

37 现代电力系统自动化丛书

于尔铿

现代电力系统 经济调度

水利电力出版社

现代电力系统自动化丛书

现代电力系统经济调度

于尔铿

水利电力出版社

现代电力系统自动化丛书
现代电力系统经济调度

于 尔 铿

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 4.25印张 91千字
1986年11月第一版 1986年11月北京第一次印刷

印数0001—4460册 定价0.91元

书号 15143·6214

内 容 提 要

本书为现代电力系统自动化丛书的一个分册。以基本概念出发辩证地介绍现代电力系统经济调度的全部内容：经济调度概述、负荷预测、发电厂经济特性、等微增率原理、网损及其微增率算法、火电系统协调方程式、机组经济组合、水火电配合调度、联合电力系统调度、安全约束的处理、离线与在线经济调度实例等等。本书根据实践需要，讨论了电厂微增率的精度、网损修正方式的选择、微型计算机离线经济调度的实现、数据的取得、程序的组织和经济效益估计等实用中出现的问题。书中还深入浅出地讲解了现代算法，例如动态规划的机组经济组合算法和网络优化法的梯级水电厂调度算法等，并以简单例题介绍了计算过程。

本书尤其适合与电力系统经济调度有关的电厂和电网调度人员、管理人员自学或培训，也可供有关技术领导干部、工程技术人员学习，还可作为有关专业院校师生的教学参考书。

丛 书 前 言

随着我国电力工业的发展，发电厂容量越来越大，原来的零星小网逐渐连接形成几个跨省范围的大电力系统，一些省网也发展到相当可观的规模。对这样庞大而复杂的电力系统，用常规的控制和管理方法，显然是应付不了的，必须采用新的手段和工具——电子计算机。

在六十年代，我国电力工业开始应用电子计算机。近十多年来，已取得不少成就，积累了一些经验。但是，这远远适应不了现代电力系统迅速发展的实际需要，与国外的先进水平相比更是相差甚远。近二十年来，国外在这方面的发展是惊人的：发电厂的自动化程度相当高，电网控制中心已普遍采用以电子计算机为核心的自动化监控系统，可以进行数据收集与安全监控、自动发电控制与经济调度及安全分析。当今世界正处于以信息处理为主要内容的新技术革命时代，人们原来的知识有些已经陈旧，需要大量补充和更新，否则，无法跟上新技术迅速发展的潮流。

为此，在中国电机工程学会的大力支持下，我们编写了这套《现代电力系统自动化丛书》，由王平洋任主编，吴凤书任副主编。全书包括十一分册：《现代电力系统自动化与电子计算机的应用与发展》，《电力系统计算》，《现代电力系统计算机监控系统》，《电力系统数据传输》，《现代电力系统安全监视和控制》，《现代电力系统经济调度》，《现代电力系统的保护和自动装置》，《现代火电厂自

动化》，《现代水电厂自动化》，《供电网调度自动化》，《电力工业信息管理自动化》。各册之间，彼此有联系，互相衔接，但各册又自成系统，独立成册。这是一套提高性的普及读物，主要读者对象是电力工业中的技术领导干部，工程技术人员及本专业的工人和高校的师生。我们希望通过这套丛书，能将现代电力系统自动化的形象和状况及发展前景，向读者作一广泛的宣传，普及这方面的知识，以有利于我国电力工业迅速向现代化方向发展。

本书在编写过程中，许多专家和读者提出了宝贵意见，我们根据这些意见作了若干修改。在此，向他们表示衷心的感谢。限于水平和条件，书中一定有不少缺点和问题，敬希读者指正。

序 言

在某些发达国家中，电力系统经济调度工作已有半个世纪的历史了。我国某些电力系统早在五十年代就开展过“等微增率”调度，但后来这项工作却没能跟上电网规模的迅速发展。目前我国已有很多百万千瓦以上的电网，有的已达到千万千瓦级，但与国外同一级电网比较，经济调度的管理水平和自动化水平的差距是非常明显的。

电力系统经济调度工作涉及许多专门的知识，它们往往与我们原有的“经验”和“感觉”不一致。例如：

降低系统总耗煤量和降低总费用是一致的吗？

让高效率机组多带负荷是不是经济调度？

计算机预报负荷能比有经验的调度人员更准吗？

仅仅依靠调度所能实现整个电网的经济调度吗？

网损降到最低是不是做到了系统的经济调度？

水电厂提前完成全年发电量任务是不是经济？

水电厂按最低耗水率发电是不是对电网做出了最大贡献？

联合电力系统怎样运行才能达到总体最优？

用计算机编制经济调度计划能考虑安全因素吗？

微型计算机对实现经济调度计算产生了什么样的影响？

经济调度程序包括哪些内容，怎样评价它们的质量？

调度自动化中有哪些经济调度内容？

.....

由于经济调度工作没达到应有的水平，每年我们损失掉了几十万吨至几百万吨煤，而这本来是可以通过我们的努力事先避免的。我们虽然可以从国外进口先进的计算机和自动化设备，甚至昂贵的程序，但是经济调度的基础资料和工作经验是无法进口的，只能靠我们自己踏实地工作和学习来取得。

为了节约宝贵的燃料和在本世纪末实现电网现代化的目标，我们有责任迅速改变我国电力系统经济调度的落后面貌。我们希望本书介绍的现代电力系统经济调度的基本概念，能引起读者研究这一问题的兴趣，并为这一工作贡献出自己的才智和力量。

目 录

丛书前言

序言

第一章 电力系统经济调度概述	1
第一节 电力系统经济调度的主要内容	1
第二节 电力系统经济调度的效益	4
第三节 我国电力系统经济调度概况	7
第二章 电力系统日负荷预测	9
第一节 日负荷预测模型	9
第二节 日负荷预测算法	11
第三节 负荷预测实用中的问题	13
第三章 火电厂的经济特性和等微增率调度	16
第一节 锅炉的经济特性曲线	16
第二节 汽轮发电机组经济特性曲线	18
第三节 锅炉-汽轮发电机组经济特性曲线	19
第四节 等微增率经济负荷分配的基本概念	21
第四章 网损及其微增率的计算	26
第一节 网损及其微增率	26
第二节 用雅可比矩阵计算网损微增率	29
第三节 网损修正用 B 系数	30
第五章 考虑网损修正的并列火电厂间经济负荷分配	36
第一节 耗煤与网损的协调方程式	36
第二节 协调方程式的意义	39
第六章 机组经济组合	42
第一节 电力系统运行中的机组经济组合问题	42

第二节	计算机组经济组合的优先次序法	45
第三节	计算机组经济组合的动态规划法	48
第七章	水火电联合经济调度	55
第一节	水电厂的经济特性	55
第二节	不变水头水电厂的水火电经济负荷分配	60
第三节	变水头水电厂的水火电经济负荷分配	64
第四节	梯级水电厂的经济调度	67
第五节	动态规划法	69
第六节	网络优化法	73
第八章	联合电力系统经济调度	79
第一节	联合电力系统的网损计算	79
第二节	两区域间有一条联络线的协调方程式	83
第三节	两区域间有两条联络线的协调方程式	85
第四节	联合电力系统的经济调度	87
第九章	考虑安全约束的经济调度	92
第一节	解协调方程式时人工处理线路过负荷	92
第二节	将线路潮流限制化为发电厂功率限制	94
第三节	在协调方程式中加入线路过负荷修正	96
第四节	最优潮流算法	97
第十章	电力系统离线经济调度的实现	103
第一节	数据准备	103
第二节	对经济调度程序的实用要求	105
第三节	微型计算机电力系统经济调度程序实例	107
第四节	中小型计算机上的经济调度程序设计	111
第十一章	电力系统经济调度自动化	114
第一节	电网调度自动化系统	114
第二节	自动发电控制 (AGC)	117
第三节	在线经济调度 (EDC)	121
参考文献		124

第一章 电力系统经济调度概述

经过了约60年的发展，电力系统经济调度包含的内容十分丰富。我们先合理地划分其内容，以便逐步加以介绍，最后再指出它们之间的联系，给人以完整的面貌。

经济调度的效益是每个人都感兴趣的问题，但在目前我们还不能直接准确测量出来，而且随着系统条件不同效益相差很大，有的外商提供的资料甚至达到总燃料费的8%。在这个问题上我们必须持老实和科学的态度，我们坚信经济调度一定有效益，现在可以根据多次采样的模拟试验来估计经济效益，将来应该积极发展直接测量手段。

本章最后的一项内容是介绍我国电力系统经济调度工作概况，讨论了它的特点和今后的方向。

第一节 电力系统经济调度的主要内容

电力系统是由发电厂、输电线路、配电系统及负荷组成的复杂系统。电力系统经济调度的任务是在满足安全和一定质量要求的条件下尽可能提高运行的经济性，即合理地利用现有的能源和设备，以最少的燃料消耗量（或燃料费用或运行成本）保证对用户可靠而满意地供电。

电力系统经济调度的第一个问题是研究用户的需求，即进行电力负荷预测。按照调度计划的周期，可分为日负荷预测、周负荷预测和年负荷预测等。不同周期的负荷有不同的

变化规律。我国电力系统的日负荷曲线往往有三个峰荷：上午、下午和晚上，中午有一次暂短的下降，夜里有一个较宽的低谷段。周负荷曲线一般在工作日（星期一至六）较高而休息日（星期日）较低。年负荷曲线往往随季节呈现出周期性的变化。负荷预测的精度直接影响经济调度效益，提高预测的精度就可以降低备用容量、减少临时出力调整和避免计划外开停机组。

电力系统经济调度的第二个问题是火电机组经济特性曲线的编制和电厂内机组间的经济负荷分配。与一般概念不同，不是按效率（或煤耗率）或容量分配机组负荷，而是按等微增的原则分配各机组的负荷才是最经济的。机组的耗煤量曲线和它的微增率曲线是电力系统经济调度的基础资料，它们的准确性直接影响经济调度效益。

除了发电厂的经济特性之外，网络也有经济特性，电能在网络上的传输损失是电力系统经济调度中要考虑的第三个问题。表征网络传输经济特性的是各发电厂的网损微增率。因为网损牵涉到网络结构和潮流分布，网损微增率的计算是一个较为复杂的问题。

有了各发电厂的耗煤微增率和网损微增率便可以研究各电厂间的负荷经济分配问题了。近来靠近燃料基地的发电厂越来越多，它们发电的经济特性好，但送电到负荷中心引起较大的网损。某些靠近负荷中心的火电厂经济特性较差，但增加出力却能使系统网损下降。这样就形成了电力系统经济调度的第四个问题，即考虑负荷分配时如何协调电厂的发电经济性和送电经济性。

一般情况下由水电厂承担负荷曲线的变化部分，而水电厂的调节能力受到限制时，火电机组必须开停以适应负荷变

化。电力系统经济调度的第五个问题是机组经济（最优）组合，其目标是在满足一天电力负荷变化和安全备用的条件下，确定火电机组的开停计划，使全天耗煤量（费用）为最小。这在水电调节能力不足的电力系统中是一个重要而复杂的问题。

水电厂水库越大调节能力也就越强，从水电厂本身经济性来看应该尽量维持高水位运行，用自然来水发出更多的电能；但从系统角度来看更希望利用水电厂调峰能力，在高峰负荷时同样是 1 kWh 的水电可以代替较多的煤。电力系统经济调度的第六个问题是水火电经济协调。水电系统按日调节能力划分为不变水头水电厂和变水头水电厂，而在有水力联系的水电厂间还存在梯级协调调度问题，这是一个相当复杂的计算问题。

随着电力网的不断扩大，邻近的电力网通过联络线联结在一起运行，由此可以错开峰荷、降低备用容量和充分利用能源。这就是电力系统经济调度的第七个问题——联合电力系统经济调度，其目的是确定各系统间的联络线交换功率计划，以得到更大范围的经济协调的效益。

仅仅考虑经济特性编制的调度计划不一定实用，因为它在安全上可能通不过。电力系统调度计划总是把安全放在第一位；因为电网事故的经济损失远远大于经济调度的效益。因此电力系统经济调度的第八个问题是考虑安全约束的经济调度，这里主要指的是处理线路潮流过负荷问题。一种是在经典的协调方程式中加入线路潮流限制，一种是用最优潮流法统一考虑安全和经济两种因素，可是到目前为止这一问题解决得并不理想。

计算机是进行电力系统经济调度不可缺少的工具，我们

要介绍的第九个问题是如何应用计算机编制调度计划，需要准备哪些数据和选择哪些程序。

最后简单介绍如何实现自动经济调度，即作为第十个问题讨论的是电力系统在线经济控制问题。

此外电力系统经济调度还包括许多有兴趣的课题，例如：发电厂经济特性的实时量测、长期的能量调度和火电厂排烟的污染控制等等，本书限于篇幅难以全部介绍。

为了说明和解决问题，经济调度总是被划分为一个个小课题来介绍，这里我们希望读者把它们联系起来研究。例如：发电厂内机组间的负荷经济分配、系统内发电厂间的负荷经济分配和联合系统内各子系统间的负荷经济分配从原理上看是完全一致的，不同点在于网损修正因素的处理；燃煤火电厂、燃油火电厂、水电厂和联络线均属电源，我们知道了可以用水煤转换系数 γ 将水电厂化为燃煤电厂来处理，显然我们可以用 γ 控制火电厂的燃料总耗量和联络线的交换电量；同样，系统内线路潮流约束的处理方法自然可以用到控制联络线功率限制的处理。辩证地分析不同章节之间的关系，将使您的学习收到事半功倍的效果。

第二节 电力系统经济调度的效益

电力系统经济调度的效益是人们最关心的问题，但遗憾的是目前我们还无法直接而准确地测量它，而且它随系统实际运行条件和管理水平有较大的变化范围。

从国外和国内调度经验我们可以得到一个大的概念：经济负荷分配可节约0.5~1.5%的燃料；机组经济组合的效

益可达1~2.5%；网损修正效益0.05~0.5%^①；水火电协调的经济效益高于火电系统经济负荷分配的效益。

在无法直接测量的情况下，在一年中取一些典型日（例如每月或双月抽取一天）进行统计性的计算机模拟试验是目前估计经济调度效益较科学的方法。对八十年代初期的京津唐电网和东北电网（部分）进行模拟试验得到的经济效益估计值列于表1.1~1.3。

表 1.1 负 荷 经 济 分 配 的 效 益

电 网	相 对 值 (%)	日 节 煤 量 (t 标准煤)	年 节 煤 量 (t 标准煤)	折算成费用 (万元/年)
京 津 唐	0.80	222.9	84000	285
东 北	0.77	195.6	71000	443

表 1.2 京津唐电网机组经济组合效益

相 对 值 (%)	日 节 约 煤 (t 标准煤)	年 节 约 煤 (t 标准煤)	折算为费用 (万元/年)
1.0	278.6	10500	356

表1.1~1.3是以发电总耗煤量最小为目标的经济调度结果。近几年燃料价格在上涨，尤其燃料短缺时要补充高价燃料，使得发电支出的燃料费用上升。另外，一些新建发电厂机组容量很大，自动化程度高，与老发电厂相比发电成本下

① 本节中经济效益的%(百分数)的基准值指系统总耗量。

表 1.3 网 损 修 正 的 经 济 效 益

电 网	相 对 值 (%)	日 节 煤 量 (t 标准煤)	年 节 煤 量 (t 标准煤)	折算为费用 (万元/年)
京 津 唐	0.05	14.2	5183	17.6
东 北	0.24	60.5	22083	136.9

降很多。因此,某些电力系统着手研究按发电燃料费用最少或发电成本最低的准则进行经济调度的效益问题。表1.4 列出了京津唐电网1983年按不同原则调度的模拟试验结果。

表 1.4 京津唐电网1983年不同原则经济调度效益比较

调 度 原 则	年 耗 煤 量 (万 t 标准煤)	年 燃 料 费 (万元)	年 成 本 费 (万元)
总耗煤量最少	994.3	58208.9	64521.8
总燃料费最少	1004.5	57294.9	63190.4
总成本费最少	1002.9	57312.1	63179.3

由表1.4中看出按哪一种原则调度,其对应的目标项就最低。例如:按总耗煤最少调度时年耗煤量最低,年燃料费上升1.6%;按总燃料费最少调度时全年支出的发电燃料费最少,年耗煤量上升1.03%。这是由于按燃料费用最少原则调度时,首先压低了高价燃料的用量,节约费用的效果比较显著。另外,按发电燃料费和发电成本调度结果相近,原因是发电成本中燃料费占的比重最大(约90%)。

我国早期经济调度参考苏联的导则是按耗煤微增率进行的,而目前根据我国具体情况适当考虑价格修正比较合理。

原 书 缺 页