

电力市场理论与应用丛书

Reactive Power
Related Issues in
Electricity Market Environment

电力市场环境下的 无功问题

文福拴等 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力市场理论与应用丛书

电力市场环境下的 **无功问题**

文福拴 林旭军 张富强 徐楠 戴彦 著 ©

国家科技部973项目(2004CB217905)资助

国家自然科学基金项目(70673023)资助

教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-04-0818)资助



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书阐述了各种无功源设备的成本分析、计及多种可能运行方式的无功价值评估方法、无功获取与成本分摊的最优潮流方法、基于 Aumann-Shapley 方法的无功成本分摊及市场环境下考虑电压稳定约束的无功优化、无功成本分摊的潮流跟踪方法、基于市场方式的无功获取方法、无功实时定价理论和无功市场势力问题。

本书对从事电力市场管理、运营、研究与分析的相关人员具有重要参考价值,也可作为电力系统及其自动化专业以及其他相关的经济与管理专业的研究生教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力市场环境下的无功问题 / 文福拴等著. —北京: 中国电力出版社, 2007

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5504 - 7

I. 电… II. 文… III. 电力系统 - 无功功率 - 研究
IV. TM714

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 058508 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 6 月第一版 2007 年 6 月北京第一次印刷

880 毫米 × 1230 毫米 32 开本 8.25 印张 193 千字

印数 0001—3000 册 定价 19.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失
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

序

Foreword

自 20 世纪 80 年代以来，世界上很多国家和地区基于不同的背景和目的，开展了各具特色的电力工业市场化改革。伴随着改革的深入，经验和教训不断得到积累，对市场运营机制的理解也逐渐加深。电力工业改革的核心问题是应该如何引入市场竞争机制，即如何解决电力系统运行所具有的物理特征和基于利益最大化原则的市场化行为之间的矛盾，这不仅关系到电力系统能否安全运行，也决定着电力市场能否健康运营。

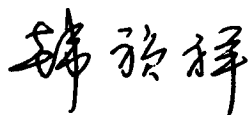
在国家电力监管委员会的大力推动下，我国电力工业改革已经取得了较大进展，东北和华东区域电力市场已经进行过试运行，南方电力市场正在模拟运行，其他区域电力市场也正在筹建之中。虽然世界各国的电力工业改革经验和教训对我国的电力工业改革无疑具有很大的参考价值和借鉴意义，但我国的电力工业及其发展环境具有鲜明的特征，如经济发展快速、电网结构薄弱、系统可靠性较低、市场经济发展的时间短、金融市场不成熟等。这样，在我国开展电力工业市场化改革必然会遇到在发达国家所没有遇到的一些困难，为此必须进行充分的学术研究和实践准备。

作为电力系统及其自动化及其他相关的经济与管理学科的一个重要研究领域的电力市场，其

涉及到电力工程、经济学、管理学等多个学科。国内外尚没有对此领域进行全面、系统和深入介绍的书籍。在此背景下，决定组织出版《电力市场理论与应用》这样一套高层次的丛书，具有重要的学术价值和现实意义。

这套丛书由文福拴教授负责组织编写。文教授最近十年来一直潜心于电力市场方面的研究工作，取得了相当多的研究成果。编写组成员也都是专门从事这方面研究工作的博士研究生。本套丛书的主要内容为作者多年的研究成果；包括多本分册，涵盖了电力市场环境下的发电和输电投资与规划问题、电力市场环境下的辅助服务问题、电力市场环境下的无功问题、电力市场环境下的电力系统运行、电力市场环境下的发电机组检修问题以及电力市场环境下的发电公司运营策略等方面的内容，比较系统、全面和深入地介绍了相关研究领域的研究现状和存在的问题。

这套丛书的出版不仅对从事电力市场管理、运营、研究与分析的相关人员具有很好的参考价值，为我国电力系统及其自动化以及其他相关的经济与管理专业的研究生提供了一套高层次的教材。相信这套丛书的出版对促进我国电力市场方面高层次理论研究和应用方面的发展会起到积极的作用。



中国科学院院士

浙江大学电气工程学院教授，博士生导师

2007 年 4 月

前言

Preface

在电力市场环境下，无功通常被视为一种辅助服务，它对电力系统的安全与经济运行和电力市场的正常运营都具有重要影响，因此近年来受到了国内外很多学者的关注，做了很多研究工作。我们自己也做了数年的研究工作，有相当多的研究积累。

到目前为止，关于电力市场环境下的无功问题的研究成果散见于在国内外杂志上发表的研究论文、研究生的学位论文和有关的研究报告，国内外尚没有系统地介绍这方面研究工作的书籍。为此，我们把《电力市场环境下的无功问题》一书作为《电力市场理论与应用》丛书的第一本，以填补这方面的空白。

本书比较系统地论述了电力市场环境下的无功问题的特征和面对的挑战，国内外在这一领域所做的有代表性的研究工作，并把重点放在介绍我们自己的研究成果上。

需要指出，我们撰写本书的目的并不是为初学者提供介绍无功的技术与经济方面以及电力市场方面的基础知识，而是为电力系统及其自动化以及其他相关的经济与管理专业的研究生和从事电力市场管理、运营、研究与分析的

相关人员提供高层次的参考书。读者需要掌握大学本科《电力系统分析》方面的基础知识，对电力市场的基本知识也需要有所了解。

本书包括下述内容：

第1章对国内外就电力市场环境下的无功问题的研究工作做了比较简要而系统的综述。主要内容包括：无功服务的定义，无功价值评估，无功实时电价，市场环境下的无功获取方法，无功服务的成本分摊等问题。此外，还对国际上实际运营的电力市场中的无功获取方法作了简要介绍。

第2章分析了各种无功源的成本，包括固定成本和可变成本，特别是在电力市场环境下发电机因为遵循调度指令增发无功而可能放弃一些有功销售所引起的机会成本，以及实际计算中发展的简化模型等。

第3章描述了计及多种可能运行方式的无功价值评估方法，对现有的电压灵敏度方法进行了扩展，综合考虑了各种可能的系统运行方式出现的概率、各种运行方式下系统的电压情况以及各无功源对负荷节点的电压支持效果，从而能够更加全面和合理地对无功源的价值进行评估。

第4章介绍了一种集中式的无功管理方案，讨论了如何获取无功以及如何处理由此引发的成本这两个问题，给出了以最小化无功成本为目标函数的无功调度模型。系统的总无功成本被分为两个部分：一部分与支持有功输送有关，而另一部分则由负荷的无功消耗引起。同有功输送相关的那一部分成本被认为是参与有功交易活动的发电机应该承担的责任成本，而与负荷无功消耗相关的无功成本由负荷侧承担。

第5章在假定系统调度人员负责无功获取，且其要同时考虑技术可行性和经济最优性的前提下，介绍了基于Aumann-Shapley方法的无功成本分摊问题。无功服务的全

部成本依公平原则分摊到各个负荷。发电机的无功成本通过其在有功市场的损失即发电机的无功机会成本来衡量。有功及无功负荷的成本分摊系数通过 Aumann-Shapley 成本分摊法求解。

第 6 章论述了电力市场环境考虑电压稳定约束的无功优化问题，介绍了将无功成本因素和电压稳定因素相结合的无功优化模型，从而能够显式地考虑系统的电压稳定要求。无功功率对于有功输送和维护系统电压具有重要的作用。当系统的有功交易不断增加，输电系统承载不断加重时，电压约束可能成为系统安全运行的瓶颈。电压稳定已成为限制输电能力的重要因素。无功的合理配置对于改善系统的电压稳定性、提高有功传输能力有着十分重要的意义。

第 7 章介绍了一种新的交流潮流跟踪方法，在假设功率按比例分配的前提下，根据已知的系统潮流可以估算系统中任一个无功负荷究竟用了哪个无功电源的多少无功功率，以及经过哪些输电线路输送了多少无功功率到该负荷的完整信息。在此基础上，将该方法应用于无功成本分摊问题，进行了无功电源的生产成本分摊和输电线路的无功输送成本分摊，并给出了一个比较完整的基于成本分摊的无功定价算法。

第 8 章论述了基于市场机制的无功获取问题，介绍了一种计及安全约束的无功获取方法，同时对无功需求和无功备用进行获取。在考虑系统运行经济性的同时也保证了在发生预想事故的情况下，系统拥有充足的无功备用以维持系统的安全稳定运行。

第 9 章论述了无功实时定价理论，介绍了一个新的估算无功机会成本的方法，也即利用发电机的有功生产成本和利润率来近似计算无功机会成本，并以此作为发电机的

无功生产成本。

第 10 章介绍了无功市场势力问题，这在设计无功市场结构和模型时必须考虑。将各个无功源在某一节点无功竞争中所占的市场份额用它们对该节点的电压控制能力来表示，进而利用经典的 HHI 指标来衡量系统中各个节点上的无功竞争程度。在此基础上，利用电气距离的概念给出了一种可用于评估无功区域市场势力的方法。

本书的大部分作者都曾在香港理工大学或香港大学工作过。感谢香港理工大学的 A.K.David 教授和余志伟副教授，以及香港大学的吴复立教授曾经给予的帮助。

文福拴教授感谢他的导师韩祯祥院士长期以来对他的指导、关心和帮助，也感谢他为本套丛书作序。

感谢中国电力出版社的周莉女士为本书的出版所做的大量而细致的工作。

本书所描述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》第五子课题 (2004CB217905)，国家自然科学基金项目 (70673023) 和教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-04-0818) 的资助。特此致谢。同时也感谢华南理工大学电力学院专著出版基金的资助。

由于作者水平所限，书中难免有错漏之处，欢迎读者批评指正。可以用 fushuan.wen@gmail.com 和作者联系。

文福拴
2007 年 5 月

目录

Contents

序

前言

第1章 绪论 / 1

1.1 引言 / 2

1.2 电力市场环境下无功服务的定义 / 3

1.3 关于无功市场的文献回顾 / 4

1.4 电力市场环境下的无功获取方法分类 / 9

1.4.1 基于成本回收的无功获取方法 / 10

1.4.2 基于报价的无功获取方法 / 11

1.5 无功服务的成本分摊问题 / 15

1.6 国际上实际运营的电力市场所采用的
无功获取方法 / 20

1.6.1 美国 / 20

1.6.2 欧洲 / 22

1.6.3 其他国家 / 28

1.7 本章小结 / 32

第2章 无功成本分析 / 40

2.1 引言 / 42

2.2 无功补偿设备 / 43

2.2.1 基本比较 / 43

2.2.2 同步发电机 / 45

2.2.3 电容器组 / 46

2.2.4 同步调相机 / 46

2.2.5 变压器分接开关 / 47

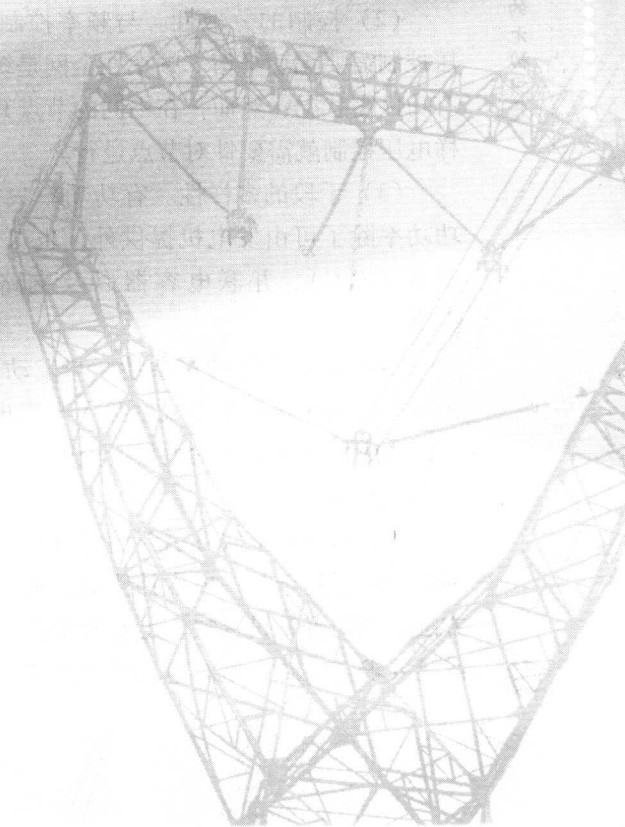
2.2.6	SVC和 STATCOM / 47
2.3	发电侧的无功成本 / 48
2.3.1	固定成本及在有功功率和无功功率生产之间的分摊 / 48
2.3.2	变动成本 / 53
2.3.3	机会成本的分析计算 / 54
2.4	电网侧的无功成本 / 58
2.4.1	固定成本 / 58
2.4.2	可变成本 / 60
2.5	本章小结 / 61
第3章	计及多种可能运行方式的无功价值评估方法 / 64
3.1	引言 / 66
3.2	数学模型 / 69
3.2.1	电压灵敏度方法 / 69
3.2.2	计及多种可能运行方式的无功价值评估方法 / 70
3.2.3	方法小结 / 73
3.3	算例分析 / 74
3.3.1	14 节点系统 / 74
3.3.2	39 节点系统 / 81
3.4	本章小结 / 86
第4章	无功获取与成本分摊的最优潮流方法 / 90
4.1	引言 / 92
4.2	无功成本分析 / 94
4.2.1	发电机无功成本 / 94
4.2.2	无功补偿器成本模型 / 95
4.3	无功辅助服务的获取 / 96
4.3.1	无功优化模型 / 96
4.3.2	求解方法 / 97
4.4	无功支持成本结算 / 98

4.5	算例分析 / 100
4.6	本章小结 / 102
第 5 章	基于 Aumann-Shapley 方法的无功成本分摊 / 104
5.1	引言 / 106
5.2	无功服务成本的确定 / 107
5.2.1	基准有功调度 / 107
5.2.2	有功和无功共同优化 / 108
5.2.3	有功结算及无功成本的确定 / 109
5.3	无功成本分摊 / 112
5.4	算例分析 / 115
5.5	本章小结 / 119
第 6 章	电力市场环境下考虑电压稳定约束的无功优化 / 122
6.1	引言 / 124
6.2	静态电压裕度的优化解法 / 125
6.3	无功优化模型 / 127
6.3.1	基本优化模型 / 128
6.3.2	修正后的优化模型 / 128
6.4	算例分析 / 130
6.5	本章小结 / 132
第 7 章	无功成本分摊的潮流跟踪方法 / 134
7.1	引言 / 136
7.2	AC 潮流跟踪原理 / 137
7.2.1	顺流 (逆流) 跟踪路径的确定 / 139
7.2.2	无功潮流跟踪计算 / 141
7.3	无功功率环流的监测和消除 / 143
7.3.1	无功环流产生的原因 / 144
7.3.2	无功环流的消除 / 145
7.4	无功“成本电价”方法 / 147
7.4.1	系统无功生产成本的计算 / 147
7.4.2	无功输电成本的计算 / 147

7.4.3	无功“成本电价”的计算流程 / 149
7.5	算例分析 / 150
7.6	本章小结 / 152
第 8 章	基于市场方式的无功获取方法 / 156
8.1	引言 / 158
8.2	发电机无功竞价模型 / 160
8.3	计及安全约束的无功获取模型 / 163
8.4	算例分析 / 166
8.5	本章小结 / 170
第 9 章	无功功率实时电价理论 / 174
9.1	引言 / 176
9.2	最优化理论 / 180
9.2.1	Lagrange 函数的定义 / 180
9.2.2	多变量带等式约束的 Lagrange 函数 / 182
9.2.3	多变量带不等式约束的 Lagrange 函数 / 182
9.2.4	Lagrange 乘子的经济学意义 / 183
9.3	实时电价的定义 / 184
9.4	基于 DC 潮流的有功实时电价 / 185
9.5	基于 AC 潮流的无功实时电价 / 189
9.5.1	最小化成本的 OPF 模型 / 190
9.5.2	最大化社会效益的 OPF 模型 / 192
9.6	五节点系统的仿真计算 / 196
9.6.1	系统结构和参数 / 197
9.6.2	案例 1 至案例 4 的计算结果 / 199
9.6.3	不同的负荷功率因素对无功实时价格的影响 (案例 5) / 205
9.6.4	日负荷需求变化对无功实时价格的影响 (案例 6) / 208
9.6.5	节点电压控制对无功实时电价的影响 (案例 7) / 208

9.6.6	无功机会成本的大小对无功实时电价的影响 (案例 8) / 211
9.7	IEEE 14 节点系统仿真计算 / 212
9.7.1	系统结构和参数 / 213
9.7.2	以最大化社会效益为目标的 OPF 模型的计算结果 / 215
9.7.3	考虑负荷静态模型的无功实时电价 / 217
9.7.4	变压器分接头位置对无功实时电价的影响 / 219
9.7.5	节点电压控制对无功实时电价的影响 / 220
9.8	本章小结 / 222
第 10 章	无功市场势力问题 / 228
10.1	引言 / 230
10.2	市场势力分析方法 / 231
10.2.1	基于指标的市场势力分析方法 / 231
10.2.2	基于仿真模拟的市场势力分析方法 / 233
10.3	无功市场势力的评估指标 / 234
10.3.1	节点无功 HHI 指标 / 234
10.3.2	区域无功 HHI 指标 / 236
10.4	算例分析 / 239
10.5	本章小结 / 243
附录 A	IEEE 14 节点系统 / 247
附录 B	AUMANN-SHAPLEY 成本分摊法 / 249

- 电力市场环境下的无功服务的定义
- 关于无功市场的文献回顾
- 电力市场环境下的无功获取方法分类
- 无功服务的成本分摊问题
- 国际上实际运营的电力市场所采用的无功获取方法



1.1 引言

无功功率是维持电力系统安全与稳定运行的重要因素。在传统的电力工业中,由于发、输、配等环节隶属于同一家电力企业,因而无功配置与调度决策往往由系统调度机构采用集中优化的方式统一确定。然而,随着近年来电力工业市场化改革的不断深入,传统的无功管理方法已不再适用于新的形势。在电力市场环境下,需要采用新的无功管理方法来引导无功投资,同时更有效地进行无功调度。

与有功服务相比,无功服务具有一些特点^[1]:

(1) 供应的地域性。由于远距离输送无功需要发电和受电之间有一定的电压差,因此无功供应原则上应就地平衡。

(2) 控制的分散性。与频率控制需要有功平衡类似,电压控制需要无功平衡。频率在全网是统一的,只取决于全网的有功供需状况;然而,在不同的节点其电压一般是不同的,这样电压控制就需要针对节点进行。

(3) 手段的多样性。有功功率只能由发电机提供,而无功功率除了可由发电机提供外,也可由调相机、静止无功补偿器(SVC)、并联电容器以及支路的充电电容等无功源提供。

(4) 成本分析的复杂性。与发电机的有功功率生产成本相比,其无功功率生产成本除了与发电机出力的大小有关外,其机会成本部分还与发电机所处的运行位置有关,分析起来比有功要复杂。

在目前国际上实际运营的电力市场中,无功服务通常采用强制手段或基于某一成本补偿机制来获取,实践证明这些获取方法对无功容量投资缺乏足够的激励,导致新增无功容量不能满足要求。显然,这对电力系统的长期安全稳定运行是不利

的。同时，这也使系统中现有的可调度发电容量更集中于有功服务而忽视无功服务，从而导致无功可调度容量相对匮乏。此外，市场化改革后减弱了调度人员对各发电机的控制权。这些因素都将使系统运行面临越来越严重的安全稳定问题。针对这些问题，国内外近年来开展了大量的研究工作，本章对此做了比较简要而系统的综述，同时也提出了一些看法。

1.2 电力市场环境下无功服务的定义

在电力市场环境下，无功服务通常被当作辅助服务的一种，也有不少人称之为“电压支持服务”。虽然电力工业改革已经有相当长的历史，但到目前为止对于无功服务还没有一个能被普遍接受的“标准”定义。下面为世界上一些国家或地区的电力市场中所采用的无功服务的定义^[2]：

- 在新西兰电力市场，无功服务被定义为“对无功功率的调度以及对其他用来控制系统电压在正常范围内的系统支持设备的调度”。这里，用来提供无功服务的设备包括发电机以及电网企业所拥有的电容器、静止无功补偿器等无功补偿设备。

- 在美国加州电力市场，无功服务是指“用来维持系统电压在合理水平且满足各互联节点（Points of Interconnection）无功容量要求的无功控制”。

- 在美国 PJM 电力市场，发电机提供的无功服务被明确地分为两类：一类是“发电机在其额定有功出力处所能提供的无功出力”；另一类是“发电机在不得不减少其有功出力的情况下所提供的无功出力”。

- 在美国纽约电力市场，无功服务被定义为“在稳态及预想事故条件下，各无功源在其容量允许范围内为了维持系统电压在合理水平所提供的发出或吸收无功的服务”。