

北京工商大学学术专著出版资助项目

Supported by the Press Found of Beijing Technology and Business University

电力市场下的 电压安全成本分析

刘雪连 著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

北京工商大学学术专著出版资助项目

电力市场下的 电压安全成本分析

刘雪连 著



机械工业出版社

电压安全成本 (Voltage Security Cost) 源于加拿大的 Rosehart 等人对电压稳定约束最优潮流的研究。世界范围内的电力市场化改革, 使得电力系统的安全稳定运行已不能局限于由系统统一调度管理, 而应该以经济利益驱动各市场主体积极参与维护, 因此, 对安全成本的评估、为安全定价成为市场化进程中一个非常重要的课题。本书系统地介绍了稳定约束最优潮流算法的发展, 特别是电压安全成本的评估方面的最新研究成果。

本书叙述深入浅出, 理论联系实际。书中大部分内容反映了近几年来电压安全成本研究的最新进展。本书主要供从事电力系统优化运行与控制、电力市场以及其他相关领域研究的科研人员、工程技术人员阅读, 也可作为工科大学相关专业的研究生的教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力市场下的电压安全成本分析/刘雪连著. —北京: 机械工业出版社, 2014. 11

ISBN 978-7-111-48405-9

I. ①电… II. ①刘… III. ①电力市场—电压—安全成本—成本分析
IV. ①F407. 615

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 249874 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 付承桂 责任编辑: 任鑫 责任校对: 王欣

封面设计: 路恩中 责任印制: 李洋

北京振兴源印务有限公司印刷

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

148mm×210mm · 6. 125 印张 · 140 千字

0001—2000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-48405-9

定价: 38. 00 元



凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务:

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

前言

PREFACE

电力市场化进程是电力工业发展的必然趋势，市场化会带来许多与过去的垄断经营模式不同的新问题。在计划经济或垄断环境下，电网安全完全由垄断的电力部门负责。在市场环境下，电力工业由不同实体的市场参与者组成。在这种情况下，如何保证电力工业的建设适当超前，使电源和网络有必要的充裕度；如何保证系统运行时组织发电厂商提供足够的有功和无功电源；如何使输电系统适应瞬息万变的运行情况，是我们从电力市场运营角度确保电网安全，防止大面积停电所面临的重要研究课题。

市场环境下，电力系统的安全稳定运行由原来的统一调度管理转变为以经济利益驱动各市场主体积极参与维护，因此，对安全成本的评估、为安全定价成为市场化进程中一个非常重要的研究课题。电压安全成本作为维持系统电压安全、稳定需要额外付出的经济代价，成为市场环境下成本分析与研究中的一个重要内容。

电压安全成本研究随着电力市场化改革的发展趋势应运而生，该研究力争将维持和提高系统的电压安全稳定以经济利益的方式进行量度，通过经济制约激励各市场主体自愿提高系统的电压安全水平，并在互利的基础上积极协作，以寻求最优的运营策略，从而引导市场的健康、持续发展，实现资源的优化配置。本书在相关研

究基础上,针对电力系统优化运行的电压安全成本研究中存在的问题,提出了解决方案,并对市场环境下的电压安全成本构成进行了初步的探讨和分析,为进一步研究奠定了坚实的基础。

全书共分5章,第1章介绍了电力市场的基本概念,电力系统优化运行与控制所面临的困难与挑战及其实施方法,电力市场稳定性与电力系统稳定性的相互影响以及电力系统最优安全控制和安全性定价。第2章介绍了常用的静态电压稳定指标,分析了这些指标对优化问题模型及仿真结果的影响,重点介绍了电压稳定约束最优潮流问题的国内外研究现状。第3章针对已有电压安全成本估计方法存在的不足,对考虑电压安全裕度指标的优化问题进行了深入研究,提出三种优化问题模型以估计系统优化运行的电压安全成本,并对各种优化方法得到的系统电压安全成本进行了详细分析与讨论。第4章根据市场环境下各市场主体的技术、经济特性,分析了各市场主体对维持系统电压安全的贡献,给出了各市场主体参与维持系统电压安全而应该获得回报的计算模型,在此基础上,提出了几条经济措施,以经济利益驱动各市场主体自觉提高系统的电压安全水平。第5章阐述了电力市场环境下安全成本评估和安全定价的应用和发展。

本书由刘雪连著,书中的主要内容来自笔者在山东大学攻读博士学位和在北京工商大学工作期间在电力系统优化运行与控制领域的研究成果。博士研究生导师厉吉文教授,以及程新功、曹立霞、孙华东、丛伟、于大洋、潘珂、万洪武等对笔者的研究工作给予了很大的支持和帮助,在本书的编写过程中也得到了他们的许多帮助,在此向他们表示衷心的感谢。同时,感谢北京工商大学学术专著出版资助项目对本书出版的支持。由于本人学术水平有限,对书中的差错和不当之处,恳请读者批评指正。

目录
CONTENTS

前言

第1章 市场环境下的电力系统优化运行	1
1.1 电力市场概述	1
1.1.1 电力市场的内涵与基本概念	1
1.1.2 国外电力市场化改革模式探讨	6
1.1.3 我国电力市场改革现状	25
1.2 电力系统优化运行与控制	29
1.2.1 体制的建立与规范	31
1.2.2 提高运行人员执行效率	31
1.2.3 改善运行控制系统的功能和效率	33
1.2.4 辅助服务	34
1.3 电力市场稳定性与电力系统稳定性的相互影响	35
1.3.1 电力系统的物理稳定性	37
1.3.2 经济领域的稳定性研究	38
1.3.3 电力市场运营的独特性	40
1.3.4 电力市场与电力系统稳定性的相互关系	45
1.3.5 电力市场的动力学模型	46

1.4 电力系统最优安全控制和安全性定价	50
1.4.1 电力系统的安全性控制	50
1.4.2 电力系统安全性定价	52
参考文献	54
第2章 计及静态电压稳定指标的最优潮流	56
2.1 引言	56
2.2 静态电压稳定性指标	58
2.2.1 灵敏度指标	60
2.2.2 奇异值/特征值指标	61
2.2.3 电压稳定性接近指标	64
2.2.4 局部指标	66
2.3 电压稳定约束最优潮流的应用	70
2.3.1 结合静态电压稳定指标优化问题的国内外 研究现状	70
2.3.2 电压稳定约束最优潮流的应用	72
2.4 电压稳定约束最优潮流问题的数学模型	73
2.5 电压稳定约束最优潮流问题的求解方法	77
2.6 电压稳定指标对优化模型及仿真结果的影响	80
参考文献	82
第3章 电压安全成本评估	84
3.1 引言	84
3.2 理想负荷裕度指标	85
3.3 计及理想负荷裕度指标的优化问题建模与仿真	90
3.3.1 优化方法采用的负荷增长模型	91

3.3.2	分布式松弛节点模型	92
3.3.3	算法实现	93
3.4	优化结果分析	97
3.4.1	IEEE-57 节点系统仿真结果分析	97
3.4.2	IEEE-118 节点系统仿真结果分析	105
3.5	理想负荷裕度范围	108
3.6	计及理想负荷裕度范围的多目标最优潮流模糊建模	110
3.6.1	计及理想负荷裕度范围的多目标最优潮流模型	111
3.6.2	目标函数与可松弛约束的模糊化处理	113
3.6.3	计及理想负荷裕度范围的多目标最优潮流模糊模型	116
3.7	计及理想负荷裕度范围的模糊多目标最优潮流算法实现	118
3.7.1	优化问题模型	118
3.7.2	预测-校正原对偶内点法求解	119
3.8	仿真算例	126
3.8.1	IEEE-9 节点系统电压安全成本分析	126
3.8.2	IEEE-57 节点系统电压安全成本分析	132
3.8.3	仿真结论	137
3.9	计及最小电压安全裕度指标的最优潮流模糊建模与仿真分析	138
3.9.1	计及最小电压安全裕度指标的最优潮流模糊模型	139
3.9.2	仿真算例	142
3.10	电压安全成本评估方法分析与比较	149

参考文献	153
第4章 市场环境下的电压安全成本分析	154
4.1 引言	154
4.2 独立发电企业的电压安全成本分析	155
4.2.1 发电商有功备用容量和无功辅助服务	156
4.2.2 独立发电商电压安全成本构成	159
4.3 输配电网的电压安全成本分析	161
4.4 电力用户对维持系统电压安全的贡献	164
4.5 各市场主体之间的有效协作与利益均衡	172
参考文献	177
第5章 安全成本评估与安全定价的应用和发展	178
5.1 引言	178
5.2 安全电价形成机制	179
5.2.1 基于停电损失评估的安全性定价	179
5.2.2 基于机组容量成本的安全性定价	182
5.2.3 发电厂最佳安全成本评估	182
5.3 安全电价的应用	184
参考文献	186

第 1 章 市场环境下的电力系统 优化运行

1.1 电力市场概述^[1]

1.1.1 电力市场的内涵与基本概念

市场是商品交易关系的总和。换句话说，市场是进行商品交易的场所，是商品交易的全过程。就经济学意义而言，市场由供给和需求两个基本要素构成，供求双方相互作用、相互协调，使市场趋于均衡。健康市场的共同特征应该是：价格随需求变化，价格变化影响需求量；买卖市场机制，买方或卖方无垄断行为。

我国是世界上最早生产电力的国家之一，1882 年就在上海南京路装机发电。从 20 世纪 80 年代开始，我国电力工业进入了高参数、大机组、高电压、大电网阶段。目前，我国电力系统形成了六个区域性电网（华北、东北、华东、华中、西北和南方电网）和一个由国家电网公司代管的省级电网——西藏自治区电网，实行中央、区域、省、地（市）、县的五级纵向调度体系，即国调（国家电力调度通信中心）、网调（区域电力调度通信中心）、省调、地调和县调中心，正逐步实现以三峡电站为核心，以北、中、南三大送电通道为主体，南北网间多点互联、纵向通道联系紧密、运行灵活的全国电网互联，从而实现大区甚至全国范围内的资源优化配置。

自从改革开放以来,我国电力工业的迅速发展有力地支持了国民经济的快速发展。但是,发电、输电、配电实行一体化垄断经营的旧的电力体制,越来越不适应社会主义市场经济体制的要求,由此引发的社会问题日益突出。其主要表现为:电力行业三高两低现象(即成本高、价格高、群体收入高,服务质量低和经营效率低)突出;高耗能企业和独立发电厂(IPP,目前已经占到全国装机总容量的50%)呼唤竞争机制;省间经济壁垒严重干扰资源优化配置,造成社会浪费并增大了环境污染程度。同时,我国加入WTO、步入全球经济一体化也要求电力工业进行市场化运作。

另一方面,从理论上说,电力是商品,本身具有价值和使用价值,这种商品理应进入竞争的行列。计划经济体制下的垂直一体化垄断经营模式,导致政企不分和政府直接干预,电力企业毫无市场主体地位而逐渐失去活力。据调查,由行政权力限制竞争者进入市场所产生的行政性垄断现象最为突出。我国垄断体制下的电力项目,是先指定还贷年限和投资回报率,反过来测算需要的电价,并要求政府给予利益上的某些承诺。电价不是由市场形成,而是由企业操纵;企业不是主动参与竞争来提高效率,而是简单地依靠附加电费的方法获取利润^[1]。

我国从1992年开始引入电力市场的概念之后,迅速展开了电力市场相关理论的研究和模拟电力市场的实践和探索。近年来的电力体制改革可以概括为四个阶段:1985年至20世纪90年代初期的集资办电阶段,其目的在于根除缺电和拉闸限电现象,解决最基本的电力短缺问题;20世纪90年代初至1997年,成立国家电力公司,实行企业改制和现代企业管理;从1998年撤销电力工业部至2001年,实行“厂网分开、竞价上网”试点;2002年至

今, 中国电力新组建并成立了 11 家公司和国家电力监管委员会, 标志着中国初级电力市场正式启动和实施。

我国电力市场的发展应循序渐进, 稳步发展。按照电力市场发展的程度, 可将其划分为初级电力市场和发达电力市场两大类。初级电力市场往往只限于发电侧竞争, 输电、配电和用电仍将实行垄断经营。

狭义的电力市场一般是指发电市场、输配电市场、供电市场、用电市场、电建市场等。广义的电力市场, 可以根据商品的市场属性和电力商品的特殊性加以说明, 但目前还没有统一的定义。目前比较流行的几种定义如下:

- 1) 电力市场是采用法律、经济等手段, 本着公平竞争、自愿互利的原则, 对电力系统中发电、输电、供电、用电等各环节的成员, 组织协调运行的管理机制和执行系统的总和。电力市场的管理机制是指, 主要借助经济手段进行管理, 不同于传统的行政管理机制。电力市场的执行系统包括贸易场所、计量系统、计算机系统、通信系统等。
- 2) 电力市场是电力买主和卖主相互作用, 决定其电价和电量的过程。
- 3) 电力市场是电网商业化运营的规范化的环境和场所。
- 4) 电力市场是电力供方和需方分别以利润最大化和成本最小化为目标, 按照约定的规则并以输电网为媒介联系起来, 通过自主竞争和经济合同的形式, 进行电能交易的一种组织体系和电能配置方式。

近百年来, 电力行业在世界各国都是传统的垄断性行业。实施电力市场的关键在于打破垄断、引入竞争。垄断带来的弊端可以归纳为: 排斥竞争, 使消费者利益集体受损; 垄断市场, 剥夺

消费者的知情权和选择权；通过非正当提价而非提高效率的方法改善企业收益；企业惰性增加，对新技术的敏感性逐渐丧失；管理水平低下，竞争意识和竞争力明显下降。

电力市场的基本特征是：开放性、竞争性、计划性和协调性。与传统垄断的电力系统相比，电力市场最大的特征是具有开放性和竞争性。与普通的商品市场相比，电力市场则具有计划性和协作性。

构成电力市场的基本要素如下：

1) 市场主体。与其他商品市场一样，电力市场的市场主体也是由商品生产者、消费者、经营者和市场管理者组成。在传统电力系统中，电力用户始终处于被动“负荷”地位，而在电力市场中，用户则具有一定的选择性和能动性。由于电力交易的需要，电力市场中的成员可以在供应者和用户两者之间转换角色。

2) 市场客体。普通商品市场的客体是指买卖双方交易的对象，即商品。电力市场的客体与市场本身的发达程度有关，主要包括电力（电量）、辅助服务或期权等。电力市场有别于其他商品市场之处，就在于电力生产、输送、消费必须同时完成，具有供需动态平衡的特殊性。这一特点是其他任何商品所不具备的。

3) 市场载体。普通商品市场的载体通常是指网点设施、仓储设施、运输设施、通信设施、交易场所等。电力市场的载体是“电网”。由于电网具有自然垄断的属性，常常由国家或其委托的公司统一管理，为了保证电力市场的公平和公正，电网必须对所有成员无条件地开放。

4) 市场电价。电价是电力市场的核心和杠杆，是电力市场中传递供求变化最敏感的信号，也是体现管理思想的重要工具。与此同时，电价也有其自发性和盲目性的一面，政府管理部门应进

行适度调控和监管,保证价格总水平基本稳定,维护公平竞争。研究电价的关键是电价形成机制和电价结构。

电价形成机制是指遵循价值规律和供需调节规律,由市场形成价格的定价机制。电价结构通常包括电价构成和电价体系两部分。电价构成包括市场成本、期间费用、利润和税金四部分。电价体系是指不同商品之间的比价关系和同种商品价格在不同流转环节的差价关系,以及它们之间的有机联系。电价体系可以经常变动,它在一定程度上是由国民经济的运动而引起的。

随着电力市场的成熟和完善,“电力商品”将不仅仅限于电力和电量,围绕电力平衡存在的各种服务也将成为商品,并在电力市场中大量交易。可见,电力市场中的电价问题更加突出和复杂,电价的多样性必然要求建立完整和可操作的电价监督和管理体系,必须研究和推出较为完善和可行的交易电价理论。

5) 市场规则。电力市场应该具备各种详细的规则,如市场进入规则、交易规则、竞争规则和运行规则。这些规则可以通过立法的形式完成,例如《中华人民共和国公司法》《中华人民共和国合同法》《中华人民共和国反不正当竞争法》《中华人民共和国电力法》等,并在适当的时间及时修订和完善。

6) 市场监管。市场监管是指依靠行政组织、司法组织、经济组织、新闻媒体等,按照市场规则,对市场行为和市场运行过程进行监督的全过程。市场监管应该具备六项职能,即预见职能、监督职能、判断职能、补救职能、仲裁职能和情报职能。

电力市场的总体目标是:打破垄断,引入竞争,提高效率,降低成本,健全电价机制,优化资源配置,促进电力发展,推进全国联网,构建政府监管下的政企分开、公平竞争、开放有序、健康发展的电力市场体系。

在电力市场改革的过程中,不同的市场成员或利益主体对改革目标的理解和界定也是不同的,这些目标之间常常出现矛盾。例如,政府的目标是保障资源优化配置和国民经济可持续发展的宏观战略计划的制订和实施;电力公司的目标是利润最大化,并力图通过各种手段保持在市场竞争中的有利地位;股东的目标是获得较高的投资回报;企业员工的目标是工作有保障、高收入和自身价值的实现;消费者的目标是保证其能源供应市场的份额和相关投资;环境保护组织的目标是控制电力企业造成的环境污染,保持生态平衡;电力监管机构的目标是通过竞争实现最优选择和均衡,通过监管实现整体利益和价值的最大化。

在电力市场的不同阶段,必须明确改革的主要目标和次要目标。在任何时期,都必须首先保证电力系统的安全、可靠和稳定运行。在初期的电力市场中,应更多地关注电力投资和融资,以适当超前国民经济发展速度的思路建设各类电厂,扩大发电规模,加强电网和基础设施建设,构建先进、实用的电力市场技术支持系统。在成熟和比较发达的电力市场中,买方市场的格局已经形成,发电侧和零售侧市场的参与者为数众多,市场力受到监督、制约和控制,改革的焦点应该集中在提高竞争力度、降低电价和成本、提高电力系统运行和交易市场运营的效率 and 效益,为国民经济的发展提供一个可靠的、低成本的能源供应平台。

1.1.2 国外电力市场化改革模式探讨

电力市场化的目的是打破垄断,促进竞争。这样必将会损害垄断行业本身的既得利益。因此,电力行业是电力市场化改革的对象,而各国的政府或议会才是电力市场改革的推动者。

实行电力市场化最早的国家是智利,起步于20世纪70年代末。

其目的在于消除国有企业的腐败、低效和资金缺乏的状况。1982年智利正式颁布了新电力法,以法律的形式确立了输电系统向所有发电厂及用户开放的原则,打破了地区垄断,正式启动了合同电力交易及实时电力交易的方式,把电力企业推向了竞争市场。

近年来,环保、能源、低碳等国际焦点问题对电力市场发展产生了深远的影响,电力体制和机制方面的变化逐步显现出来。从体制结构来看,国家保障能源安全的考虑以及企业提高国际竞争力的需求推动了企业的并购和重组,各国已不再将大规模的产权拆分作为重点;从市场建设来看,各国正在建立和完善促进可再生能源发展的电力市场机制,需求侧响应机制逐渐成为市场建设的重点;从市场监管来看,对垄断行为的监管力度逐步加大,监管方式和监管内容日趋丰富以适应新形势的要求;从电力发展来看,跨国、跨地区电网和智能电网建设成为世界电网发展的趋势,电源结构逐步向低碳化转型,风电和核电成为发展重点。

电力市场是电力工业重构和市场化运营的必然结果,近十几年来得到了迅速发展。20世纪80年代末期,英国率先实行电力工业私有化改革,并提出了轰动世界的 De-regulation,即解除管制的理念。其含义是尽量减少市场管制和干预,并从商业运营的角度将发电、输电和配电的主要功能分解成相互独立的实体。

实际上,英国电力市场是将垄断的电力工业全面解除管制、引入竞争形成的,而美国的电力市场则是在全面私有化基础上进行的,它们是最具代表性的两种电力市场结构模式。英国的强制型电力库(Power Pool)模式、NETA(New Electricity Trading Arrangements,新电力交易规则)模式以及 BETTA(British Electricity Trading and Transmission Arrangements,英国电力交易和传输机制)模式广受关注。美国加利福尼亚州的市场化改革虽然起步较

晚,但却独树一帜,改革伊始就力图设计一种完美、超前和具有表率作用的市场模式。在 2001 年加利福尼亚州电力危机出现之前,这种模式曾一度受到许多学者的推崇。然而,加利福尼亚州电力市场仅仅运营了两年多的时间便出现了严重的电力危机,并导致惨重失败。这种结果远远超出了人们的预料,促使人们细致地思考改革中可能遇到的各种因素和困难,更加稳妥地进行市场化改革。加利福尼亚州电力危机的教训和英国电力市场的经验,将对我国电力市场结构和运营模式的设计产生深远影响。

目前,许多国家和地区都在相继进行电力体制改革、结构重组,建立电力市场,以此提高运营效率和效益。世界上主要的电力市场有英国电力市场,美国加利福尼亚州、PJM(其前身是宾夕法尼亚、新泽西和马里兰 3 个州组建的电力联营体)和 NEPOOL 电力市场,澳大利亚电力市场,新西兰电力市场,阿根廷电力市场,北欧电力市场等。

不同国家电力市场的运营模式可以归纳为两大类:①发、供、用电沿用垂直一体化管理,只是进行有限和局部的改革。采用这种模式的国家和地区有法国、日本、印度、苏格兰、巴基斯坦,以及美国的一些州。②发、供、用电环节解除或放松管制。采用这种市场模式的国家和地区有英国、美国加利福尼亚州、新西兰、澳大利亚、挪威、阿根廷、秘鲁、智利等。虽然各国电力市场的结构互不相同,改革所处阶段及所遇到的问题也不同,但它们都有一些共同的特点。

1) 电价改革是关键。

2) 规模效益日渐消失。垄断导致规模效益越来越低,已无法补偿因低效带来的损失。同时,规模效益的下降和非增性质,已经影响到了输电定价的经济学理论基础。