



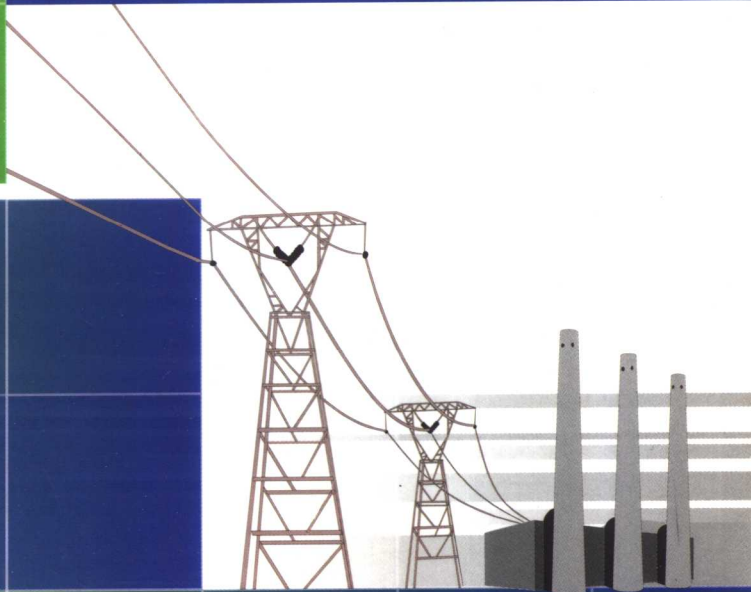
21st CENTURY

十一五规划教材

21世纪全国高等院校

自动化系列

实用规划教材



电力市场原理与实践

邹 斌 周 浩 李晓刚 编 著

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材

电力市场原理与实践

江南大学 邹 斌
浙江大学 周 浩 编著
华东电网培训中心 李晓刚

中国林业出版社
China Forestry Publishing House



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书结合各国的电力市场实践介绍了电力市场的基本原理。其中既包含了能量市场、辅助服务市场、堵塞管理、输电收费等电力市场必需的基本内容,同时也包含了目前人们正在讨论的一些热点专题,如电力市场中的市场力问题、容量补偿问题以及电价的预测和长期合同的影响。全书坚持以原理的讨论为主要线索,从经济有效性与电力系统运行两个方面考察电力市场设计与运行的原理,涉及了电力市场最基础的以及最重要的所有议题。

本书的读者对象为高等院校电气工程及自动化专业的高年级本科生和研究生,也可以作为电力系统相关人员继续教育的教材。

图书在版编目(CIP)数据

电力市场原理与实践/邹斌,周浩,李晓刚编著. —北京:中国林业出版社;北京大学出版社,2006.8

(21世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材)

ISBN 7-5038-4399-3

I. 电… II. ①邹… ②周… ③李… III. 电力工业—市场学—高等学校—教材 IV. F407.615

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第086101号

书 名: 电力市场原理与实践

著作责任者: 邹 斌 周 浩 李晓刚 编著

策 划 编 辑: 李 虎

责 任 编 辑: 李娉婷 曹 岚 张 敏

标 准 书 号: ISBN 7-5038-4399-3

出 版 者: 中国林业出版社(地址:北京市西城区德内大街刘海胡同7号 邮编:100009)

<http://www.cfph.com.cn> E-mail: cfphz@public.bta.net.cn

电话: 总编室 66180373 营销中心 66187711

北京大学出版社(地址:北京市海淀区成府路205号 邮编:100871)

<http://www.pup.cn> <http://www.pup6.com> E-mail: pup_6@163.com

电话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

印 刷 者: 北京飞达印刷有限责任公司

发 行 者: 北京大学出版社 中国林业出版社

经 销 者: 新华书店

787毫米×1092毫米 16开本 15.75印张 355千字

2006年8月第1版 2006年8月第1次印刷

定 价: 24.00元

总 序

我们所处的时代被称为信息时代。信息科学与技术的迅速发展和广泛应用,深深地改变着人类生产、生活的各个方面。人类社会生产力发展和人们生活质量的提高越来越得益于和依赖于信息科学与技术的发展。自动化科学与技术涉及到信息的检测、分析、处理、控制和应用等各个方面,是信息科学与技术领域的重要组成部分。在我国经济建设的进程中,工业化是不可逾越的发展阶段。面对全面建设小康社会的发展目标,党和国家提出走新型工业化道路的战略决策,这是一条我国当代工业化进程的必由之路。实现新型工业化,就是要坚持走科技含量高、经济效益好、资源消耗低、环境污染少、人力资源优势得到充分发挥的可持续发展的科学发展之路。在这个过程中,自动化科学与技术起着不可替代的重要作用,高等学校的自动化学科肩负着人才培养和科学研究的光荣的历史使命。

我国高等教育中工科在校大学生数占在校大学生总数的 35%~40%,其中自动化类学生是工科各专业中学生人数最多的专业之一。在我国高等教育已走进大众化阶段的今天,人才培养模式多样化已成为必然的趋势,其中应用型人才是我国经济建设和社会发展需求最多的一大类人才。为了促进自动化领域应用型人才培养,发挥院校之间相互合作的优势,北京大学出版社组织了此套《21 世纪全国高等院校自动化系列实用规划教材》。

参加这一系列教材编写的基本上都是来自地方工科院校自动化学科的专家学者,由此确定了教材的使用范围,也为“实用教材”的定位找到了落脚点。本系列教材具有如下特点:

(1) 注重实用性。地方工科院校的人才培养规格大多定位在高级应用型,对这一大类人才的培养要注重面向工程实践,培养学生理论联系实际、解决实际问题的能力。从这一教学原则出发,本系列教材注重实用性,注意引用工程中的实例,培养学生的工程意识和工程应用能力,因此将更适合地方工科院校的教学要求。

(2) 体现新颖性。更新教材内容,跟进时代,加入一些新的先进实用的知识,同时淘汰一些陈旧过时的内容。

(3) 院校间合作交流的果。每一本教材都有几所院校的教师参加编写。北大出版社事先在西安市和长春市召开了编写计划会和审纲会,来自各院校的教师比较充分地交流了情况,在相互借鉴、取长补短的基础上,形成了编写大纲,确定了编写原则。因此,这一系列教材可以反映出各参编院校一些好的经验和作法。

(4) 这一系列教材几乎涵盖了自动化类专业从技术基础课到专业课的各门课程,到目前为止,列入计划的已有 30 多门,教材门数多,参与的院校多,参加编写人员多。

地方工科院校是我国高等院校中比例最大的一部分。本系列教材面向地方工科院校自动化类专业教学之用,将拥有众多的读者。教材专家编审委员会深感教材的编写质量对教学质量的重要性,在审纲会上强调了“质量第一,明确责任,统筹兼顾,严格把关”的原则,要求各位主编加强协调,认真负责,努力保证和提高教材质量。各位主编和编者也将尽职尽责,密切合作,努力使自己的作品受到读者的认可和欢迎。尽管如此,由于院校之间、编者之间的差异性,教材中还是难免会出现一些问题和不足,欢迎选用本系列教材的教师、学生提出批评和建议。

张德江

2006年1月

前 言

从 20 世纪 80 年代开始的电力工业市场化改革, 经 1990 年英国电力库的正式启动和 1996 年美国 FERC 发布的《No.888 法令》等推动, 在全球范围内形成了一种趋势。我国目前也已经完成了厂网分开的重组工作, 竞价上网的区域电力市场正在积极稳妥地推进之中。从传统的集中管理的工业模式到发电领域竞争的模式对电力工业而言是一场深刻的改革, 企图一次完成这一过程并快速地解决所有问题是困难的。从其他国家的经验看, 即便是英国从最大的电力库到 2001 年启动 NETA 模式, 美国从以各州为基础的电力市场建设到“标准的电力市场设计”, 经历了长达十多年的运行都没有较好地完成这一转变过程。有关电力市场的理论与实践一直都在迅速发展之中。这其中的难点在于电力系统的运行要求及时的供需平衡, 且没有大规模的电能存储装置作缓冲, 从而要求按照市场机制运行的结果符合以基尔霍夫定律所要求的电力系统的运行, 并保持高效可靠供电。

如何设计合理的电力市场机制, 既能够保证电力系统的安全稳定运行, 同时也可以达到整个工业高效率运行的经济目的? 各国的电力市场实践给出了不同的方案。本书不企图将所有这些方案罗列出来, 而是希望从经济学和电力系统运行的角度讨论各种方案的基本原理和相关的特征。

电力市场有两个目标, 其一是保证电力系统运行稳定与安全, 没有电力系统的安全稳定运行, 一切都没有基础; 其二则是要保证电力工业运行的效率。这两个目标也是理解和讨论电力市场的关键, 本书将以这两个目标为线索展开电力市场的讨论。具体来说, 本书前 6 章是以完全竞争的市场条件为前提, 讨论保证系统运行的电力市场安排, 包括能量市场、堵塞管理、辅助服务、网损分摊、输电收费等内容。电力工业的市场化改革最持续的动力是发电领域的规模经济性基本枯竭, 所以建立完全竞争的市场条件下的电力市场概念是进一步讨论电力市场必不可少的基础。本书的第 7 章~第 12 章则分别讨论了电力市场中一些特殊的专题性质的问题, 如电力市场中的市场力及其抑制措施、电力市场中的中长期合约交易、电价预测、发电厂商的报价策略、容量补偿与容量市场等。这些内容严格地说还属于没有得到完全解决的问题, 很多问题都没有达成共识。我们主要希望读者通过阅读这些专题性质的章节能够得到一个总的思考线索, 提供一个进一步阅读文献进行相关研究的基础。

本书的写作缘于北京大学出版社的教材出版计划, 作者们结合自己多年的教学和科研工作经验编成此书。本书以讲述基本原理为线索, 讨论各种实践的特点。具体写作分工为: 江南大学邹斌老师完成第 1、2、3、6、11、12 章; 浙江大学周浩老师完成第 4、5、8、9 章; 华东电网培训中心李晓刚老师完成第 7、10 章。江南大学的硕士研究生李庆华、许卫红、张影参加了第 1、2、3、6、11、12 章部分编写工作; 浙江大学的博士研究生张富强参加了第 4、5 章部分编写工作, 硕士研究生张权参加了第 8 章部分编写工作, 硕士研究生陈思杰参加了第 9 章部分编写工作。

本书适合作为大学本科教材，也可作为研究生以及相关人员继续教育的教材。电力市场所涉及的内容极为广泛，作为教材，我们有意识地将需要的知识基础限定在高年级本科生已经具备的电力系统基本知识和最优化理论基本知识的范围内，而需要的经济学知识则在书中进行讲述。在具体讲述过程中，建议至少要讲述前 6 章内容，后 6 章的内容可由教师根据情况自行决定。

在本书写作过程中，作者得到了来自所在单位的支持，参考了国内外相关专著和论文，在此特别表示感谢！

由于作者学识有限，时间比较仓促，电力市场本身的发展也十分迅速，书中的疏忽甚至错误之处在所难免，欢迎读者不吝赐教，以便完善我们的工作。

编著者
2006 年 6 月

目 录

第 1 章 电力市场基础 1

1.1 电力系统的基本特征 1	
1.1.1 电力工业的基本特征..... 1	
1.1.2 电力工业的运行方式..... 4	
1.1.3 电力系统调度模型及其解..... 8	
1.1.4 电力市场的基本任务..... 10	
1.2 市场基本原理 11	
1.2.1 完全竞争市场的均衡..... 12	
1.2.2 规模经济性与电力市场..... 17	
1.2.3 有关电力市场与计划的 一个说明..... 19	
1.3 电力市场概述 20	
1.3.1 电力市场的基本模式..... 20	
1.3.2 独立系统运行人..... 22	
1.3.3 能量与辅助服务及 其市场安排..... 23	
1.3.4 电力交易的时间安排..... 25	
本章小结 27	

第 2 章 能量市场 29

2.1 能量拍卖市场概述 29	
2.2 单边竞价的电力拍卖市场 30	
2.2.1 单边竞价的电力拍卖市场 的基本规则..... 30	
2.2.2 单边竞价的能量拍卖市场 数学模型及其分析..... 33	
2.2.3 电力拍卖市场的微观 经济学解释..... 36	
2.3 双边竞价的电力拍卖市场 38	
2.3.1 双边竞价的电力拍卖 市场基本规则..... 38	
2.3.2 双边拍卖市场的出清模型..... 40	
2.4 复杂报价的电力拍卖市场 43	
2.5 其他的定价方法 45	

本章小结 47	
---------------	--

第 3 章 堵塞管理 48

3.1 堵塞管理的一般概念 48	
3.2 电力库的堵塞管理方法—— 节点电价..... 49	
3.2.1 单边竞价拍卖市场的 节点电价 49	
3.2.2 双边竞价的电力拍卖 市场节点电价 57	
3.3 削负荷方法的堵塞管理 60	
3.3.1 按照削减量最小的堵塞 管理方法 60	
3.3.2 意愿因子法 61	
3.4 金融输电权 62	
3.4.1 TCCs 下的套利(Hedge)..... 63	
3.4.2 输电权的拍卖 63	
本章小结 66	

第 4 章 辅助服务 67

4.1 自动发电控制 67	
4.1.1 AGC 系统工作原理 68	
4.1.2 AGC 机组的协调控制..... 69	
4.1.3 AGC 的控制方式 69	
4.1.4 AGC 机组的功率分配原则..... 70	
4.1.5 AGC 机组调节性能 71	
4.1.6 市场环境下 AGC 机组的 选择与费用补偿 72	
4.2 备用 76	
4.2.1 系统中的备用容量及 其分类 76	
4.2.2 备用容量的确定 77	
4.2.3 备用的市场化 78	
4.2.4 备用市场的竞标与结算 78	
4.2.5 负荷参与备用市场的讨论 81	

4.2.6 备用市场同其他市场 之间的关系.....	83	7.1.2 市场力的衡量指标	116
4.3 无功补偿和电压支持	83	7.2 持留容量——行使市场力的 主要途径.....	117
4.3.1 无功补偿的特点.....	83	7.3 市场力的抑制措施	119
4.3.2 无功生产的成本.....	84	7.3.1 设置价格帽	119
4.3.3 电力市场环境下的对 无功补偿新的要求.....	87	7.3.2 购买单向差价合同	120
4.3.4 无功定价和收费.....	88	7.4 电力相关市场及其集中度 指标评定 ^[8]	121
4.4 黑启动	89	7.4.1 相关地理市场	121
4.4.1 绪论.....	89	7.4.2 相关市场和集中度 应用于电力市场	122
4.4.2 黑启动过程中应 注意的问题.....	90	7.4.3 电力相关市场和集中度 指标的评定	123
4.4.3 系统恢复计划的发展趋势.....	91	本章小结	125
4.4.4 黑启动在电力市场 环境下的相关问题.....	91	第 8 章 电力市场中的中长期 合约交易	126
本章小结	93	8.1 电力市场中的电价风险及 规避方法.....	126
第 5 章 网损分摊	94	8.2 利用远期合约进行电价 风险的规避.....	127
5.1 邮票法	94	8.2.1 电力远期合约交易的概念	127
5.2 边际网损系数法	95	8.2.2 可选择电力远期合约	127
5.3 合同路径法	96	8.2.3 电力远期合约交易中 存在的问题	128
5.4 潮流跟踪法	97	8.3 利用期货合约进行电价 风险的规避.....	128
5.5 不同方法的比较	98	8.3.1 期货交易的基本 知识 ^[109,120]	128
5.6 损耗分摊的理想目标	98	8.3.2 电力期货交易的概念	130
5.7 输电损耗分摊中的几个主要问题	99	8.3.3 电力期货交易与远期 合约交易的区别	130
本章小结	100	8.3.4 进行电力期货交易的 可行性	131
第 6 章 输电收费	101	8.3.5 进行电力期货交易的 必要性	132
6.1 输电收费的经济学原理	101	8.3.6 电力期货合约的设计	135
6.2 简单综合成本的分摊方法 ^{[10][90]}	106	8.4 差价合约在电力市场中的应用	140
6.3 两部制电价与固定成本分摊	108	8.4.1 差价合约的基本概念	140
6.3.1 两部制定价原理.....	108		
6.3.2 输电网固定成本的分摊.....	110		
6.3.3 利用份额的计算.....	111		
本章小结	114		
第 7 章 电力市场中的市场力 及其抑制措施	116		
7.1 市场力及其衡量指标	116		
7.1.1 市场力的定义.....	116		

8.4.2 差价合约交易分析.....	140	10.1.5 构造发电厂商报价策略的其他方法	181
8.4.3 差价合约的作用.....	142	10.1.6 报价策略研究的其他方面	181
8.5 电力市场中引入期权交易分析	143	10.2 基于 ARMAX 模型的短期出清电价预测方法.....	181
8.5.1 期权交易的基本知识 ^[109,110]	143	10.2.1 引言	181
8.5.2 电力远期期权合约模型 ^[115]	145	10.2.2 预测短期出清电价的 ARMAX 模型及其参数辨识	182
8.5.3 电力远期期权组合策略分析.....	145	10.2.3 出清电价的 k 步最优预测	186
8.6 电力市场引入保险机制分析	148	10.2.4 参数辨识的最佳历史数据量	188
8.6.1 电力市场引入保险机制的必要性.....	148	10.2.5 预测电价的概率分布	189
8.6.2 电力价格保险.....	148	10.2.6 已知出清电价的概率分布下发电厂商的报价策略	190
本章小结	149	10.3 基于对手报价参数估计的最优报价策略.....	191
第 9 章 电价预测	150	10.3.1 引言	191
9.1 基于神经网络的电价预测模型	150	10.3.2 对手报价参数的估计	191
9.1.1 人工神经网络简介.....	150	10.3.3 发电厂商的最优报价	192
9.1.2 BP 神经网络.....	152	10.3.4 报价成功概率的计算方法	194
9.1.3 RBF 神经网络	153	10.3.5 PAB 定价下的最优报价.....	195
9.1.4 CMAC 神经网络.....	155	10.3.6 按连续供应函数报价的最优策略	196
9.1.5 预测实例.....	157	10.4 发电厂商报价辅助决策系统	197
9.2 基于小波分析的电价预测模型	165	本章小结	198
9.2.1 小波分析的基本理论.....	165	第 11 章 容量补偿与容量市场	199
9.2.2 基于小波变换的 BP 神经网络预测模型.....	170	11.1 容量费方法——补偿的计算	200
9.2.3 预测实例.....	170	11.2 PJM 的容量市场	202
9.3 基于组合思想的电价预测模型	175	本章小结	206
本章小结	177	第 12 章 电力拍卖市场的智能代理	207
第 10 章 发电厂商的报价策略	178	12.1 博弈模型与智能代理仿真概述	207
10.1 概述	178	12.2 发电厂商的学习算法	212
10.1.1 基于成本分析的发电厂商报价策略.....	179		
10.1.2 基于最优化方法的发电厂商报价策略.....	179		
10.1.3 基于博弈论的发电厂商报价策略.....	180		
10.1.4 基于人工智能方法的发电厂商报价策略.....	180		

12.2.1 Roth/Erev 算法	213	12.3 统一出清电价与按报价	
12.2.2 发电厂商报价策略的		估计的比较	219
学习算法	214	本章小结	224
12.2.3 算例	217	参考文献	225

第 1 章 电力市场基础

电力工业诞生不久人们就几乎立即看清楚了电力工业具有明显的规模经济性，从而开始了作为垄断行业的历程。应该说在 100 多年的垄断经营过程中，电力工业的发展为人类社会提供了有力的能源支持，并发展了一套电力系统运行和管理的方法。目前正在世界各地开展的电力工业放松管制(deregulation)，以发电领域按照市场竞争的模式组织生产为主要标志的电力市场建设是电力工业有史以来最重要的革命。

但是，电力工业的市场化改革还没有形成也很难形成“唯一的”、“最优的”电力市场运营机制。不同国家的电力市场实践提出了不同的概念和市场组织形式。这种看似纷乱的现象后面其实有着其内在的联系。无论电力市场的形式有这样那样的变化，它都要首先保证电力系统运行的安全，所以从电力系统运行特征出发了解电力市场的任务是非常重要的一个角度；另一方面，电力市场化的一个根本的目的是促进生产效率的提高，优化资源配置。显然，市场竞争中的关键因素分析则是理解电力市场运行的经济学基础。

理解电力市场总是要抓住两个关键的问题，一个是电力系统的运行特点，一个是市场的原理。可以正常工作的电力市场一定是按照市场规律在成员自愿原则下可以产生保证电力安全稳定运行的机制。所以只有从电力系统的特征出发，结合市场经济的原理才可以从许多看似不同的电力市场实践中找到基本的规律。本章首先回顾了电力系统的基本特征，并在此基础上给出了电力市场的基本任务，然后介绍了边际价格理论的基础以及在电力市场中应用的意义。最后，本章还介绍了完成这些基本任务的可能的市场组织形式。

1.1 电力系统的基本特征

电力系统也许是人类创造的最为复杂的人造系统。而现在人们正在建设的电力市场最基本的任务就是要保证电力系统能够正常运行的前提下提高整个工业的生产效率。电力系统的安全稳定运行与其他工业的运行相比，有其非常独特的性质——电力系统的运行要保证及时的供需平衡且没有经济的电能存储装置作为缓冲，这使得电力市场很难直接套用其他工业的模式，而必须进行有效的“人为”设计。因此，电力系统的运行方式及其特征是电力市场设计的重要基础，有必要首先明确电力工业的基本特征。

1.1.1 电力工业的基本特征

电力系统的基本构成元件如图 1.1 所示，发电机组发出电能，通过输电网络将电能输送到最终端的用户用电设备消耗掉。一般将电力系统分成三个部分：发电、输电和配电。发电部分主要是电能的生产，将其他的能源形式，例如矿物燃料(煤、石油、天然气等)，核燃料以及可再生的能源(如水能、太阳能、风能以及海洋能)等转换为电能；输电部分的功能是将电能从发电机组所在的地点输送到用电地点。而配电部分则是将高压输电网络上的电能经过降压按照用电设备要求的电压等级送到用电设备上。

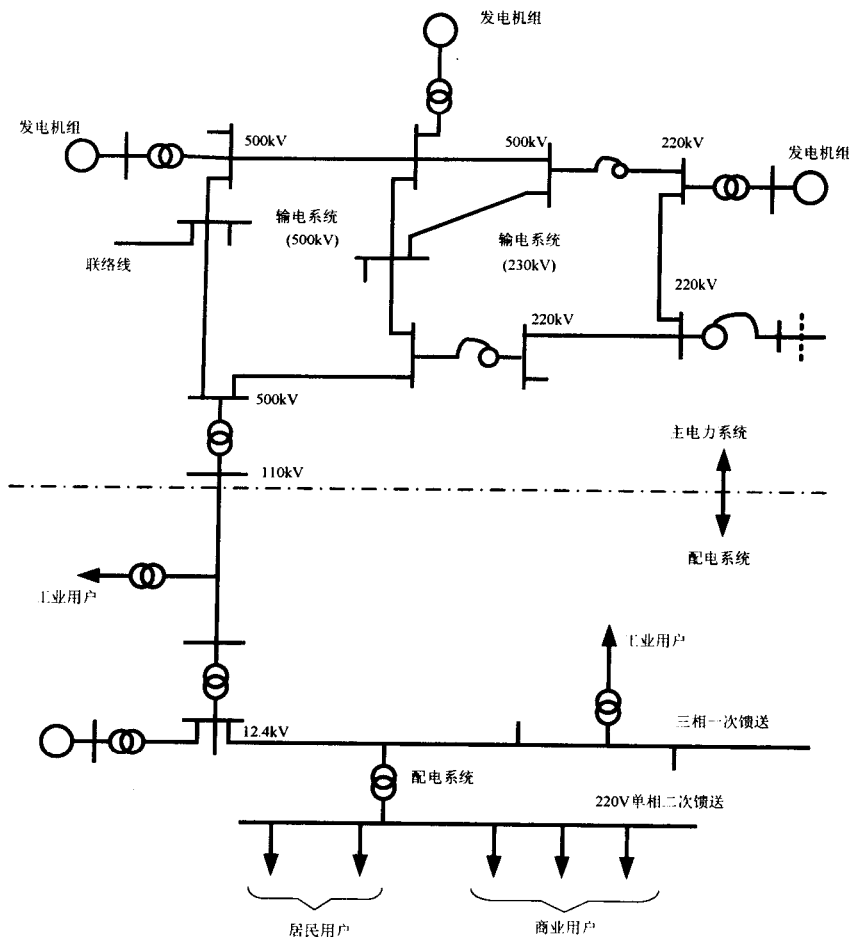


图 1.1 电力系统的基本构成

通常发电机组与用电设备之间有比较远的距离，进行远距离输电采用高电压。高压输电网络都是环形网络，例如图 1.1 中的 500kV 以及 220kV 的输电部分构成了输电网。而发电机组与输电网络则构成主电力系统(the bulk power system)。配电部分是指将输电网上的高压电通过降压变压器变换为各种电压等级并送到用电设备上的一部分输电设备。当电能被传送到负荷所在地以后，用比较低的电压(110kV, 35kV, 10kV, 6kV 以及 380/220V)送给不同的用户。配电网通常是辐射网络，也就是从一个供电设备出发馈送给不同的用电设备。图 1.1 下面的部分就是配电部分。

目前的电力系统都是三相交流电系统。电力系统要求及时的供电与用电平衡，发电机组发出的电能必须被立刻使用完毕，无论是发电多于用电还是少于用电，结果都将引起电力系统的运行不稳定。对于三相交流电而言，所谓功率平衡就是指系统发出的有功功率与无功功率应该等于用电设备和输电损耗所消耗的有功功率与无功功率。如果有功功率不平衡将引起三相交流电系统的频率偏离额定值，如果无功功率不平衡则会引起电压的偏离。无论是电压的偏离或者频率的偏离如果不进行有效的纠正就有可能造成系统的瘫痪。电力系统运行对电压与频率有非常严格的限制。一般规定，电压偏差不应该超过额定电压值的

5%，而频率的偏差则不应该超过 $0.2\text{Hz} \sim 0.5\text{Hz}$ ^{[1][2]}。

电力系统中电能从其生产出来到其消耗整个过程是按照光的速度传递的(大约为 30 万 km/s)，这种速度意味着电能从生产到消费的整个过程只有毫秒级的时间长度，这个过程十分快速。而且电力系统的负荷是变化的，也就是说必须在非常快速变化的过程中保证电力系统中功率的及时平衡。

电力系统另外一个重要的特点是其输电网络的整体性质。从图 1.1 可以看出，电力系统中有许多的发电机组、输电线路以及用电设备，这些设备的部分损害或者强迫停运并不仅仅只影响局部，有可能会引起整体的问题。例如，当某发电机组强迫停运以后，并不仅仅影响这个机组，而造成的是全电网的功率不平衡，如果不能够及时调整，则会造成系统的电压与频率的偏差，这将引起其他的发电机组产生问题，从而造成其整个系统的崩溃，产生大面积的停电事故。电网的整体性质还表现为输电线路影响，当某条线路断开以后，有可能造成其他线路的过载。例如图 1.2(a)所示的电力系统，本来按照正常的状态，每个节点注入功率以及线路上的潮流如图所示都在正常的范围之内，但是如果线路断了以后，则线路上的潮流分布变化为图 1.2(b)的情况，此时线路 1 的最大输电容量为 500MW，而实际输电潮流为 600MW，结果会造成这个条线路被烧断，进而引起更大的事故。有关输电网络的整体性，还表现为输电线路潮流是所有节点上的发电机组出力与负荷共同作用的结果，即便某个机组的出力不变化，其他节点的机组出力或者负荷发生变化，输电线路的潮流也会发生变化。例如，即便节点 1 的注入功率不变，但是节点 3 的机组负荷减少了，这个时候，输电线路的潮流也变化了。输电网络的潮流计算本身是一个复杂的问题。

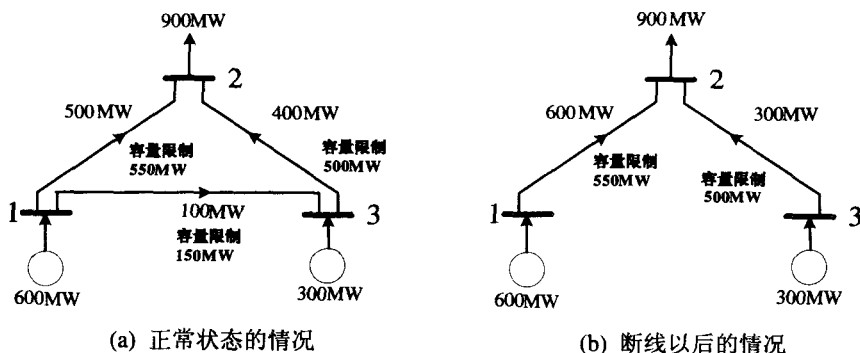


图 1.2 输电线路的潮流

最后，我们还要强调，由于电力是国民经济的基础。社会生产与生活要求电力部门提供高质量、高可靠性的电力供应。断电通常是一种事故状态。

总之，电力系统的特征可以总结为如下四点：

(1) 电力系统的运行要求电力系统中的发电与用电及时平衡。在电力系统中，必须保证随时的发电与用电的平衡，如果不能够保证这种平衡，电力系统就不能够正常运行。如果有功功率不平衡就会引起电力系统的频率偏离额定频率，如果无功功率不平衡就会引起电压的波动，而电力系统要求供电频率以及电压能够在各种干扰因素的影响下维持在相当小的波动范围内。在强调电力工业必须及时地达到供需平衡的特征中，我们还要强调电能不能够大规模地存储。因为电能的这个特征，使得电力系统运行中几乎没有电能的存储装

置作为缓冲手段，而只能够通过及时的调整发电机组的出力达到及时的平衡。

(2) 电力从发电机组生产出来到用电设备使用完毕的整个过程是在毫秒级的时间范围内进行的。这个特点，使得电力系统为了保证及时的负荷平衡需要预先做许多的准备，要求足够的备用以便应付各种不同的变化，保证系统的运行。

(3) 输电网络的整体性质。电力系统中包含了许多发电设备，用电设备以及输电设备。这个系统中每个设备的变化都对系统的总体运行构成了影响，而且每个局部的问题有可能引起系统总体的运行问题。电力系统的这种整体性质还表现为系统中输电网络的潮流计算非常复杂。

(4) 由于电力工业是国民经济的基础，所以电力供应通常被要求高度可靠。

1.1.2 电力工业的运行方式

针对上一节的电力系统的基本特征，在过去的 100 多年的时间里，人们发展了一套电力工业运行的模式来保证系统的安全稳定运行。

在垄断的传统的电力工业组织中，电力公司是一个集发电、输电、配电以及电力零售于一体的组织，电力公司内部包含了发电厂、输电与配电网，也包含了直接针对各种用户的零售部门。而且一个地区甚至一个国家只有一个电力公司，用户只能从一个电力公司手中购买电能。

在垄断的电力公司内部，为了在电力系统的状态变换非常快速的条件下达到及时的功率平衡，电力公司内部安排了一个具有绝对权威的调度中心维持短期的电力系统安全稳定运行。

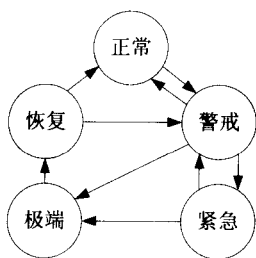


图 1.3 电力系统的各种状态及其转变

人们已经对电力系统的状态进行了大量的研究，将电力系统的运行状态分成正常、警戒、紧急、极端以及恢复等 5 个状态，如图 1.3。如果所有的状态都处在额定的范围内，就是正常状态，一般要求在出现一些偶然事故条件下也能够保证电力系统安全稳定运行。例如，如果系统由于某种干扰使得一些状态超过额定指标，这时系统处在警戒状态，调度应该采取一些调整措施尽快地让系统恢复到正常状态。如果措施不得力，或者再出现其他的

干扰因素，则有可能会使得系统的运行状态更加恶化，转变为紧急状态，甚至直接进入极端状态。在极端状态系统中的主要发电机组将停机，造成大面积停电，这是要特别避免的。

由于电力系统的状态变化非常快，为了保证电力系统在运行过程中有足够的资源进行，能够应付不同的干扰，通常要进行预先的准备。这些准备主要从两个方面进行，一个是将能够压缩的不确定性尽可能地进行压缩，以便不确定性变得容易控制；一个是提供足够的备用资源，当有未预料到的干扰来临时也有足够的手段保证系统运行安全。第一个方面的努力主要体现在对负荷的预测以及分层次控制方面。第二个努力则体现为预留一些备用容量。

短期运行的有功平衡过程就是一个典型的通过预测以及分层控制的例子^[1]。电力系统有功功率负荷随着时间变化的曲线是一个随机的曲线。人们对看起来随机的负荷变化进行

分析以后发现可以将其分成几个有规律的曲线之叠加。如图 1.4 所示为负荷变化的示意图,把一条不规则的负荷变化曲线分解成三种具有不同变化规律的负荷曲线。

第一种负荷曲线,变化的幅度很小,频率很高,周期很短。这是由于预想不到的小负荷经常性的变化引起的,如系统末端的小操作,风雨造成的线路摇摆等。第二种负荷曲线,变化的幅度较大,频率较低,周期较长。这是由于一些冲击性、间歇性负荷的变动引起的。如工业中大电机、电炉、延压机、电气机车等用户的开停。第三种负荷曲线,变化的幅度很大,且变化缓慢,周期也最长。这是由于人们的生产、生活及气象条件等引起的,这种负荷变化基本上可以预计。

对于第一种负荷变化引起的频率偏差进行调整,称为频率的“一次调整”。调节方法是通过发电机组上的调速器系统全自动调节。对于第二种负荷变化引起的频率偏移进行调控,称为频率的“二次调整”。调节方法是通过发电机组上的调频器系统进行的。对于第三种负荷的变化,通常是按照一定的优化分配原则,在各发电机组间实现功率的经济分配,称之为电力系统的经济运行。

电力系统的短期运行是典型的分层控制。如图 1.5,首先是面对预测负荷事先确定发电计划(第一级)。在确定发电计划的过程中,一方面要考察系统的稳定性、安全性;另一方面则要保证经济性。在传统的电力工业中,由于是垄断,其经济性就表现为系统的运行成本最小。而实际负荷与预测负荷之间的差则由调度根据实际的发电机组发电功率与负荷需求的误差调整发电机组的出力(第二级)。实时调度最重要的形式是通过自动发电控制来完成的,通过设置发电机组的出力水平,使得系统的区域控制误差 ACE 达到系统制定的要求。至于很小的偏差则通过自动控制系统进行调整(第三级)。

容易理解,需要及时调整的电力系统必须具有一定的备用设备才能够在需要调整的时候有足够的手段抵御不同的干扰,保持系统稳定安全运行。为此,在不同的时间段上,都要进行相关的计划。图 1.6 给出了目前电力系统中按照时间的延续进行的各种准备^[3]。从图可以看出,为了保证电力系统的正常运行,实际上从几年前就要进行准备,而之所以必须这样的原因就是电力系统的运行要保证及时的功率平衡。如果在运行期间,出现了电力短缺,没有足够的发电容量,那么只有拉闸限电,停止供电。

电力系统的备用通常可以采用冷备用与热备用方式,所谓冷备用是机组本身并没有启动,只有当需要的时候才会启动机组;而热备用则是机组已经运行,它还有一些容量可以进一步提高发电,但暂时作为备用不全力发电。也可从备用的使用状态划分备用。一般分成负荷备用和运行备用。所谓负荷备用是指为了保证负荷突然快速变化而预先准备的备用发电容量;而运行备用则是指为了顶替发电机组的强迫停运而预先准备的发电容量。

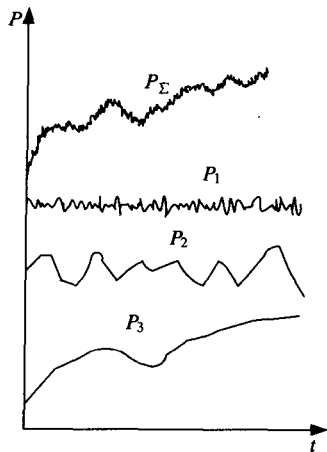


图 1.4 有功功率负荷的变化曲线

P_1 表示第一种负荷变化;
 P_2 表示第二种负荷变化;
 P_3 表示第三种负荷变化;
 P_Σ 表示实际的不规则的负荷变化。

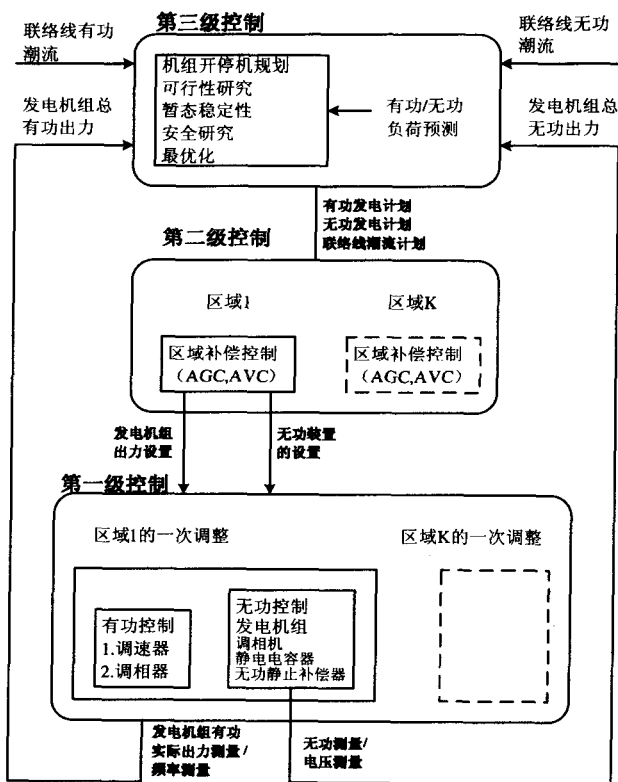


图 1.5 电力系统的分层控制

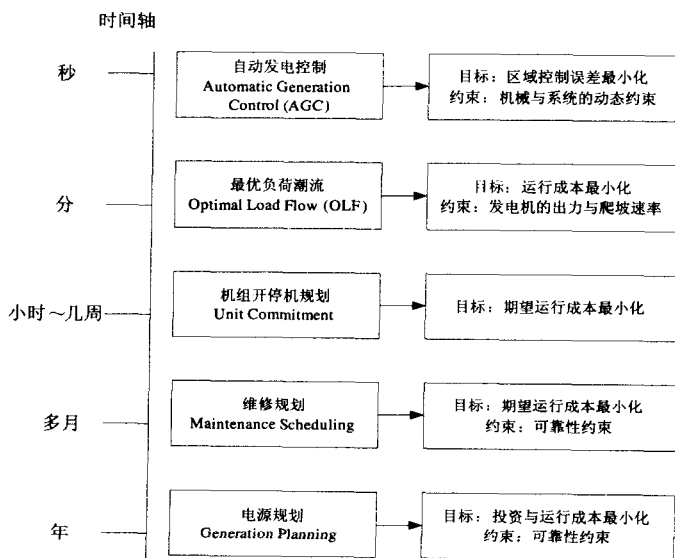


图 1.6 电力系统不同时间尺度的计划安排

电力系统进行有功平衡的基本方法是通过集中的调度，直接调整发电机组的出力保证系统发电功率与不断变化的有功负荷之间的平衡。而为了达到无功平衡，则主要是通过分散地调整系统的无功出力来达到系统的无功平衡。其调整的手段是：(1)发电机。通过控制