

电源 投资 决策

张宗益 杨秀苔 著

试验所

15

9

水利电力出版社

(京)新登字 115 号

内 容 提 要

本书就电源投资决策的有关问题进行了系统的分析研究,详细阐述了电源规划的有关理论,并结合具体实例介绍了电源规划的各种分析方法——拉平费用分析法、筛选曲线分析法、水平年新增容量分析法、人工控制的电源规划方法、动态规划法、年决策分解法和大系统 Benders 分解方法等。此外,书中还介绍了电力系统生产模拟的主要原则和基本方法,并提出了有关算法。

本书可以作为各级经济管理和电力能源管理部门、有关科学研究和规划设计单位进行电力能源规划和投资的技术经济分析参考,也可供高等院校有关专业教师、研究生和高年级学生阅读。

电源投资决策

张宗益 杨秀苔 著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号)

水利电力出版社微机排版组排版

重庆大学印刷厂印刷

*

787×1092 毫米 32 开本 7.625 印张 167 千字

1993 年 8 月第一版 1993 年 8 月第一次印刷

印数 0001—1076 册

ISBN7-120-01966-X/TM·523

定价 19.00 元

前 言

电力能源是使用最为广泛的一种二次能源，电力工业的发展情况在很大程度上推动或制约着国民经济的发展，电力系统规划是电力工业建设必不可少的前期工作，其主要任务是根据日益增长的负荷及可能的人力、物力、财力，制定合理的电力工业发展战略和计划。电源投资决策根据某一时期的负荷需求预测，以及国民经济计划的要求、动力资源的分布情况、环境保护的标准和自然条件，考虑系统中各类电厂之间技术上和经济上的互相配合，在一定可靠性水平的条件下寻求一个最经济地满足负荷需求的电源开发方案。它主要回答何时、何处新建哪一类机组以及新建机组的容量多大等重大决策问题。

电力企业属于投资密集型企业，电力工业投资中约有70%集中在电源建设上。电源投资决策是电力工业建设必不可少的前期工作，具有举足轻重的作用。但由于电源投资决策问题的随机性、非线性以及中长期规划的长时期（通常5~30年）内所涉及的惊人决策变量数，不仅使运筹学理论中的典型算法难以应用，而且给解决这一问题带来了很大困难。如今我国的电力工业正处于前所未有的高速发展时期，由于新技术的采用、机组类型的增加、机组容量的增大、用电构成的变化以及诸多不确定性的社会、经济因素的影响，电源规划工作正变得极为繁重，要制定经济合理的电源开发方案，势必要采用系统工程、运筹学、概率论及统计学、技术经济学、可靠性原理等理论与方法来设计制定完善的规划方法。电源

投资决策研究具有重大的理论意义。

电源投资决策不但对电力工业发展有重大影响,而且也严重影响国民经济的发展。如我国曾因决策不当在1968~1973年间将大量燃煤机组改为烧油,1977年后又全部改回烧煤,这一反复给国家带来了很大的浪费。经过40多年的建设与发展,我国电力工业已经取得了世人瞩目的成就,但电力工业的发展仍远未跟上生产和生活对电力的增长需求。电力不足极大地制约了国民经济的发展和人民生活水平的提高。缺电现象的发生,除了与国家资金短缺及投资政策有关外,不重视电源投资决策工作或规划失误也不能不说是一个很重要的因素。科学地进行电源投资决策,不仅能带来巨大的经济效益,而且还将产生巨大的社会效益。电源投资决策研究具有重大的现实意义。

迄今为止,虽然国内外对电源投资决策问题作了大量的研究,但由于问题本身的复杂性,电源投资决策仍有许多问题尚待研究解决。过去的几年中,我们结合国家自然科学基金项目《大型电源系统发展战略决策及方法研究》对电源投资决策问题展开了研究,本书的部分内容就是作者近几年的研究成果总结。如果本书的出版能对我国的电源投资决策工作起到一点推动作用,作者就感到十分欣慰了。

徐国禹教授在本书的写作过程中,提出了大量有益的意见和建议,特在此致以衷心的感谢。

由于电源投资决策问题本身的复杂性以及作者水平有限,书中肯定存在不妥或错误之处,敬希读者不吝指正。

著者 1993年4月于重庆大学

目 录

前 言

第一章 生产模拟	1
第一节 生产模拟的应用.....	1
第二节 负荷需求表示方法.....	2
第三节 发电机组特征.....	4
第四节 机组投入概念.....	7
第五节 火电机组调度.....	17
第六节 水力发电.....	26
小 结.....	32
第二章 孤立系统概率生产模拟	34
第一节 概率生产模拟.....	36
第二节 概率生产模拟方法.....	38
第三节 概率模拟时多段机组的处理.....	47
第四节 系统故障容量概率分布的近似表示.....	52
第三章 基于多正态分布的概率生产模拟直接算法	58
第一节 概述.....	58
第二节 DIC 算法原理.....	59
第三节 数字算例.....	65
小 结.....	69
第四章 计及多状态与多分块机组的概率生产模拟	
DIC 算法	70
第一节 多状态机组的处理方法.....	70
第二节 多块(多容量段)机组的处理方法.....	74

第三节	机组发电量与系统可靠性指标	76
第四节	数字算例	77
第五章	发电系统生产费用方差的快速解析算法	80
第一节	方法的数学描述	81
第二节	生产费用与发电量的样本分布	83
第三节	数字算例	83
小 结		88
第六章	负荷相关时两互联电力系统的概率生产模拟	
网格法 (NEA 法)		89
第一节	网格法模型与算法基础	91
第二节	可靠性计算方法描述	95
第三节	负荷相关时两互联电力系统的经济效益 评估	98
第四节	数字算例	104
小 结		111
第七章	负荷不相关时两互联系统的概率生产模拟全	
随机法 (CRP 法)		112
第一节	全随机法模型与算法	112
第二节	互联系统概率生产模拟全随机法	114
第三节	数字算例	124
小 结		126
第八章	多区域生产模拟	127
第一节	考虑输电约束的模型	127
第二节	运输模型	140
第三节	交换电价的确定	143
第四节	直流潮流约束对多区域模拟的影响	146
第五节	多地区 (区域) 生产模拟	150

第九章 电源规划	152
第一节 电源规划问题的回顾.....	152
第二节 拉平费用分析法.....	158
第三节 筛选曲线分析法.....	164
第四节 水平年新增容量分析法.....	169
第五节 人工控制的电源规划方法.....	176
小 结.....	178
第十章 自动电源规划	180
第一节 自动电源规划方法回顾.....	180
第二节 动态规划的基本概念.....	183
第三节 动态规划在电源规划中的应用.....	186
第四节 年决策分解方法——一种近似方法.....	201
小 结.....	207
第十一章 BENDERS 分解原理在电源规划中的应用	208
第一节 模型的建立.....	208
第二节 算法与步骤.....	219
第三节 规划实例与优化结果.....	222
小 结.....	224
附 录 IEEE RTS 系统负荷数据	225
参考文献.....	227

第一章 生 产 模 拟

生产模拟在电源投资决策中占有重要地位。生产模拟是对未来某一时期发电系统的运行进行模拟，以确定其生产费用和可靠性。生产费用主要包括燃料费用、运行和维修(O&M)费用、机组起动费用等，可靠性则主要用缺电指标电力不足概率值(LOLP)和电量不足期望值(EENS)来衡量。由于生产费用占了总的年费用的40%~60%，缺电指标又极大地影响着系统新增装机容量，因而准确评估生产费用及缺电指标对电源投资决策乃至电力系统规划都具有非常重要的意义。在第一章和第二章中主要介绍评估生产费用的基本概念和基本方法，第三章将介绍一种可用于实际系统计算的生产模拟方法，以及如何用该方法来评估生产费用及缺电指标LOLP和EENS。

第一节 生产模拟的应用

生产模拟在电力系统规划中有着广泛的应用。主要可用于：

(1) 系统规划研究。这类研究通常对未来10~25年的时间(规划期)内，某一特定的新增装机容量方案(或几个方案)进行年生产费用评估，将年生产费用与新增发电容量的投资费用相加，确定一个方案(或几个方案)的总费用现值。

(2) 燃料预算。除了规划期为1~5年外，这类研究类似于长期系统规划研究，用来确定未来1~5年的燃料购买决

策，然后上报给有关管理机构。近期模拟研究通常比长期模拟研究要详细得多。

(3) 购电或售电分析。生产模拟研究常用于评估公司与其他互联的电力公司签定的购电或售电合同的效益。

(4) 服务成本研究。电价分析中，在确定电力服务成本时，生产模拟很有用处。特别重要的是电力服务成本随时间而变化。

(5) 负荷管理研究。可以用来研究负荷管理控制设备或电价结构对负荷曲线形状的影响。

(6) 系统运行方式。生产模拟研究可以用来评估系统不同运行方式的经济性。

(7) 输电规划研究。多区域生产模拟可以用来评估输电扩展规划的经济效益，或者确定修改安全约束产生的影响。

第二节 负荷需求表示方法

生产模拟中负荷需求表达式一般比电力系统可靠性分析中更详细。在可靠性分析中，影响 LOLP 的主要是年峰荷，LOLP 与年峰荷成指数关系。但是在生产模拟中，影响生产费用的是整个一年（或相应研究期）的负荷。因此，对生产模拟而言，重点在于找到小时负荷模型（研究中认为每小时给定一个负荷，该负荷在一小时内保持不变）的准确表达式。

尽管可以准确表达各小时的负荷，但这种情况下的计算时间（和费用）却几乎与负荷持续小时数成正比。因此，有必要将每年 8760 个小时负荷加以综合考虑并适当简化。简化的程度与应用有关。对于详细的预算和电价分析，也许每年要用 8760 个小时负荷。而对于发电扩展规划，可能只需要

576 个小时负荷，即每月取两个典型日负荷。

图 1-1 是一条典型的负荷曲线。这一曲线可以进一步分为四种类型日负荷曲线：周六、周日、峰荷工作日、平均负荷工作日。在进行详细运行模拟时，应该考虑负荷需求的时间顺序、发电机组的运行和关机约束、互联电力公司负荷的差异性、蓄能机组的水库限制、新发电技术的日运行特点（如太阳能电厂）等。

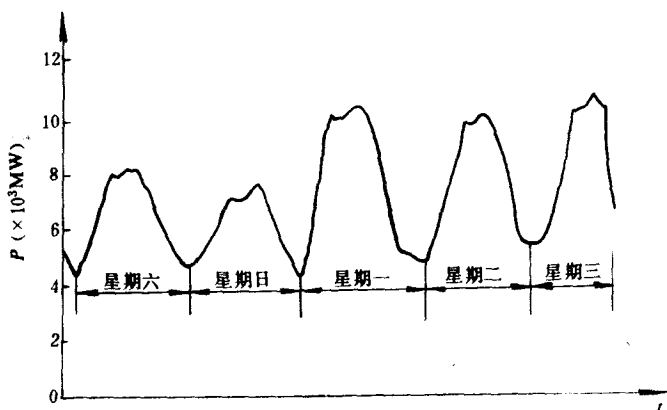


图 1-1 几个典型日的负荷曲线形状

在不太详细的运行模拟中，为了方便而不考虑负荷的时间顺序，将日负荷曲线表示成图 1-2 所示的日负荷持续曲线。由于周六和周日的负荷需求小于工作日，可用一条工作日负荷持续曲线和一条周末负荷持续曲线来分别表示负荷。

总之，所选定的负荷模型对生产模拟的计算机计算费用

有很大的影响，通常由电力规划人员根据应用情况对模拟精度和计算机计算费用加以综合考虑来确定负荷模型。

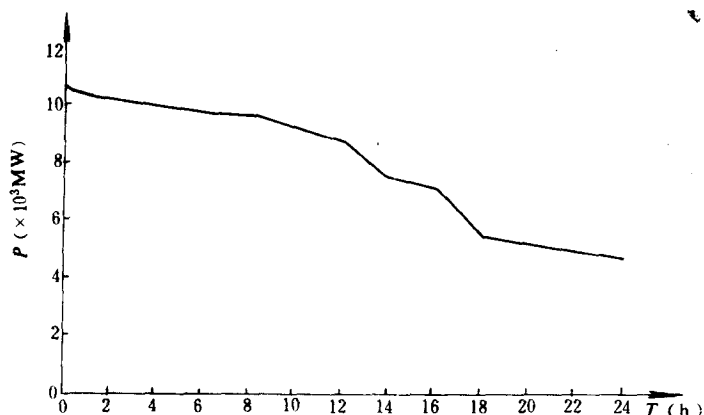


图 1-2 日负荷持续曲线 (T 为负荷持续时间)

第三节 发电机组特征

火力发电机组的主要特征是其燃料输入和功率输出间的关系，典型曲线如图 1-3 所示。燃油和燃气的蒸汽机组，最小稳定输出为 10%~30%，燃煤蒸汽机组则为 20%~50%。曲线中的波折是刚开启进汽阀时的损失造成的。微增热效率，即图 1-3 中的曲线斜率 $[d(\text{燃料输入})/d(\text{功率输出})]$ ，在曲线上开启阀门处形成一个尖峰，如图 1-4 所示。

因为在靠近阀点处微增热效率很大，为了达到经济最优应避免在这些区域附近运行。一般地，在线调度和模拟模型

中都用一系列的直线或多项式来近似热效率特性（如图 1-3 和图 1-4 中的虚线）。

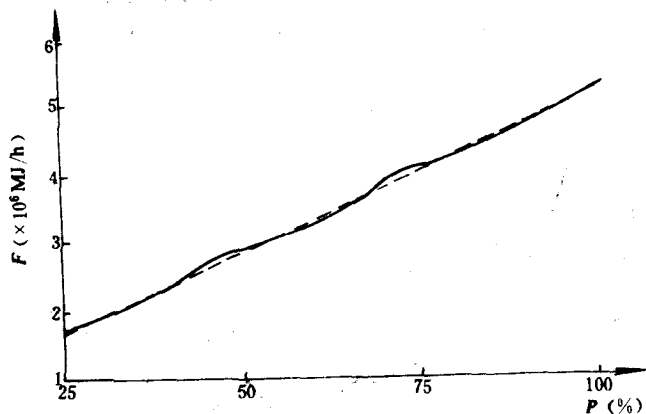


图 1-3 火电机组（燃料）输入（功率）输出曲线

—— 实际曲线 近似曲线

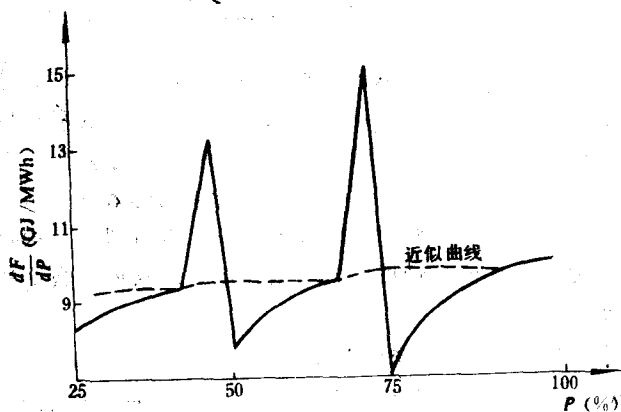


图 1-4 微增热效率

图 1-5 所示为平均热效率曲线，平均热效率为 Δ (燃料输入) / Δ (功率输出)。电厂运行人员经常使用平均热效率曲线，而电力系统调度和规划人员常使用微增热效率曲线。

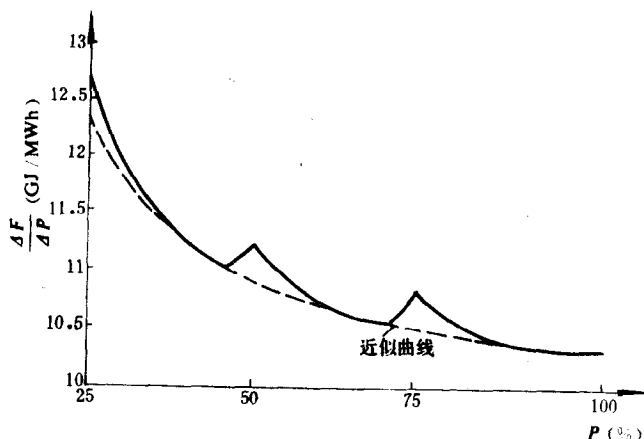


图 1-5 平均热效率

蒸汽轮机的循环热效率依赖于冷却水的温度。冷却水温度的微小变化对热效率的影响可以用修正百分数来加以校正。而对于较大的冷却水温度变化（比如在不同季节），有必要根据冷却水温度的季节平均值重新计算出热效率。

热效率也受到维修时间间隔的影响。蒸汽泄漏、锅炉积垢、腐蚀以及其他热量损失都会累积增大，从而导致电厂净热效率的减小。

水电机组的输入/输出曲线类似于火电机组，如图 1-6 所示 (A 为出水量)。但没有火电机组输入/输出曲线中的波折，因为水轮机的所有进水阀门（旋闸）同时打开而不是一个接

一个打开。有效水头（图 1-6 中的参数）是前池高度（水库）和尾水渠高度之差。

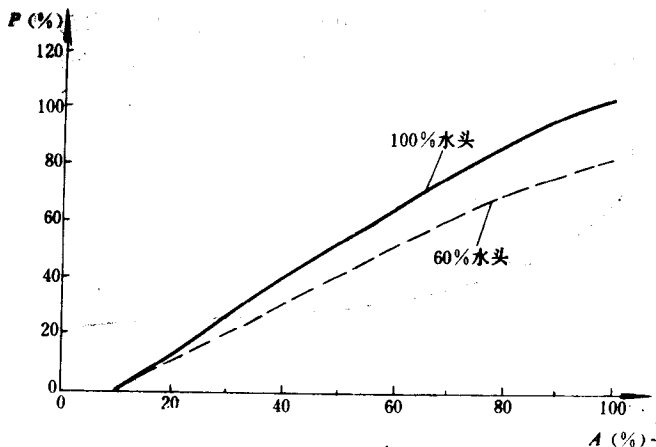


图 1-6 水电机组输入输出曲线

第四节 机组投入概念

电力公司日负荷中，峰荷可能会比谷荷高出 200% 或更多。如果峰荷时运行的发电设备保持全天运行，在谷荷时许多机组就必须以最低发电出力运行。与其让这些机组以最小出力运行，还不如在夜间关闭某些机组更为经济，让某些机组在一天中某些小时内停运而在第二天重新启动。这就带来了机组何时运行或关闭的问题。停运时除了经济上的考虑之外，还必须考虑有关的运行方式、运行约束和系统可靠性等。所有这些都要求在机组投入分析中加以考虑。

一、机组投入的经济问题

在研究机组投入问题时，一个基本准则是在线机组越少，

运行越经济。这一点可从发电费用（如图 1-7 所示）和火电机组的平均热效率曲线（图 1-5）看出。每兆瓦时平均发电费用等于燃料费用与平均热效率的乘积加上运行维修费用与机组起动费用之和。低出力水平较高出力水平的单位发电费用高。

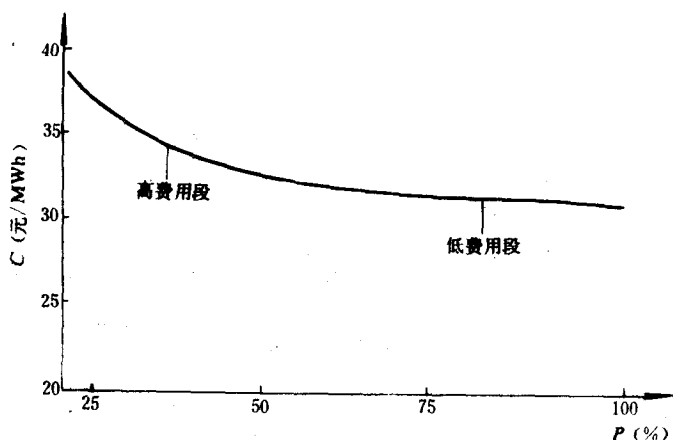


图 1-7 火电机组平均发电费用

一个电力系统的发电机组可以同时发电以满足负荷需求，但由于所有机组发电出力之和等于负荷，许多机组只能以低出力运行，这将使发电费用增大（见图 1-7）。另外，也可以只起动足够满足负荷的发电机组。在这种情况下，所有发电机组都将在图 1-7 所示的较低成本区域内运行，使总的平均发电成本较低。因此，投入的运行机组越少，生产费用越小。

在了解投入最少机组最经济之后，必须确定每一小时投入哪些机组最好。首先列出投入优先顺序，即对机组从最经

济到最不经济进行排队，标准是机组满负荷时的燃料费用大小。对于某一小时，则从低到高投入足够的机组以满足负荷。对最初的投入进行改进，将使其更为经济。

通过减少起动费用可使最初的投入方案更为经济。起动费用是把机组从停运状态变为运行状态的费用。起动过程所花时间从 10 min(燃汽轮机)到几个小时(蒸气机组)不等，并与机组已停运的小时数有关。起动费用主要是使机组达到运行温度和压力所需费用。图 1-8 所示是一条典型起动费用曲线，起动费用是停运小时数的函数。由于起动费用是运行规划的一个重要因素，机组投入计划的改进主要是考虑延长机组的在线小时数以避免起动费用。尽管这种改进以及可能的其它改进对在线运行很重要，但在规划中却常常予以忽略，因为它们的影响只占总生产费用的 0.5% 或更少。

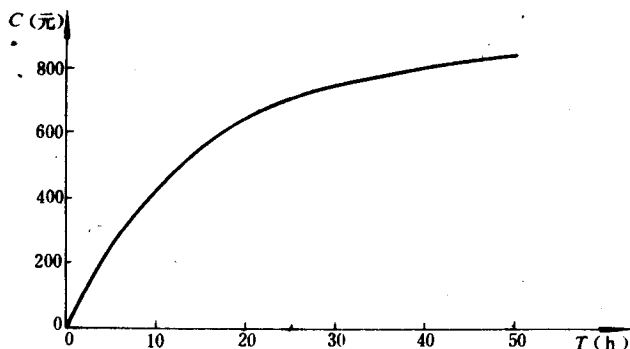


图 1-8 100 MW 机组的典型启动费用
(T 为机组停运时间)

二、机组投入的可靠性问题

除了经济性之外，重要的是保证正常和故障时有足够的在线发电容量以满足负荷。实时机组投入的首要任务是建立未来负荷需求的准确预测模型。通常包括以下三种时间跨度的模型：①提前几小时；②提前一至二天；③提前一周。几小时的预测主要用来对已建立的机组投入计划进行修正，1到2天的预测帮助建立机组的起动和停运计划，提前一周的负荷预测用于安排系统中水电机组的运行计划。这类负荷预测对天气情况很敏感，地理环境不同的地区要分别进行预测。

根据负荷预测，可安排水电机组（径流、有调节能力、抽水蓄能等）逐小时的发电情况。对有调节能力的水电机组和抽水蓄能机组，可能要对机组投入和机组调度作几次迭代计算才能得出最经济的计划。这一点在第六节“水力发电”中还将进一步讨论。水电安排计划的主要效果是减少了对火电机组的峰荷需求。

根据负荷预测以及已建立的水电机组发电计划，就可以确定火电机组的投入计划以保证可靠性。备用容量（简称备用）是系统可靠性的基本指标。备用容量是指超过负荷需求的那部分容量。系统可靠性要求在某一给定的时间内（如10min）电力公司必须能够提供这种容量。备用容量使系统能够在发电机组强迫停运、负荷预测失误和输电线故障等情况下，满足负荷需求。确定系统备用容量的方法较多。

例如，一个联合电力系统要求在线备用等于最大的一台发电机容量加100 MW，以对调速器的控制立即作出反应；另一个联合电力系统将其备用分为两部分：①能够在10min内反应的一级备用；②在30 min内反应的二级备用。通常，在线备用为负荷需求的3%~8%。