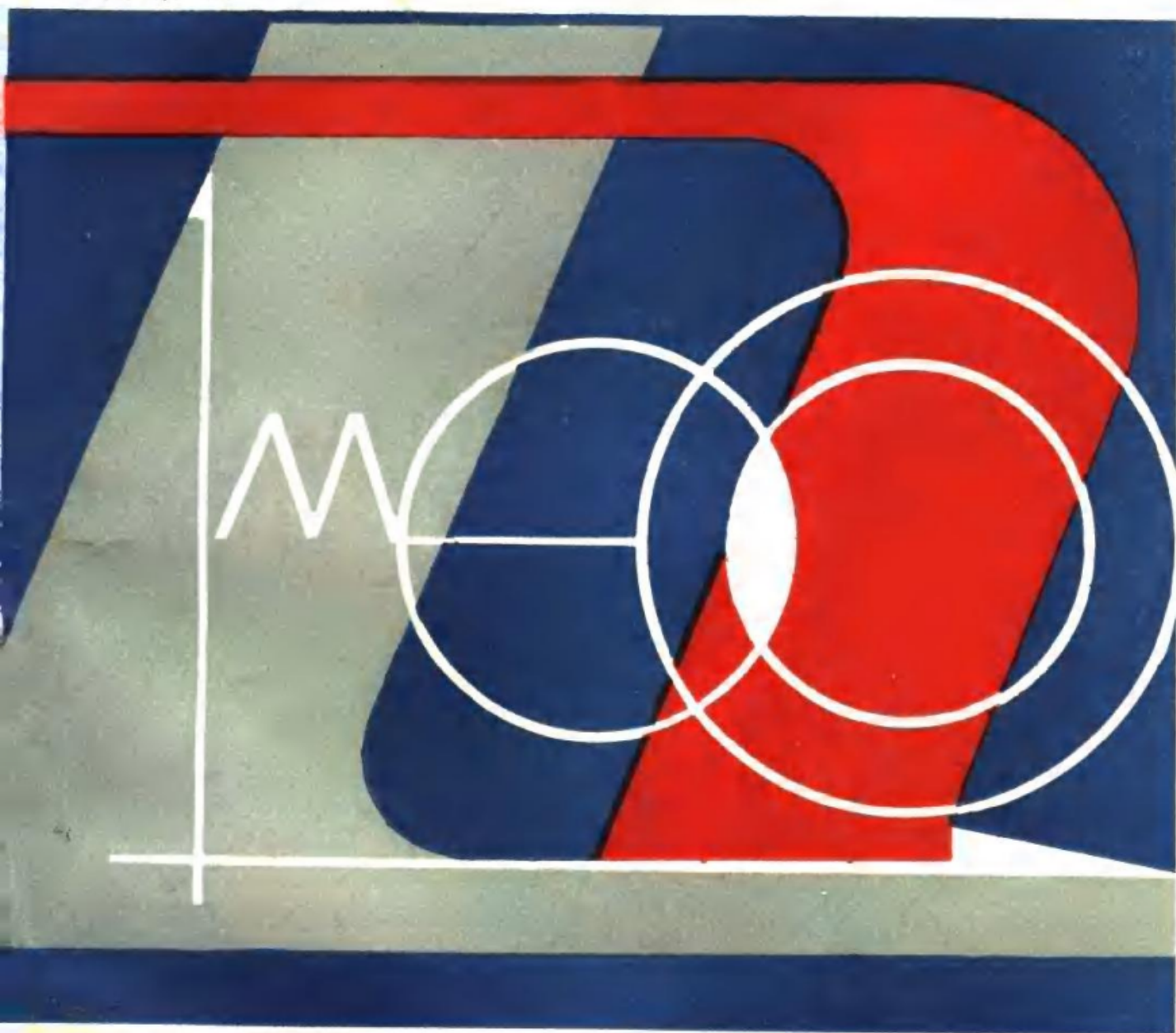


电力系统安全经济运行 —模型与方法

李文沅 著



重庆大学出版社

样书

内 容 提 要

本书以电力系统的安全经济运行为主线，对电源及网络模型、负荷预测、经典经济调度、最优潮流、有功及无功优化、机组最优投入、水火电混合系统的最优协调运行、网流规划的应用及安全经济自动发电控制作了详尽的论述。书中涉及的数学问题以附录形式给出。许多方法新颖，不少观点具有特色。

本书可作为电力专业的研究生教材，也可供电力工程技术人员参考。

电力系统安全经济运行—模型与方法

李文沅 著

责任编辑 黄开植

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆印制第一厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：17.75 字数：443千

1989年3月第1版 1989年3月第1次印刷

印数：1—2600

标准书号：ISBN 7-5624-0195-0 定价：3.54元
TM·12 (课)

序

电力系统运行的经济性是一个值得注意的问题。发电任务的分配,略作优化,就可以提高发电总效率,减少电网损耗,节约发电量达0.5~2%。50年代有的国外资本家还不置信,但经过与实际运行情况反复对比,现在已深信不疑。就我国1988年的电力系统规模说,已有四个大区电网装机容量超过1000万千瓦,年发电量超过了500亿度。以节约1%计,则每个电网可节约5亿度以上。这是一个重要的经济数字。安全是最大的经济,随着我国国民经济生活及文化的提高,供电的安全性日益重要,所以安全与经济是分不开的。

李文沅同志的《电力系统安全经济运行——模型与方法》一书,对这个问题用80年代的概念,广泛地从各个方面介绍了其理论与实例。由于概念清楚,行笔流畅,立论实际、方法新颖,对一般关心这问题的读者,是很有吸引力的读物。但本书内容原是为博士生讲课的教材,也是李文沅同志研究的心得,还提出了许多值得探讨的问题,并明确地提出他个人的见解。不沿袭国内外人云亦云的一般说法,不同凡响。深入的程度既是够水平的,又具有其本人的特色。本书可谓是一本深入浅出的好书。既可为参考书,也可以作为教科书。尤其对要广泛地了解经济调度当代水平的读者,和对这一课题要深入思考一些问题的读者,有不少启发性的资料。

下面摘引本书两小段为例,以窥一斑。

双发电计划是李文沅同志在法国时提出的方法而被法国电力公司采用的,现摘引本书第109页关于双发电计划的一段如下:

“在§5.4.1中我们指出过单发电计划的优点:模型简单,计算量较少,调度实施方便,也指出过它的缺点:在计算正常的发电计划时,就考虑了断线后的所谓预想事故约束,因而约束域较小,优化结果虽然保证了 $N-1$ 线路安全性,但因此而失去了一定的经济性。于是提出了多发电计划的概念,区分正常发电计划和事故发电计划。这种方案在发生断线事故时,需要将发电机有功值从正常发电计划转移到事故发电计划。在第五章第四节我们已介绍了一种基于经典法的多发电计划方案。因为原则上在每根断线情况下,都有各自相对应的事故发电计划,尽管实际上很多事故工况下可以沿用正常发电计划,但是相对说来还是有多个事故发电计划,这对调度实施来说增加了复杂性。本节提出一个双发电计划模型:一个正常发电计划,一个事故发电计划,这个事故发电计划对应于任何一条线路的断线事故,因此调度上容易实施。同时,本模型的特点是在同一模型中同时一次算出两个发电计划,不存在‘循环’迭代的问题。”

李文沅同志把一些基本数学理论集中在附录中解释,概念清楚。随手找一个例子来示例,如本书第242页关于整数规划的一段:

“在线性规划或非线性规划中,如果变量只能取整数,这样的问题称为整数规划,如果只有其中一部份变量限制为整数,其它变量可取连续值,则称为混合整数规划。最特殊的整数为逻辑变量0或1,变量只取逻辑值的规划称为0-1规划。逻辑量是反映了投入或不投入,要或不要的概念。在电力系统机组最优组合问题中,这种变量是极重要的。整数规划的研究成

果至今主要限于整数线性规划方面，而且还没有象单纯形法那样的通用而有效的办法。主要有三类：分支定界法，割平面法，用于0-1规划的布尔运算法。我们这里只介绍分支定界法，另外还介绍拉格朗日松弛法。拉格朗日松弛法是非线性规划的一种对偶算法，它对一切非线性规划都是成立的，也可以用于整数非线性规划问题，我们之所以把它列在整数规划这部份中来介绍，是因为在第九章第五节，我们用此方法求解含整数变量的机组最优投入问题。”

总起来说：本书是李文沅同志对硕士、博士生的讲授教材发展而来的，涉及面广，许多提出的问题，有的还没有解决，尚待进一步探索，因此是一本有价值的专题参考资料。若干年后这些问题的研究有所进展，则本书又是一个记载本专题发展历史的里程碑。本书不愧为了一本出色的专著。

王平洋

1988年9月29日

前言

电力系统经济运行问题,从经典的经济调度理论提出算起,前后经历了几十年的发展过程。世界各国学者和工程技术人员在这个问题上进行了长期的大量的研究,随着计算机的出现和发展,又从理论进入实践,在许多电力公司的调度中心得到应用,表现出了它的巨大经济效益。六十年代中期以后,世界上不少著名电网相继发生由于运行安全性问题所引起的严重停电事故,造成的损失几乎使几十年经济运行所带来的收益丧失殆尽。这使人们认识到必须在电力系统运行中同时考虑经济准则及安全准则。过去安全分析和经济运行基本上是从不同角度来探讨的,70年代之后,部份学者开始注意到这两个原则的统一模型。

分别介绍经济运行及安全分析的专著,国内外已有为数不多的几本,但是这些书都只强调了经济运行或安全分析的某一个侧面,特别是经济运行方面还不能说已经反映出了该领域最主要的研究成果。本书的特点是从安全和经济相结合的角度来讨论最优经济运行的模型和方法。除了该领域的基本知识以外,作者本人的研究成果作为本书主要内容,因此,不少方面是本书所特有的。为了不失系统性,也引用了部份有代表性的其它文献,在引用时对大多数文献进行了“加工”:或者对模型提出了局部改进,或者采用了更有效的计算方法,或者对有关公式作了更详细的推导,或者对某些观点作了补充论述。全书内容力图全面,涉及到电源及网络模型、负荷预测、经典经济调度、最优潮流、有功优化、无功优化、机组最优投入、水火电混合系统的最优协调运行、网流规划的应用及安全经济自动发电控制等,自始至终不脱离安全、经济相统一这个主线索。书中的模型和方法涉及到较多的数学知识,如数学规划、时序分析、变分及极大值原理、网络图论等,为节省篇幅,我们将主要的数学方法作为附录给出,而在正文中原则上不再重复讲述。这些附录中,尽量不作理论证明及推导,围绕正文需要重点说明解算步骤,力求简明扼要。有部份内容是一般数学书中没有的。

需要指出的是,一方面由于国内外的长期研究,安全经济运行的理论和实践都已经有了十分丰富的内容,但是另一方面,由于问题的涉及面广泛,它的许多方面还没有完全解决,有待进一步的探索。因此从历史发展的角度,本书不过是一个“阶段小结”。如果能够通过本书的学习,扩大一般读者在该领域的知识面,而对于有志于电力系统安全经济运行研究的读者,能够开拓他们的思路,有助于他们作出创造性成果的话,那么,我认为本书的目的就算是达到了。本书的大部份章节曾作为作者给重庆大学电力系统专业硕士生及博士生所授课程的主要内容。

孙军同志在加拿大萨斯卡彻温大学攻读博士期间,抽出宝贵时间参加了本书的编写工作,使得本书又增加了一些特色。在撰写本书的过程中,作者得到了重庆大学江泽佳教授、顾乐观教授、徐国禹教授、秦翼鸿教授的支持和鼓励,也得到重庆大学出版社李淑芳副总

编和其他同志的热情帮助。此外，本书出版得到教委基金的资助。作者在此一并表示衷心感谢。

最后，作者还要对电力科学界老前辈王平洋老先生表示由衷的谢意，他花宝贵的时间仔细审阅了本书的手稿，并欣然命笔作序。

由于作者水平所限，书中不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

李文沅
于重庆大学新华村
1988年1月

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 安全经济运行的基本概念	1
§ 1.1.1 可行性及安全性	1
§ 1.1.2 电源运行方式	2
§ 1.1.3 最优目标	2
§ 1.1.4 安全经济运行问题分类	3
第二节 安全经济运行的历史发展	3
§ 1.2.1 经典的经济调度(CED)	4
§ 1.2.2 最优潮流(OPF)	5
§ 1.2.3 网流法(NFA)	6
第二章 电源模型及网络方程	8
第一节 电源模型	8
§ 2.1.1 热力电厂模型	8
§ 2.1.2 水电厂模型	11
第二节 网络方程	15
§ 2.2.1 功率平衡方程	15
§ 2.2.2 交流潮流方程	16
§ 2.2.3 直流潮流方程	21
第三章 负荷预测	25
第一节 概述	25
第二节 周(日)负荷预测指数平滑模型	26
§ 3.2.1 模型的基本思路	26
§ 3.2.2 指数平滑法	27
§ 3.2.3 周(日)负荷预测模型及算法	28
第三节 实时(日)负荷预测的随机型时间序列模型	29
§ 3.3.1 模型的基本思路	29
§ 3.3.2 建模预测的几个环节	30
§ 3.3.3 实际预测中的两个具体问题	32
第四节 实时负荷预测的分解序列模型	33
§ 3.4.1 负荷序列分解方法	33
§ 3.4.2 分解序列预测模型	35
第四章 网损及网损微增率的计算	37
第一节 B系数法	37
§ 4.1.1 B系数法的基本原理	37
§ 4.1.2 最小二乘B系数	39
§ 4.1.3 直流潮流B系数	41

§ 4.1.4	<i>B</i> 系数法应用中的问题	42
第二节	基于潮流方程的网损微增率算法	43
§ 4.2.1	基于牛顿法潮流方程转置雅可比矩阵的算法	43
§ 4.2.2	基于解耦潮流方程的算法	45
§ 4.2.3	基于直流潮流方程的算法	46
第五章	安全经济调度的经典法	48
第一节	不计及网损时的协调方程及算法	48
§ 5.1.1	协调方程及其求解	48
§ 5.1.2	实时调度的分配因子法	49
§ 5.1.3	经济分配意义下的等值发电机	49
第二节	计及网损时的协调方程及算法	50
§ 5.2.1	经典协调方程及其求解	50
§ 5.2.2	修正协调方程及其求解	52
第三节	安全经济调度的经典法模型	53
§ 5.3.1	模型的基本思路	53
§ 5.3.2	两阶段实时安全经济调度模型的数学描述	54
§ 5.3.3	子优化问题 P_2 的具体表达式	55
§ 5.3.4	子优化问题 P_2 的解法	58
第四节	实时安全经济调度的多发电计划方案	59
§ 5.4.1	概述	59
§ 5.4.2	循环方案及数学模型	60
§ 5.4.3	模型的求解方法	63
§ 5.4.4	单发电计划方案和多发电计划方案的计算结果比较	66
第六章	非线性规划最优潮流	70
第一节	最优潮流的惩罚—海森矩阵法	70
§ 6.1.1	模型的数学描述	70
§ 6.1.2	模型的求解方法	71
§ 6.1.3	增广目标函数梯度及海森矩阵的计算公式	74
§ 6.1.4	关于线路安全约束的讨论	76
§ 6.1.5	实施中的几点说明	78
第二节	最优潮流的修正广义简化梯度法	79
§ 6.2.1	引言	79
§ 6.2.2	广义简化梯度法最优潮流的基本模式	80
§ 6.2.3	不等式约束的处理及几点说明	83
§ 6.2.4	一维搜索方向的修正和一维搜索步长的选取	86
§ 6.2.5	两种模型及算法的简单算例	87
第三节	$N-1$ 安全性最优潮流的简化微分模型	89
§ 6.3.1	模型的基本思路及框图	89
§ 6.3.2	不等式约束安全分析	92

§ 6.3.3 简化问题的建立与求解	94
§ 6.3.4 几点说明	96
第四节 有功优化的二次规划模型	97
§ 6.4.1 引言	97
§ 6.4.2 模型的建立	98
§ 6.4.3 模型的求解方法	100
§ 6.4.4 由实例计算结果所得到的几点说明	101
第七章 线性规划最优潮流	102
第一节 线性规划单发电计划模型	102
§ 7.1.1 模型的基本型式	102
§ 7.1.2 在模型中引入虚拟发电量	103
§ 7.1.3 关于模型的讨论	104
§ 7.1.4 模型的求解方法——松弛技术	106
第二节 线性规划双发电计划模型	109
§ 7.2.1 建立模型的基本思想	109
§ 7.2.2 双发电计划模型	110
§ 7.2.3 模型的求解方法	112
§ 7.2.4 关于模型的几点评述	114
§ 7.2.5 两种模型的计算实例	115
第三节 逐次惩罚线性规划模型	119
§ 7.3.1 模型的基本思想	119
§ 7.3.2 有功实时安全经济调度模型的逐次线性化	120
§ 7.3.3 约束及目标函数的线性化处理方式	121
§ 7.3.4 模型中引入惩罚项	123
§ 7.3.5 模型的求解方法	124
§ 7.3.6 计算实例	125
第八章 无功优化模型	127
第一节 无功优化的经典法	127
§ 8.1.1 网损微增率 $\frac{\partial P_L}{\partial Q_i}$ 及 $\frac{\partial Q_L}{\partial Q_i}$ 的计算公式	127
§ 8.1.2 无功协调方程及其求解	129
第二节 灵敏度无功优化模型	130
§ 8.2.1 模型的建立	131
§ 8.2.2 模型的求解方法	132
§ 8.2.3 灵敏度矩阵及梯度矢量的计算式	133
§ 8.2.4 关于整变量问题的讨论	135
§ 8.2.5 简单算例	136
第三节 实时无功优化的增量型线性规划模型	137
§ 8.3.1 建立模型的基本思想	137

§ 8.3.2 增量型线性规划模型	138
§ 8.3.3 模型的求解方法	140
§ 8.3.4 变压器分接头变比的引入	141
第四节 电压优化模型	143
§ 8.4.1 模型的建立	143
§ 8.4.2 模型的逐次线性化	145
§ 8.4.3 模型的求解步骤	145
第九章 机组最优投入问题	147
第一节 最优投入问题的一般描述	147
§ 9.1.1 最优投入问题中的费用特性及约束	147
§ 9.1.2 最优投入问题的一般数学模型	148
第二节 优先顺序法	149
§ 9.2.1 单时段优先顺序法	149
§ 9.2.2 多时段开停机计划	151
第三节 动态规划求解法	152
§ 9.3.1 动态规划求最优投入问题的基本公式及步骤	152
§ 9.3.2 动态规划法中的具体问题及措施	153
§ 9.3.3 简单例子	155
第四节 混合整数规划模型及解法	159
§ 9.4.1 混合整数规划的一般模型及求解思路	159
§ 9.4.2 简化模型及分支定界算法	161
第五节 拉格朗日松弛法模型及解法	163
§ 9.5.1 模型及基本计算步骤	164
§ 9.5.2 对偶问题中的极小问题求解方法	165
§ 9.5.3 乘子 λ' 及 μ' 的调整	167
第十章 水火电混合系统的最优经济运行	169
第一节 概述	169
第二节 不计水头变化时的解析经典算法	170
§ 10.2.1 协调方程的推导	170
§ 10.2.2 求解的基本步骤	172
§ 10.2.3 协调方程的解析解	172
§ 10.2.4 γ_j 初值及修正量 $\Delta\gamma_j$ 的计算	173
§ 10.2.5 简单算例	175
第三节 计及水头变化时的经典算法	178
§ 10.3.1 根据极大值原理推导协调方程及伴随方程	178
§ 10.3.2 求解的基本步骤	180
§ 10.3.3 各计算步骤的实施	181
第四节 动态规划算法	184
§ 10.4.1 动态规划算法的基本格式	184

§ 10.4.2 多水电厂时的求解办法	186
第五节 水耦合系统的线性规划模型	187
§ 10.5.1 模型的数学描述	187
§ 10.5.2 模型的特点	189
§ 10.5.3 模型的求解方法	190
第十一章 网流规划在电力系统安全经济运行中的应用	192
第一节 N 安全性有功经济调度的微增网流法模型	192
§ 11.1.1 问题的数学描述	192
§ 11.1.2 微增网流法模型	193
§ 11.1.3 关于两个问题的说明	195
第二节 水耦合系统日经济调度的网流法模型	196
§ 11.2.1 问题的数学描述	196
§ 11.2.2 网流法模型	198
§ 11.2.3 网流模型的求解	200
第十二章 安全经济自动发电控制	202
第一节 自动发电控制	202
§ 12.1.1 自动发电控制系统中元件的模型	202
§ 12.1.2 自动发电控制原理	207
第二节 经济自动发电控制	209
§ 12.2.1 经济控制逻辑	209
§ 12.2.2 实时经济分配因子	211
第三节 安全经济自动发电控制	212
§ 12.3.1 计及频率效应的广义有功平衡方程及广义线路有功约束方程	212
§ 12.3.2 安全自动发电控制的积分准则	214
§ 12.3.3 安全经济自动发电控制的最优潮流数学模型	216
§ 12.3.4 安全经济自动发电控制最优潮流的快速解法	217
§ 12.3.5 安全经济自动发电控制实施的进一步说明	220
附录A 线性规划	222
A-1 基本概念	222
A-2 单纯形法	223
A-3 对偶原理及对偶单纯形法	227
A-4 大规模线性规划的降阶算法	228
A-5 线性规划松弛技术	231
附录B 非线性规划	232
B-1 基本概念	232
B-2 一维搜索	234
B-3 无约束优化方法	235
B-4 约束优化方法	238
附录C 整数规划	242

	C-1 分支定界法	243
	C-2 拉格朗日松弛法	245
附录D	动态规划	246
	D-1 基本概念及基本方程	246
	D-2 动态规划的求解方法	248
附录E	变分法与极大值原理	250
	E-1 泛函及变分的概念	250
	E-2 泛函无约束极值——欧拉方程	251
	E-3 泛函约束极值	252
	E-4 不定边界的变分问题	253
	E-5 极大值原理	253
附录F	网流规划	255
	F-1 网络图论的基本概念	255
	F-2 最小权问题	256
	F-3 最大流问题	257
	F-4 最小费用最大流问题	259
	F-5 最小费用流问题(OFK法)	260
附录G	时间序列分析	262
	G-1 基本概念	262
	G-2 平稳时间序列的线性模型	263
	G-3 平稳检验及非平稳时间序列的平稳化	267
	参考文献	269

第一章 绪 论

本章先介绍电力系统安全经济运行问题的基本概念，然后概略叙述一下它的历史发展。

第一节 安全经济运行的基本概念

电力系统安全经济运行简单说来，是指在满足各种可行性和安全性约束的条件下，合理安排电源运行方式，使总的运行费用最少或其它目标最优。

对于这样一个定义，须作一些说明，以便对安全经济运行的基本概念有一个了解。

§ 1.1.1 可行性及安全性

首先是关于可行性和安全性约束条件。电力系统是由电源、网络及负荷组成的复杂系统，这里所说的可行性对纯火电系统来说基本要求是指：在正常运行的任何时刻，电源所发出的功率要与负荷的需要和网络中的损耗平衡；各个电源的输出功率要在它所能承担的范围；各个节点的电压要满足用户的要求；线路上的功率不应超过限制值。但是对于水火电混合电力系统来说，可行性的含义则广泛得多，要满足水方面的种种约束条件，比如：由水库调度所决定的日耗水量给定值，水库蓄水量的限制，梯级水电站间的水平衡关系等。

所谓安全性一般来说是指对事故的适应能力，主要包括这样一些约束条件：在一条线路发生断线后，其它线路上的功率不应超过给定的限制值，通常称之为 $N-1$ 线路安全性；在发生断线后，各节点的电压仍应满足用户的要求。当然，在事故状态下的各个限制值可以不同于在正常运行状态下的限制值，即可以放宽要求。此外，很多文献把在正常运行状态下，线路功率及节点电压不应超过限制值也作为安全性的范围，称之为 N 安全性。本书中除了个别地方专门说明以外，也采用这种提法。

上面所列可行性及安全性约束条件是最基本的，或者更确切地说，是至今为止研究得较多的。事实上，电力系统安全经济运行中，根据问题的不同，还可能存在更多的约束条件，例如：

- 在进行实时调度时，必须考虑到从当前状态转移到下一个运行状态之间的可行性，这种约束常常反映为发电机功率调整速度和允许的调整时间所带来的发电量变化量的限制；
- 在有核电站的电力系统中，由于核电站运行的固有特点，如功率的微调节能力差，必须引入由核电站运行特点所带来的约束；
- 互联系统中联络线交换功率的定向定值限制；
- 类似于 $N-1$ 线路安全性，可以提出 $N-2$ ， $N-3$ ， $\dots$ 线路安全性问题。不过由于发生两条线路以上同时故障的概率极小，故这类约束的考虑一般只具有理论分析的意义。

在电力系统安全经济运行中，要同时满足以上各种约束，显然是很复杂的问题。为了使建立的模型符合实际（如运行水平、计算机水平等）而能付诸实用，往往将安全经济运行问

题分成一些子问题来研究, 根据问题的要求和性质不同 (系统规模的大小, 水电厂的有无或多少, 寻求什么样的优化目标 等等), 可以只计及其中某些约束条件, 或者对某些约束采用精确模型而对另一些约束则采用近似模型。

§ 1.1.2 电源运行方式

安全经济运行定义中的第二点是“合理安排电源运行方式”。这方面包含下述内容:

- 电源功率经济分配。这是指已经投入运转的各个发电机组, 在满足约束条件下, 如何分担系统的总负荷, 才可能达到最优目标。对于有功分配来说, 显然这涉及到要事先拟合机组的燃料耗用曲线或费用曲线, 这些曲线的准确性直接影响着经济分配的效益。

- 机组最优投入。当系统的装机容量有较大裕度时, 不需要全部机组投入运转。在满足一段时间 (通常为日) 的电力负荷变化和安全备用的条件下, 如何确定机组的开停计划, 使全时段上的费用最小。这除了涉及机组的发电费用曲线外, 还涉及到机组起动及停机费用的模拟。

- 水火电经济协调。水电厂不直接耗用燃料, 因此从系统角度希望多用水电, 尤其是在高峰负荷时段, 1kWh水电可以代替单位煤耗较多或成本较高的火电。但是从水电厂本身看, 水库的水量或水位以及日耗水量都受限于水库调度。水火电经济协调解决在给定的时间内, 各时段上水电厂和火电厂如何分担负荷, 才能使总费用最少的问题。

- 无功优化中, 除涉及无功源的最优分配以外, 从广义上说变压器分接头位置, 也是“合理安排运行方式”的一个方面。

§ 1.1.3 最优目标

安全经济运行定义中的最后一点是实现目标最优。从经济性的角度, 实现总的运行费用最少是最基本、也是用得最多的目标。追求燃料耗量最少与运行费用最少, 基本上具有相同的内含, 但是也并不完全相同, 因为运行费中除了燃料费以外, 还包括人工费, 甚至维修费也可折算进去, 只是由于燃料费占了发电成本中的绝大部份, 故这两种目标基本上是一致的。

实施安全经济运行到底有多大的经济效益, 这是人们关心的问题。国内外长期的运行及计算实践表明, 电源经济分配可以节省0.5~2%的燃料或运行费用; 机组最优投入的节省量为1~3%; 水火电经济协调的效益依系统内水电厂的情况不同而有较大差异, 有文献记载最高的节省量可达5%。经济运行的经济效益相对值显得不是很大, 但是绝对值是相当可观的。例如, 1%的效益, 按照我国当前的运行状况, 每年可节省大约几百万吨煤, 而就运行水平较高的法国而言, 每年可节约近8000万法郎。

除了最小费用或最小燃料耗量为目标以外, 还可以有其它的目标。例如, 在无功优化时, 常常是以最小网损作为目标。尤其是最优潮流的概念引入后, 使得目标函数的形式可以多样化, 这一点在下一节还要专门提到。

另外, 这里顺便提及一下目标和约束之间的关系 (在一定意义上说也是经济性与安全性之间的关系)。电力系统安全经济运行在数学实质上是最优化问题, 目标和约束之间具有一

种“对偶”的关系。这种所谓对偶关系有两层含义：其一，约束和目标可以以某种方式进行“交换”，这种性质在线性规划中已获得严格的证明，在非线性规划中至少是局部成立的；其二，约束越严格，目标的优性就会越差，反之则反。第一层含义使我们能够得到一些有用的求解方法，而第二层含义则告诉我们，为了得到更优的结果，凡能够放宽约束的地方就应适当放宽，例如“软约束”的观点。

§ 1.1.4 安全经济运行问题分类

安全经济运行问题可以按照不同的观点进行分类。

按时间可以分为：

- 离线 { 中长期经济调度
- 短期安全经济调度（日调度）
- 在线 { 准实时安全经济调度
- 实时安全经济调度
- 安全经济自动发电控制

按运行内容可分为：

- { 机组最优投入（组合问题）
- { 安全经济调度（功率分配问题）
- 水火电经济协调

按有功、无功可分为：

- { 有功无功综合优化
- { 有功优化
- 无功优化

按数学方法可分为：

- { 经典法（基于条件极值、变分法和极大值原理的方法）
- { 最优潮流（数学规划方法）
- 网流法（网络规划方法）

上述这些分类、虽然都只是注意到了问题的某些特征，但是却大有好处。这是因为：首先，由于安全经济运行问题的复杂性，至少在目前不存在解决“一揽子”问题的统一模型，总是从不同角度解决问题的某些方面；其次，分类有助于从各个侧面了解安全经济运行问题。但是我们也提醒读者，除了从分类的各个层次上了解电力系统安全经济运行以外，也应该花力气探索各分类问题之间的内在联系，以寻求它们之间的某种组合，从更高的层次上找到更满意的模型和方法。

第二节 安全经济运行的历史发展

电力系统经济运行的初始概念可以追溯到本世纪30年代。从那时到现在前后几十年间，随着数学基本理论（主要是优化理论）和计算工具（主要是计算机的出现）的发展，电力系统经济运行的模型和方法，在理论和实践上都取得了长足的开发和进步。根据美国著名学者

T. E. Dy Liacco 的统计, 到1984年, 世界各国163个主要调度中心, 138个都有功能大小不同的经济运行程序。这样广泛被使用, 说明经济运行确实给企业带来巨大的经济效益。而且各发达国家每年在这个领域内继续投入相当可观的研究费用。国际上电力系统方面的主要杂志(如IEEE-PAS, EPES, EPSR) 或学术会议论文集(如PICA, IFAC, PSCC, CIGRE) 也常有该领域的文章发表。

我国在电力系统经济运行方面的工作可以溯源到40年代; 在50年代, 东北电网曾试用过经济分配计算尺; 60年代东北电管局和华北电管局曾编制过发电厂的耗煤微增率曲线及一些计算程序。但是真正开始重视这方面的研究及应用, 还是在70年代末期, 到现在为止已取得了一定的研究成果。

为了使读者对这个领域的成果及存在的问题有一个概略的了解, 我们先从数学方法分类的角度简单评述一下电力系统安全经济运行的历史发展, 因为事实上, 正是随着优化数学的进步, 电力系统安全经济运行的理论和实践才得以逐步丰富和发展。同时, 读者了解这些概况, 对学习本书的具体内容和在该领域作进一步的开发研究也是有好处的。

§ 1.2.1 经典的经济调度 (CED)

经典的经济调度通常称为经典法。其基本特点是以协调方程为基础, 在网损微增率和协调方程之间进行迭代运算。30年代初期, M. J. Steinberg 和 T. H. Smith 提出了耗量微增率的概念, 10年之后, E. E. George 提出了网损修正的思想, 50年代, L. K. Kirchmayer 和 G. W. Stagg 对以前的工作进行了总结, 建立了协调方程的解算方法。水火电之间的协调计算是 J. Ricard 在40年代最先提出的, 而后在1953年由 W. G. Chandler 等人加以发展, 也是由 L. K. Kirchmayer 在50年代末进行了总结。在此之后, 对协调方程和网损微增率进行了大量的研究, 除了 Kirchmayer 提出的经典协调方程以外, 人们还推导了其它形式的协调方程, 其中在理论和计算上最有意义的是1976年 C. L. Wadhwa 等人提出的修正协调方程, 而后, T. E. Dy Liacco 从最优潮流的角度给出了证明, F. D. Galiana 于1979年从理论上指出, 经典协调方程虽然计算误差不大, 但是在推导上是不严格的。遗憾的是至今为止, 几乎所有书中(包括经济运行的专著)都只介绍经典协调方程, 而未谈及修正协调方程, 以致不少读者对修正协调方程一无所知。

网损微增率的计算, 自从 Kirchmayer 在50年代提出了 B 系数法之后, 人们不断地作了大量的研究, 许多改进的算法相继出现。概括起来可以分为两大类, 一类是基于简化计算的(包括各种 B 系数法在内), 另一类是基于潮流计算的。各种算法不少于20种, 其中有代表性的是: L. K. Kirchmayer 的 B 系数法, R. Podmore 的直流潮流 B 系数法, R. R. Shoults 的最小二乘 B 系数法, И. М. Маркович 的分布系数法, J. R. Tudor 的基于导纳矩阵的算法, J. F. Dopazo 的基于阻抗矩阵的算法, H. H. Happ 的基于转置雅可比矩阵的算法, T. E. Dy Liacco 的基于转置雅可比矩阵的算法, F. L. Alvarado 的基于转置雅可比矩阵的算法, F. Jamshidian 的基于多域调度的算法。在第四章我们将介绍其中的四种, 并补充介绍两种算法。

对于水火电混合系统, 由于水库调度方面的限制, 使得问题是“动态”的, 经典法解决动态问题的基本出发点是变分原理及极大值原理, 推导的结果仍然是协调方程, 只是方程中

存在水煤换算系数 γ ，因而要进行 γ 迭代计算。固定水头时 γ 为常数，变水头时 γ 为时间的变量，满足伴随方程。

经典的经济调度通常是指有功的经济分配，但是对于无功的优化分配也可以用协调方程的方法。

经典法最主要的优点是计算迅速，在实时计算中这是最有吸引力的优点。正因为如此，尽管最优潮流已经提出20多年，不仅已经获得很多理论成果，而且有的模型已经付诸实用，然而以经典法为基础的经济调度，目前仍然占据着大多数电力公司的调度中心。长期以来认为经典法的主要缺点，就是它不能计及线路安全性约束。在大容量、远距离高压电网日益发展的形势下，线路安全约束越来越重要，尤其是世界上几次大的电力系统事故（如1977年美国纽约网停电事故，1978年法国全国停电事故）之后，人们越来越认识到，在经济运行中如果不考虑线路安全性约束，从长远看并不经济，因为一次事故造成的损失等于几十年乃至一百年经济运行所能得到的收益。事实上，近年来已经进行了在经典法中计及线路安全性约束的研究，并且取得了相应的进展，第五章将要讲述这方面的模型。

§ 1.2.2 最优潮流 (OPF)

最优化数学理论的出现和发展，使得电力系统安全经济运行有了更为坚实的数学根基。六十年代初期，法国著名学者 J. Carpentier 首先将最优化理论引入解决电力系统的经济运行问题。他的方法是直接采用 Kuhn-Tucker 定理，将经济运行的最优化问题变为求解一组非线性方程组。计算实践证明，这种方法收敛极其困难，因而是不可实用的，但是它却是最优潮流的最早尝试。在此之后的20多年间，最优潮流得到了大量的研究，取得了可观的成果。这些研究归纳起来涉及以下方面：

1. 目标函数的形式。最优潮流的目标函数是多种多样的，除了最小运行费用以外，有最小网损、最小甩负荷、最高电压水平、最小控制量变化量、最小燃料贮备、最大联络线交换功率等等。第七章还要介绍把最小费用和最优甩负荷统一为一个模型的目标函数形式。显然在目标函数的多样性方面，经典法是不可能做到的。

2. 约束的处理。因为最优潮流以数学规划作为基本模式，所以在约束的处理能力上是很强的，这也是比之经典法优越得多的地方。大量的研究几乎涉及到可行性及安全性方面的所有约束。从约束的物理特性分为可行性约束和安全性约束，而从约束的时空特性，又可以分为静态约束和动态约束。静态约束是指“空间”上的，如发电机有功、无功上下限，节点电压上下限，变压器分接头位置限制，联络线功率限制，线路安全性约束等。其中 $N-1$ 线路安全性约束的处理，至今研究得还不多，本书将结合具体模型在这方面作较多的分析。电力系统运行是一个动态调度问题，很多情形下不仅要考虑某一瞬时上与空间有关的那些约束，而且应考虑时间间隔上各个运行状态之间的约束，即时间带来的约束，如水量的限制，发电机调整速度的限制，核电站带来的特殊要求等，这些约束称为动态约束。最优潮流在动态约束的处理上，还有一些问题未得到理想的解决。

3. 计算模型及方法。已经提出的最优潮流模型和方法非常多，归纳起来可以分为五大类，

- (a) 非线性规划模型。这类模型大体上又可以分为三种：第一种是属于一阶梯度计算