



国家电网公司
电力科技著作出版项目

电力系统优化数学模型 和计算方法

范明天 张祖平 著

013033607

TM715

11



国家电网公司
电力科技著作出版项目

电力系统优化数学模型 和计算方法

范明天 张祖平 著



北航

C1640321



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TM715

11

内 容 提 要

针对电力系统运行、规划与控制中的一些实际问题,本书对科学研究和工程实践中的一些数学模型及数学方法进行了总结,这些模型可以归纳为非线性、线性(包括0-1、整数、混合整数)以及随机模型等,优化方法涉及传统优化、随机优化和动态优化等。

本书包括电源运行规划、电网投资与运行规划、电力系统控制三部分共7章内容。每章从不同角度给出了对 P 、 Q 、 U 、 θ 等变量进行优化的模型和计算方法,数学模型方面包括优化模型、动态模型、微分和差分方程等。第一部分包括1、2章,在小时、日和年时间周期内对发电机出力 P_G 进行优化规划。第二部分包括3~5章,在小时和年时间周期内对 P (包括 P_G 和 P_L)、 Q_G 、 U 、 θ ,以及变压器变比 T 、电容器组数 C 或电抗器组数 R 进行优化规划。第三部分包括6、7章,在秒、毫秒时间周期内对系统遭受小扰动或大扰动后的发电机出力 P_G 、发电机的功角 δ 或系统频率 f 等变量进行安全稳定及优化控制。

本书可为电力工程技术人员和高等院校相关专业师生进行电力系统建模研究提供相应的指导,并可为在优化计算中如何处理元件参数的变化、如何建立数学模型提供参考思路。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统优化数学模型和计算方法 / 范明天, 张祖平著. —北京: 中国电力出版社, 2012. 5

ISBN 978 - 7 - 5123 - 3105 - 1

I. ①电… II. ①范…②张… III. ①电力系统 - 系统优化 - 数学模型
②电力系统 - 系统优化 - 计算方法 IV. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 109765 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京盛通印刷股份有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 3 月第一版 2013 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 18 印张 409 千字

印数 0001—3000 册 定价 60.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

现代科学方法论的基本要素可概括为：提出问题、建立模型、理论描述、数值计算、试验观察以及哲学思考等。建立模型是现代科学方法论中的重要步骤，为了对某一事物或过程进行定量分析，必须通过建立数学模型来表征问题的本质。建立数学模型的过程是认识客观世界的过程，也是对问题本身进行科学研究的过程。然而，实际问题往往远比想象的复杂，我们必须抓住事物的本质，认真分析问题的基本特征，创造性地进行归纳推理，才能建立严谨的数学模型。虽然有限的归纳和类比也有可能产生新知识和新思想，但只有经过详细的理论描述、合理的数值计算和一定规模的试验观察等步骤，才能确认最终结果的合理性和科学性。

本书源于我们在电力系统优化数学模型和计算方法领域的多年潜心研究。书中针对电力系统规划、运行与控制中的一些实际问题，不仅提出了解决问题的优化模型及其计算方法，还给出了相应的研究思路、数学技巧，以及模型正确性的验证方法。所建立的数学模型可以归纳为线性（包括0-1、整数、混合整数）、非线性模型等，讨论的优化方法涉及传统优化、随机优化以及动态优化算法等。

本书建立的部分数学模型和计算方法，已发表在国内外一流学术刊物上，并通过了典型算例或工程实践的验证，因此，本书不仅具有较高的学术水平，还具有一定的独创性和较强的实用性。在当前分布式资源（如分布式电源、储能装置、互动负荷等）有可能大量接入电网，以及信息和通信技术有可能在电力系统的管理和控制中普及应用的发展趋势下，很多传统的电力系统计算模型有待进一步完善和修订，因此，希望本书的出版能对未来电力系统的建模研究有所启迪和帮助，并能对电力工程技术人员和专业研究生进行电力系统建模方面的研究和学习提供有益的指导。

本书后记以“电力系统建模和算法创新研究的哲学思考”为题，对电力系统的建模和算法创新研究中的一些问题进行了初步的哲学思考，以期从哲学的高度对电力系统的建模问题有更加深刻的认识，从而能够更好地指导建模研究的实践。

最后，感谢数位恩师的教诲和启发，感谢数位研究生参与的讨论，尤其是博士生苏傲雪的协助，使本书在数学上更加凝练，更好地体现了作者最具创新性的工作成果。

范明天 张祖平

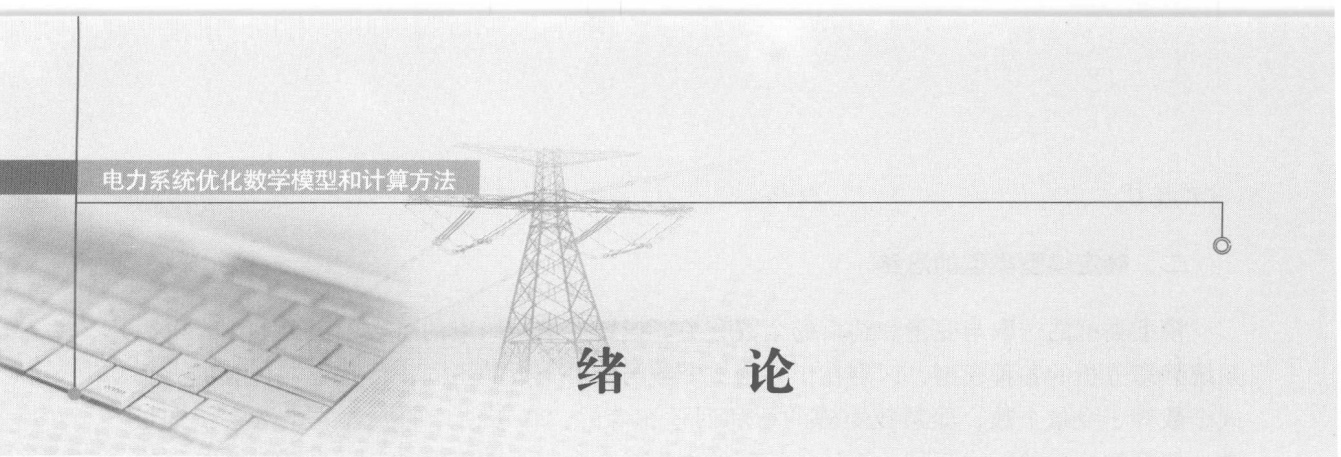
2012年8月

前言

绪论	1
1 抽水蓄能的日经济调度优化方法	5
1.1 引言	5
1.2 建模的基本思路	8
1.3 抽水蓄能日经济调度的数学模型	11
1.4 优化计算的预处理	14
1.5 抽水蓄能日经济调度优化计算过程	17
1.6 优化计算结果分析	19
1.7 结论	28
2 发电机组年度检修计划优化方法	29
2.1 引言	29
2.2 建模的基本思路	31
2.3 GMS 问题的数学模型	33
2.4 GMS 数学模型的模糊化	36
2.5 GMS 的专家系统	39
2.6 发电机检修计划优化计算流程	42
2.7 算例分析	47
2.8 结论	49
3 潮流相关算法	51
3.1 引言	51
3.2 建立有目标无约束潮流模型的思路	53
3.3 建立非线性二次形函数目标的无约束潮流模型	55
3.4 基于 SA 法与 N-R 法的计算过程	56
3.5 基于 SA 法的实际问题算例	58
3.6 离散最优潮流数学模型	63

3.7	离散最优潮流算法	68
3.8	数值计算结果分析	71
3.9	结论	77
4	城市电网负荷优化方法	78
4.1	引言	78
4.2	建立负荷优化模型的基本思路	79
4.3	负荷优化的数学模型	80
4.4	负荷削减优化模型的计算过程	84
4.5	负荷削减优化计算案例分析	87
4.6	供电能力最大化模型的计算过程	96
4.7	供电能力最大化的算例	96
4.8	结论	99
5	离散无功优化方法	101
5.1	引言	101
5.2	建立离散无功优化模型的思路	103
5.3	离散无功优化的单状态模型及算法	106
5.4	离散无功优化的多状态模型及算法	116
5.5	基于专家规则的离散无功优化算法	128
5.6	基于基因算法技术的离散无功优化算法	139
5.7	结论	148
6	负荷频率前馈优化控制方法	149
6.1	引言	149
6.2	建模的思路	150
6.3	负荷扰动 ΔP_L 的模型辨识	152
6.4	电力系统模型	159
6.5	电力系统分层估计	165
6.6	电力系统负荷频率控制器	167
6.7	线性模型变换问题	170
6.8	模拟试验和结果	179
6.9	结论	193
7	电力系统暂态稳定的局部解耦控制方法	194
7.1	引言	194
7.2	解决问题的思路	196

7.3	基于局部控制的系统稳定控制	199
7.4	控制准则的数学分析与理论证明	210
7.5	第一阶段控制和第二阶段控制的综合离线计算过程	231
7.6	离线计算过程中的数值计算模型	234
7.7	模拟系统计算结果分析	245
7.8	结论	252
附录 A	数学规划基础及近似算法	254
附录 B	混合整数规划的近似算法	262
附录 C	变压器变比 T 和并联电容器组数 Y_c 的微分表达式	266
附录 D	利用直流法潮流法计算 δ_{ei} 的公式	270
参考文献		273
电力系统建模和算法创新研究的哲学思考（后记）		277



绪 论

电力系统优化计算涉及各类数学模型及计算方法,需要较多的数学知识。要科学地处理电力系统规划、运行与控制中的实际问题,就必须建立数学模型,而要建立数学模型,首先必须科学地设置变量,以及合理地处理变量与模型的关系。在当前电力系统计算分析的教科书中,一般详细地给出了潮流、短路、稳定等计算模型和算法,但是没有系统地给出设置变量的思路以及变量个数与模型类型的关系。基于作者长期对电力系统数学建模及计算方法的探索,本书尝试提炼出一些共性的方法和思路,可为电力系统优化计算的教学和科研之用。

一、设置变量的思路

电力系统优化计算中设置基本变量的思路如下。电力系统稳态分析计算的基本变量可以概括为以下4种:有功功率、无功功率、电压和相角(P 、 Q 、 U 、 θ),其中有功变量和无功变量又可分为有功出力 and 无功出力(P_G 、 Q_G)、有功负荷和无功负荷(P_L 、 Q_L)。电力系统分析计算中有时把节点上的 P 、 Q 处理为相应的阻抗,不将其设为变量。在电力系统暂态计算中,除电力系统基本变量外,还需增加发电机功角 δ 及发电机转速 ω ,其中发电机转速 $\omega = 2\pi f$ (f 为系统频率)。事实上,变量和函数之间是可以相互转换的。例如,通过对潮流函数表达式的变形,将 $F(x_1, \dots, x_n) = g$ 改写为 $F(x_1, \dots, x_n) - g = 0$,进而改为 $F(x_1, \dots, x_n, g) = 0$,就可以将右端项(节点注入功率 g)处理为变量。由于将(P 、 Q 、 U 、 θ)统一处理为变量,就可以把这些变量都设置上下限,从而可采用常规的优化计算方法对其求优化解,这样就将普通的潮流模型处理成了优化潮流的模型。此外,所有这些变量都可以增加下标,以此表示随时间(如秒、分、时、日、月或年)的变化,如不同时段 t 发电机组 i 的出力,其变量可表示为 $P_{Gi}(t)$ 等。

电力系统优化计算中将元件参数处理为变量的思路如下。电力系统计算时,不仅要对本基本变量进行优化,有时也要对元件的参数进行优化,如变压器的变比 T 和电容器的组数 C 等。但是,设备参数一般都是常数或折算成为阻抗形式,很少有直接将设备参数处理为变量的模型。在电力系统计算和控制中的基本元件主要有两种,即单端元件和双端元件。单端元件包括负荷、发电机、电容器、电抗器等对地元件,双端元件包括线路、开关、变压器等支路元件。如果将潮流模型中的变压器、电容器和电抗器的功率表达式展开,将电容器组数 C 和变压器抽头位置 T 作为变量,就可以用优化方法对其求优化解。概括而言,将设备参数处理为变量的方法是,将 $F(x_1, \dots, x_n) = 0$ 改写为 $F(x_1, \dots, x_{n-1} - x_n(y)) = 0$,

$y = T$ 或 C 。

二、确定模型类型的思路

模型类型的选取与变量和约束的个数有关。设置变量与约束的个数的思路如下。电力系统静态分析的各种模型,区别在于方程式个数与变量个数的不同:传统潮流计算的方程式个数等于变量个数,即系数矩阵的行和列是相等的;状态估计的方程式个数大于变量数,即系数矩阵的行大于列;而优化计算的方程式个数小于变量个数,即系数矩阵的行小于列。许多教科书没有说明在潮流计算中必须设置节点类型的原因,其实很简单,这是由于每个节点只有2个约束条件(P 平衡约束和 Q 平衡约束,方程式个数为2),因而每个节点的 P 、 Q 、 U 、 θ 4个变量中必须有2个变量设为指定量,才能满足潮流模型中方程式个数与变量个数必须相等的求解条件,这种通过固定一些变量求解另一些变量的方法,一般只能得到可行解而非优化解。而建立优化计算模型(如优化潮流模型),则可增加节点上的变量数,并通过优化计算方法一步到位地求出变量的全局优化解,而无需利用潮流程序通过逐点试算来接近最优解。如果要判断所建立的优化计算模型(优化潮流模型)的正确性,则可在优化计算时将某些变量的上下限固定成给定值(例如潮流计算中的指定值),此时优化潮流模型与潮流计算模型是等效的,应该能够得到相同的解,以此检验所建立的优化潮流模型的正确性。

设置辅助变量的方式如下。辅助变量的设置可以简化模型,从而能使优化计算更易于得到所期望的结果。辅助变量的设置可以有多种形式,如可以将基本变量表示成为约束条件,通过减少变量个数(此时模型稍复杂)来降低求解难度、采用控制函数(综合了若干变量的反馈影响)对系统实施控制、采用模糊隶属函数和虚拟费用系数(符号函数)模拟多工况条件等。例如,虚拟费用系数可使抽蓄机组在负荷曲线的谷底多抽水,在负荷曲线的峰顶多发电,而不必为每种工况建立不同的模型;将发电机出力表示成发电量和区域出力的约束条件来降低求解难度等。

建立分解协调或观测去耦控制模型的思路如下。电力系统的控制对象分布甚广,且相互之间存在着紧密的耦合关系。集中控制难以采集全系统的信息,完全的分散控制(仅采用局部信息)又难以实现全局最优,在各控制对象之间实现大量的信息交换,显然也是不经济和不合理的。因此,可以建立分解协调数学模型或观测去耦状态空间,采用分层估计或解耦控制的方法,通过随机优化控制进行求解。使得在发生扰动(小扰动为负荷波动、大扰动为短路、断线或大机组故障退出等)的条件下,仍能保持电力系统的安全稳定运行。

三、本书梗概

本书包括电源运行规划、电网投资及运行规划、电力系统控制三部分共7章内容。各章从不同角度给出了对 P 、 Q 、 U 、 θ 等变量进行优化求解的数学模型和计算方法。数学模型方面包括优化模型、动态模型、微分和差分方程等。第一部分包括第1、2章,涉及对发电机组出力 P_G 的优化求解问题。第二部分包括第3~5章,涉及对 P (包括 P_G 和 P_L)、

Q_G 、 U 、 θ ，以及变压器变比 T 、电容器组数 C 或电抗器组数 R 的优化求解问题。第三部分包括第 6、7 章，涉及对发电机出力 P_G 、发电机的功角 δ 或系统频率 f 等变量进行优化控制的问题。

第 1 章研究含抽水蓄能电厂的日经济调度优化问题。该章以小时为间隔在日周期内对发电出力 P_G 进行优化安排。提出了基于混合整数规划的优化模型，该模型的约束条件为多电厂的月电量、多区域的出力及抽蓄电厂的水量和电量等，其目标函数与约束函数均为线性函数。该模型的变量有连续变量与整数变量两种。其中将所有发电机组出力的变量 P_G 处理为连续变量，而抽蓄机组的抽水工况处理为整数变量。由于该问题为我国某省的实际日调度优化运行问题，计算规模较大且有离散变量，因此采用附录 B 所提出的混合整数规划方法求解。该章的模型能有效地优化抽蓄电厂的运行，满足所有的约束条件，从而达到对负荷曲线进行移峰填谷的目的，对当前的电网智能化运行问题有较大的借鉴作用。

第 2 章研究发电机组的年检修计划优化问题。该章以小时为间隔在年周期内对发电出力 P_G 进行优化安排。提出了基于模糊逻辑动态规划的发电机年检修计划（GMS）模型了。由于 GMS 的约束条件（如检修窗口间隔、备用容量、检修人力、区域检修能力以及同厂发电机检修时间不能重叠等）很难同时满足，为了更灵活地得到 GMS 的可行解，该章利用模糊集合的概念处理 GMS 的目标函数和约束条件的边界。GMS 模型中的目标函数与约束函数均为线性函数，变量为连续变量，采用模糊动态规划方法求解，并在求解过程还利用了专家系统的知识库，该知识库通过模拟电网调度人员的推论方式，以此构成相应的求解规则和逻辑判断依据，有效地解决了发电机年检修计划的优化排序问题。

第 3 章研究病态潮流以及离散优化潮流问题。该章首先将模拟退火（SA）方法与解潮流问题的 N-R 方法相结合，构造出一种基于 SA 的潮流组合模型（构造了二次目标函数），提出了采用 SA 方法求解该组合模型的新算法，用以求解电力系统的病态潮流问题，为潮流计算提供了一个新的算法。而后提出了离散最优潮流模型（构造了线性目标函数及对 P_G 、 Q_G 、 U 、 θ 的约束条件）。该部分内容创造性地将电容器、电抗器及变压器变比均处理为离散变量，并提出了一种在线性规划的循环迭代计算过程中改变变量增量的方法。该模型采用逐次迭代线性规划（SLP）及附录 B 所提出的近似整数规划算法求解，为求解最优潮流问题提出了一个新算法。

第 4 章研究负荷削减最小化和供电负荷最大化的问题。由于规划阶段负荷 P_L 的值无需精确描述，故该章采用基于直流潮流法的负荷优化模型对负荷 P_L 进行优化，其中将 U 、 θ 处理为定值。该章首先提出了故障情况下节点负荷削减最小化模型，其中节点负荷削减量 P_C 为变量（节点负荷 P_L 为限值），目标函数为节点负荷削减量 P_C 的总和最小；而后提出了正常情况下的节点供电负荷最大化模型，其中节点负荷 P_L 为变量，目标函数为节点供电负荷 P_L 的总和最大。这两种基于线性规划的优化模型均采用附录 A 所述的通用线性规划方法求解，并采用常规潮流方法（LF）进行校验，即将优化计算结果（各节点负荷值）作为已知条件代入常规潮流计算模型进行潮流计算。

第 5 章研究离散无功优化问题。该章提出了基于线性迭代规划（SLP）的离散无功优化模型，其中将电容器组数 C 、电抗器组数 R 及变压器变比 T 均处理为离散变量，其余的

(P 、 Q 、 U 、 θ) 均处理为连续变量。首先给出了电力系统单一运行方式下的离散无功优化模型, 然后给出了具有对角块阵形状的多状态无功优化模型。该章还提出了相应的分解协调算法, 该算法不仅仅考虑单个状态的最优化问题, 而是将与各个状态相关的无功设备量作为耦合量从而能够综合考虑无功设备量对各个状态的影响, 以此分解协调求解各个状态, 以求使无功设备的总投资最小。

第6章研究小扰动下的负荷频率控制问题。该章基于Z变换的负荷频率前馈控制方法, 给出了在给定秒级时间间隔内控制发电机功角加速度以维持发电机频率的模型和算法。首先应用辨识方法建立电力系统负荷扰动模型, 其次按分层分解原则构造系统的各级状态估计器, 最后应用不变性原理导出负荷频率控制律。小规模算例表明, 该章所提出的负荷频率控制器能有效地控制电力系统中不同类型的小扰动, 比积分反馈控制器性能更佳, 该章还提出了一些有实际应用意义的数学模型转换方法, 如差分方程变换为微分方程, 以及微分传递函数的相互变换等。

第7章研究大扰动下电力系统的局部稳定控制问题。该章基于解耦控制方法, 给出了如何在大扰动下控制发电机功角摇摆不失步的措施, 通过构造新的解耦状态空间, 给出了仅通过局部实施的稳控措施, 可对全系统稳定分两个阶段进行控制的准则; 另外, 从数学理论上证明了新构造的状态空间是观测解耦的, 并与系统原状态空间是拓扑等效的。依据文中给出的第一阶段控制和第二阶段控制准则, 建立了分阶段控制的数学模型和综合计算过程。通过对一个小规模例题的仿真计算, 验证了所提出的数学理论和相关准则的正确性和有效性。

本书共有4个附录。附录A简要介绍一些建模所需的数学规划方法, 包括线性规划、整数规划、非线性规划、动态规划、随机规划等; 附录B介绍作者所提出的一个混合整数规划的近似算法(已在第1、3、5章得到应用); 附录C给出了本书提出的优化模型中的变压器T和并联电容器C的微分表达式的推导过程。配合第7章, 附录D给出了采用直流法潮流计算方法计算去耦基准 δ_{ei} 的推导过程。

本书阐述了一般教科书中未提及的, 但很有必要解释的电力系统优化建模和计算方法方面的知识, 希望能对提高电力工程技术人员和相关院校高年级本科生和研究生在电力系统优化建模研究方面的实际动手能力有所帮助。

抽水蓄能的日经济调度优化方法

1.1 引言

1.1.1 问题的描述

考虑抽水蓄能的日经济调度优化是某省级电网电力系统日常运行中一项十分复杂且综合性很强的任务,该问题可以简称为抽蓄日经济调度计划或抽蓄日经济调度优化。某省级电网的特点是:具有国内较大的抽水蓄能电站,其调节能力在日经济调度计划中起着相当重要的作用。在负荷峰谷差较大的情况下,抽水蓄能电站与其他电厂协调运行,进行移峰填谷,可减轻高峰负荷时火电机组的压力、充分发挥该省电网日经济调度计划的经济效益。该省的抽蓄日经济调度计划要求是,在满足安全要求的条件下,尽可能合理地利用该省特有的抽水蓄能电站调峰能力,以最低的燃料消耗,为用户进行可靠而满意的供电。

随着电网的不断扩大,该省省内各分区电网通过联络线联结在一起,出现了多区域的联合经济运行和经济调度问题,因此在安排抽蓄日经济调度计划时,还需要考虑各分区电厂的发电出力计划,避免出现区域联络线过载的现象。由于不同类型的电厂产权不同,且该省电网与天生桥电厂、广西购电、贵州购电、云南购电、中电购电五家电厂有购电协议,因此安排抽蓄日经济调度计划时,还要考虑原有的发电协议,以使这些不同类型的电厂完成给定的出力和电量计划。

该省电网本身分为东、西、南、北、中五个区,还有协议外购电区,定为购区。该省电网调度的电厂分为三类,分别为局属电厂、合资电厂、地方电厂。机组分为四类,分别为火电(包括核电)、水电、购电、抽水蓄能。发电厂共有 27 个(包括协议外购电的电厂 5 个),其中该省省内火电厂 14 个,水电厂 7 个,抽水蓄能电站 1 个。调度的装机容量超过 13 000MW,其中抽蓄机组的容量为 1200MW ($30\text{MW} \times 4$),发电机组 82 台[其中包括购电等效机组 5 台,省内火电机组 50 台(含核电)],水电机组 23 台,抽水蓄能机组 4 台。该省电网机组的基本构成如表 1-1 所示,该省电网基本互联关系如图 1-1 所示。概括而言,在一个省电力系统中,有 N 个区域和 M 条联络线,其中包括 M_1 个水电厂(每个电厂有 N_{1i} 台机组), M_2 个火电厂(每个电厂有 N_{2j} 台机组), M_3 个抽水蓄能电站(每个电厂有 N_{3k} 台机组)。

抽蓄日经济调度计划中要考虑水、火电厂的发电特性(在 24h 内,水电厂随时可以启停,径流电厂只有在给定时段内发电,火电厂则有启停时间间隔的限制),还需考虑抽水蓄能电站特性(在 24h 内,高峰时发电,低谷时抽水)。该省的日负荷峰谷差较大,约

4000MW，如图 1-2 所示。若能充分发挥抽水蓄能电站（总装机为 1200MW），在移峰填谷中的作用，则可提高整个电网的供电可靠性，充分发挥电网日调度计划的经济效益。

表 1-1 某省电网机组基本构成

区域	火电厂 数量 (个)	水电厂 数量 (个)	抽水蓄 能电站数 量 (个)	总电 厂数 (个)	火电 机组 (台)	水电 机组 (台)	抽水蓄 能机组 (台)	机组 总数 (台)	火电 装机 (MW)	水电 装机 (MW)	抽水蓄 能装机 (MW)	总装机 容量 (MW)
购区	不区分水火电			5	每厂等效 1 台机			5	外购最大电力			740
东区	2	4		6	5	14		19	825	669		1494
南区	1			1	4			4	1200			1200
西区	2			2	6			6	800	60		860
北区	2	3		5	12	9		21	800	195		995
中区	7		1	8	23		4	27	6690		1200	7890
总数	14	7	1	27	50	23	4	82	10 315	924	1200	13 179

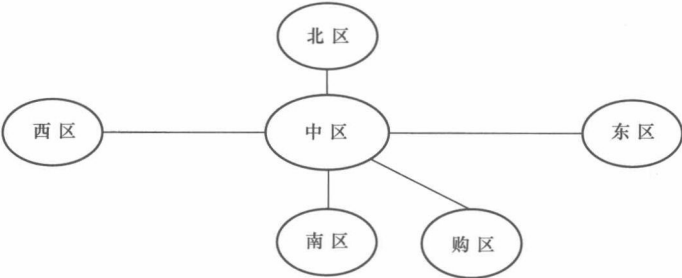


图 1-1 某省电网基本互联关系图

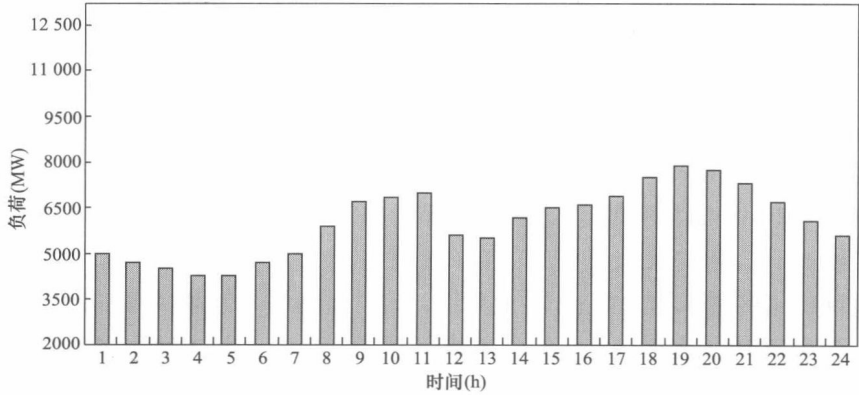


图 1-2 该省电网某天的日负荷曲线

1.1.2 抽水蓄能电站的基本运行要求

该省电网负荷一昼夜内高峰和低谷相差很大。如某天的实际负荷曲线，其中最大负荷

为 7000MW，最小负荷为 4350MW，峰谷差为 2650MW，平均负荷为 5244MW。为满足电力系统运行的安全性和周期内的整体经济性，不得不进行一定机组的开停，但即使是 20MW 的常规燃煤火电机组，从停止到带满负荷，也需要 10h 左右的时间。因此，若利用火电机组进行调峰，则该电力系统跟踪负荷变化的能力较差。

由于机组的正常运行受到其出力上下限的限制，为满足 2000 ~ 4000MW 这样大的负荷变化，在高峰负荷时段就需要多开一些机组，低谷时段又不得不停一些机组，而机组在启动和关机阶段的经济性一般均较差，且每个时段机组的开停组合又可以有很多方式，使得机组运行的整体经济性很难保证。因此，必须充分利用抽水蓄能电站的调峰能力来移峰填谷，减少火电机组的启停次数，以此提高电力系统的整体经济效益和系统运行的整体安全合理性。

电力系统的负荷波动情况可用最小负荷率 $P_{\min}/P_{\max}$ ($P_{\min}$ 为最小负荷、 $P_{\max}$ 为最大负荷) 和平均负荷率 $P_{\text{ave}}/P_{\max}$ (P_{ave} 为平均负荷) 表示，一般希望最小负荷率大于 0.7 ~ 0.75，平均负荷率大于 0.85 ~ 0.9。如果系统中调峰任务只由调峰热力机组等承担，则其装机容量为 $P_{\max} \sim P_{\min}$ ，如果调峰任务由抽水蓄能电站承担，则其装机容量只需 $P_{\max} \sim P_{\text{avep}}$ (P_{avep} 为考虑抽水蓄能电站投运后的平均负荷)， P_{avep} 可略大于 P_{ave} 。一般要求抽水蓄能电站的装机容量为总装机容量的 3% ~ 6% 或峰谷差的 1/3 左右，则调节后的负荷波动就容易由调峰热力机组来调整。

所以在分析抽水蓄能电站的经济性时，应该考虑所调节的基荷火电厂的组合，而不应该用同样调峰容量来比较抽水蓄能电站和火电厂的经济性。一般可用同等调峰容量来比较，考虑以下两种方法。

(1) 调峰等效的发电成本比较。根据国内同样每年调峰 1500h 的抽水蓄能机组和火电调峰机组的单位发电成本计算，抽水蓄能成本为火电的 63%，广东的数据为 70%。

(2) 抽水蓄能电站与火电调峰机组的比较。抽水蓄能电站的经济性在于，比所代替的调峰热力机组有更高的效益。在进行抽水蓄能电站的经济性比较时，还需考虑能够与多大的基荷容量配合。

以该省的日常负荷峰谷差为 4000MW 为例，若调峰任务由抽水蓄能电站承担，其总装机为 1200MW，约为峰谷差的 1/3，因此基本可以满足移峰填谷的需求，充分发挥电网日调度计划的经济效益。对于分布式发电系统中的蓄能装置容量的配置，也应该充分考虑日常负荷峰谷差与发电出力波动的问题。

抽水蓄能机组一般只需 100 ~ 200s 的时间就可以从静止停机状态到满负荷发电，具有机组启动速度快、发电量增长快的特点。一般而言，高峰电价比低谷电价高若干倍，而抽水蓄能电站蓄能时的抽水用电为低谷电价，抽水蓄能电站发电时的电价为高峰电价，因此除技术因素外，电网中用抽水蓄能机组进行调峰的经济效益会更加明显。

虽然抽水蓄能机组具有调峰能力，但抽水蓄能电站在运行时还必须满足水库的初始蓄水量、末端蓄水量、每个小时的运行最大蓄水量和运行最小蓄水量等约束条件，其中抽水蓄能电站的抽水状态的变量必须是整数，这与蓄电池的充放电时段约束也是类似的。因此，考虑该省省电网区域运行的特点，再加上各种运行约束的限制，经过对具体问题的数

学抽象, 所得出的数学模型是一个大型混合整数规划模型, 需要在算法理论上选择合理且可行的计算方法, 才能解决这样大型的抽水蓄能日经济调度优化问题。

1.1.3 主要研究内容

为了解决某省的实际日经济调度中优化利用抽水蓄能电站调峰能力的问题, 本章研究基于混合整数规划的抽水蓄能日经济调度优化模型和算法, 以便提高在日经济调度中的优化理论知识和计算机技术应用水平及利用运行人员长期积累起来的丰富实际运行经验, 使抽水蓄能日经济调度优化计算结果既能提高日调度计划系统的科学性, 又能提高整个电网的经济效益。

本章不仅介绍所提出数学模型和计算方法, 而且给出建模的基本思路, 即将复杂的多水、火电厂和多个区域运行的实际问题处理为标准的混合整数规划数学模型。在模型中, 目标函数与约束函数均为线性函数, 变量有连续变量(水火发电机机组出力)与整数变量(抽蓄机组出力)两种, 计算规模较大。本章的模型能够有效地优化抽蓄机组的运行, 达到对负荷进行移峰填谷的目的, 对当前考虑蓄能装置的电网智能化运行有极大的借鉴作用。

本章 1.2 节特地给出优化建模的基本思路, 以供参考; 1.3 节给出抽水蓄能日经济调度的优化数学模型; 1.4 节介绍优化计算前所需的预处理工作; 1.5 节介绍优化计算算法及过程; 1.6 节首先采用小规模算例验证所提出的优化模型和计算方法, 然后给出实际算例的详细结果并进行分析。

1.2 建模的基本思路

为了使系统不同电厂各小时的发电出力总和满足系统总的日负荷需求(各小时), 并尽量利用好抽水蓄能电站的能力, 基于抽水蓄能电站能力的日经济调度计划应当满足有关的约束条件。将实际问题转化成为数学问题之前, 首先要用熟悉的数学语言表达实际问题。用数学语言所表达的抽水蓄能日经济调度计划是: 为了满足系统总的日负荷需求(24h), 系统内各区的各发电机组的日调度计划(24h)的目标是各机组的发电费用和最小, 同时要满足各种约束条件, 如负荷平衡约束、各区域的每小时出力计划、电厂的每小时出力和日电量计划、各机组的每小时出力限值、抽水蓄能电站的每小时出力限值和每小时水量限值, 以及抽水蓄能电站的初始水量和终了水量限值。

以下分别给出建立数学模型的数学表达式(目标函数和约束条件)的具体思路和处理方法, 以及将抽水蓄能电站抽水变量处理为整数变量的方法。

1.2.1 目标函数的考虑

如前所述, 考虑抽水蓄能电站的日经济调度计划, 就是要在满足安全要求的条件下, 尽可能合理地利用该省特有的抽水蓄能电站的调峰能力, 以最低的燃料消耗, 为用户进行可靠而满意的供电。最低的燃料消耗意味着在满足各种机组出力安全要求的条件下, 火电厂的机组要尽可能地少发, 而水电厂、抽水蓄能电站的机组要尽可能地多发。按照最低的

燃料消耗的目的, 费用系数的基本设计思路为:

(1) 火电厂机组的费用系数。按不同时段给出实际的启停费用, 因为优化调度的目标函数是发电费用最小化, 若设火电厂机组的费用为正, 则火电厂机组的出力一定会在满足约束的条件下尽可能地小。

(2) 水电厂机组的费用系数。均按 0 给出不同时段的启停费用, 因为水电的发电费用基本可以忽略不计, 若设水电厂机组的费用为 0, 则水电厂机组的出力一定会在满足约束的条件下尽可能地大。

(3) 抽水蓄能电站机组的费用系数。为了充分发挥抽水蓄能电站的调峰能力, 一般可假定抽水蓄能电站的费用系数在优化计算过程中为 0, 在满足蓄水量约束的同时, 为了更好地发挥抽水蓄能电站的移峰填谷能力, 减小峰谷差, 在形成的数学模型中又进一步引进了虚拟抽水蓄能费用系数的概念, 其目的就是能使抽水蓄能电站在负荷曲线的谷底多抽水, 在负荷曲线的峰顶多发电, 以使优化计算后的等效负荷曲线更平滑。为了与水电机组区分, 更充分地利用抽水蓄能电站的能力, 采用以下计算过程给出虚拟抽水蓄能费用系数。虚拟抽水蓄能费用系数的计算步骤为:

- 1) 计算给定负荷曲线的平均负荷;
- 2) 计算给定负荷曲线与平均负荷的差值序列;
- 3) 将差值序列的负值作为抽水蓄能电站抽水工况的费用系数;
- 4) 将差值序列的正值取负后作为抽水蓄能电站发电工况的费用系数。

由于虚拟抽水蓄能费用系数是小于等于零的负数, 求解线性规划问题时, 这样的抽水蓄能费用系数可以自动减少目标函数值, 而且负荷的峰谷差越大, 目标函数值减少得就越多, 这就使得抽水蓄能电站在满足给定约束的条件下, 尽可能地运行在峰谷时段, 以便更好地执行移峰填谷的任务, 从而提高了电力系统整体运行的经济性和安全稳定性。

1.2.2 变量设置及各种约束条件的考虑

数学模型的基本设计思路为, 尽可能地避免引入过多的变量, 而应采用基本变量来表示派生变量, 以减少算法的复杂程度。然而, 需要对变量个数与约束条件个数进行平衡, 因为优化计算基本要求变量个数大于约束条件个数。

经过对抽水蓄能日经济调度计划进行分析, 确定数学模型的最核心变量为各机组的发电出力, 因为各时段各机组的发电出力都需满足其上下限值, 而其他电厂出力、区域出力以及电厂发电量虽然都需满足其上下限值, 但是通过对各时段各机组的发电出力求和, 就可以间接得出电厂出力、区域出力以及电厂发电量。

经过对抽水蓄能日经济调度计划进行分析, 确定所需满足各种实际运行的约束条件为: 日负荷每小时的平衡约束、各区域每小时的出力约束、各电厂每小时的出力约束、各电厂在一天内的总电量约束、抽水蓄能电站的每小时库容约束、库容的水量平衡约束、各机组得出力约束、抽水蓄能电站的发电出力和抽水出力约束。如前所述, 最核心的变量是各机组的发电出力, 只要设计各机组涉及其所属区域和所属电厂的标识, 就可分别对各时段下不同区域或不同区域的发电机组出力求和, 在设定各机组的发电出力为核心变量的基

基础上,各种约束条件的具体处理方法如下:

(1) 日负荷每小时的平衡约束。将各时段内所有机组发电出力求出总和,再使该总和等于每小时的日负荷预测值。

(2) 各电厂每小时的出力约束。将各时段内各电厂各机组的发电出力求出总和,再使该总和满足该电厂出力的上下限。

(3) 各电厂在一天内的总电量约束。将总时段内(一天内)各电厂各机组发电出力求出总和,再使该总和满足电厂发电量的上下限。

(4) 各区域每小时的出力约束。将各时段内各区域内各电厂的各机组发电出力求出总和,再使该总和满足该区域的出力上下限。

(5) 抽水蓄能电站的每小时库容约束。抽水蓄能电站运行时为了满足每天给定的起始库容和终了库容,就必须满足每小时的库容约束。在将抽蓄的水量平衡转换为电量平衡的基础上,首先求出各时段内抽水蓄能电站各机组发电出力的总和,然后求出各时段内抽水蓄能电站各机组抽水出力的总和,最后求出发电出力总和与抽水出力总和的差值,使该差值满足该时段抽水蓄能电站的库容上下限,根据实际运行要求,抽水蓄能电站每小时的出力必须在 0、165、330、495、660、825、990、1155、1320MW 中选一种解。

(6) 抽水蓄能电站的日水量平衡约束。参照库容约束的处理方法,首先求出总时段内(一天内)抽水蓄能电站各机组发电出力的总和,然后求出总时段内(一天内)抽水蓄能电站各机组抽水出力的总和,最后求出发电出力总和与抽水出力总和的差值,使该差值满足一天内总时段抽水蓄能电站的日水量差值。

总之,根据实际运行的需求,考虑将复杂的实际问题处理为标准的混合整数规划数学模型,在模型中目标函数与约束函数均为线性函数,其中目标函数为机组分段线性费用函数;变量有连续变量与整数变量两种,其中所有发电机组出力的变量处理为连续变量,抽水蓄能机组的抽水工况处理为整数变量。根据该省电网的实际情况,计算规模中所设定的区域数为 6,电厂数为 30,机组数为 100,时段数为 $24D$ ($D=1, 2, 3$, 即按 1h 1 个点、0.5h 1 个点或 20min 1 个点考虑,表示负荷),则相应的连续变量个数为 2400~7200;相应的离散变量个数应为 24~72;约束的个数小于 3000。由于计算规模较大且有离散变量,计算方法的选择有相当的难度,经过以下的特殊处理后,可使整数变量大为减少,从 24~72 个减少为 9~27 个,其具体处理方法详细介绍如下。

1.2.3 抽水蓄能电站整数变量的处理过程

(1) 将抽水工况所用电量 P_{pp} 设为整数离散变量,根据实际需求,必须在 0、165、330、495、660、825、990、1155、1320MW 中选一种解,如果将这 9 种状况均用 0-1 变量考虑,则需每个时段均需要 9 个 0-1 变量, $24D$ 个时段则需 $9 \times 24D$,即需用 216~648 个 0-1 变量表示 P_{pp} 的状态,与表示机组出力的几千个连续变量一道,使得日经济调度问题是个难以求解的大型混合整数规划问题,为此必须考虑其他的办法来处理整数离散变量。

(2) 设 Y_p 为整数变量,变化范围为 0~9,单位变化步长为 1。当 $Y_p=1$ 时, $P_{pp}=165$;当 $Y_p=2$ 时, $P_{pp}=330$ 。因此,可以用 165 作为变量 $Y_p(t)$ 的系数,用下式来计算