系列国有行业私有化改革,并于 1988 年 2 月发表了《电力市场民营化》白皮书,拉开了电力市场化改革的序幕。其突出的特点是将电力系统的发、输、配、售电分离,分别对其采取不同的管理方式。其指导思想是:电力行业发电与销售可以更多地引入竞争机制,而电力行业的输配电环节在无限期的未来被认为是“天然垄断”,因此对发电和销售的限制逐渐予以取消,对输配电的管制仍将继续保留。

除此之外,在 80 年代,新西兰、荷兰、澳大利亚和阿根廷也分别以颁布电力法规、撤销电力部等方法为电力工业结构重组和放松管制确立法律框架并扫清障碍。

1.1.2 20 世纪 90 年代:电力市场的建立和探索阶段

1990 年,挪威颁布新能源法,为电力工业的改革提供了法律框架。1991 年 1 月 1 日,挪