

SHUIDIANZHAN JINGJI
YUNXING LILUN
JI SUANFA SHIXIAN

水电站经济运行理论

及算法实现

徐晨光 刘晓黎 黄 强 赵麦换 编著



黄河水利出版社

水电站经济运行理论及算法实现

徐晨光 刘晓黎 黄 强 赵麦换 编著

黄河水利出版社

图书在版编目(CIP)数据

水电站经济运行理论及算法实现/徐晨光等编著.
郑州:黄河水利出版社,2006.1

ISBN 7-80734-041-X

I.水… II.徐… III.水力发电站-电力系统运行
IV.TV737

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 002346 号

策划组稿:王路平 电话:0371-66022212 E-mail:wlp@yrcp.com

出版社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940

传真:0371-66022620

E-mail:yrcp@public.zz.ha.cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:850 mm×1 168 mm 1/32

印张:5.125

字数:130 千字

印数:1—1 300

版次:2006 年 1 月第 1 版

印次:2006 年 1 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80734-041-X/TV·449

定价:10.00 元

前 言

作为水电站运行管理的重要组成部分,水电站厂内经济运行(Economical Operation of Hydropower Plant, EOHP)能够增加水电站的经济效益1%~3%,这部分效益增加对于我国这样的水电大国和能源供需矛盾日渐突出的形势是非常有意义的。同时,水电大发展的广阔前景使水电站厂内经济运行总量效益可观。

随着电力市场化进程的加快,以及“厂网分开,竞价上网”的电力市场运营机制的实施,发电企业成了竞争主体,水电站在参与市场竞争的过程中,必须根据自身与竞争各方的运行特性,扬长避短,提高自身的竞争能力,以适应电力市场改革。

水电大发展使水电站厂内经济运行总量效益可观,技术进步使水电站厂内经济运行技术可行,而电力市场改革要求水电站厂内经济运行从理论走向实用。因此,在科技和生产实际的双重促进下,水电站厂内经济运行的研究、开发和应用就具有显著的实用价值。本书针对如何提高厂内经济运行的实用性进行了有益的探索。

本书通过研究水电站厂内经济运行的关键技术问题,运用新方法和新技术建立水电站厂内经济运行系统理论体系与模型体系,探讨了水电站厂内经济运行准实时系统的设计与开发技术,为其商业化奠定基础。

本书旨在从生产实际出发,开阔研究思路。考虑到水电站厂内经济运行问题的复杂性以及实时性强的特点,把系统工程和软件工程的技术引入,针对原有运行方式的弊端,进行模型设计与开发。通过软件工程、神经网络、进化算法等理论的交叉引用,使整个水电站厂内经济运行系统更加快速有效。

本书第1章到第3章探讨水电站厂内经济运行的基本理论;第4章到第7章探讨水电站厂内经济运行相关模型及其求解方法;第8章采用统一建模语言进行水电站厂内经济运行系统的设计与开发。为利于大家研究讨论,附上系统开发的核心计算机程序。

本书由徐晨光和赵麦换执笔,由刘晓黎和黄强审定并统稿。全书共12万字,徐晨光完成7万字,赵麦换完成5万字。

本书由以下项目资助:①中国电力教育基金项目——水电站厂内经济运行软件开发;②甘肃省河西水电开发有限责任公司项目——黑河梯级水电站优化调度研究;③华北水利水电学院高层次人才科研启动项目。

在本书的编写过程中,得到了西安理工大学多位老师和同学的帮助,他们无私而又真诚的帮助是本书出版的源动力,这里要感谢沈冰教授、田峰巍教授、解建仓教授、畅建霞博士、王义民博士、薛小杰博士,同时要感谢华北水利水电学院的徐建新教授、陈南祥教授和黄河勘测规划设计有限公司的王煜博士,最后要特别感谢黄河水利出版社的王路平编辑对本书编、审所做的辛勤工作。

由于作者水平有限,书中不妥之处难免,恳请读者批评指正。

作 者

2005年10月



徐晨光, 女, 汉族, 1975年生, 籍贯内蒙古。2004年7月毕业于西安理工大学, 获得水文学及水资源专业工学博士学位, 主要研究方向为水资源系统工程和地理信息系统应用与开发。

在攻读博士期间参与多项水资源研究课题, 作为主要完成人完成的项目有中华电力基金项目“水电站厂内经济运行研究”、“龙羊峡水电站节水增发考核研究”、“黑河梯级水电站短期优化调度研究”等。作为主要成员参与的项目有973项目“黄河流域水资源演化规律与可再生性维持机理”子题“黄河流域水资源演变的多维临界调控模式”、“黄河干流水电站补偿效益分配方案与实施对策研究”等。2004年7月到华北水利水电学院任教, 作为主要完成人完成项目“河北省水资源合理配置研究”。至今, 已发表论文20篇, 其中4篇被EI检索。



刘晓黎, 男, 汉族, 1958年生, 籍贯甘肃, 中共党员, 毕业于西安理工大学水电建筑专业, 获学士学位。专业职称: 教授级高级工程师、注册总监理工程师。现任甘肃省电力投资集团公司副总经理, 为西

安理工大学在职博士研究生。已主持规划建设了黄河大峡水电站, 黑河龙首、西流水电站; 主持的在建项目有黄河柴家峡、寺沟峡水电站; 主持完成了“甘肃黑河梯级水电滚动决策方案研究”等10项课题。发表论文20余篇。



黄强,男,汉族,1958年生,籍贯四川。现任西安理工大学教授、博导、水利水电学院党委书记,任陕西省水力发电工程学会副理事长。主持完成了国家重大基础研究计划 973 项目专题,国家自然科学基金项目,国

家“八五”、“九五”重点攻关等纵横向科研项目 60 多项,获省部级科技进步奖 6 项。2005 年获国家教学成果二等奖。在国内外学术刊物发表论文 204 篇,其中 SCI、EI、ISTP 收录 50 篇。出版《黄河干流水库联合调度及智能决策支持系统》等专著 3 部,主编全国高校教材《水能利用》,参编全国高校教材《水电系统规划管理、决策方法论》。现已培养研究生共 87 人,其中博士生 36 人,已毕业博士 12 人。



赵麦换,男,汉族,1976 年生,籍贯陕西。2004 年 7 月毕业于西安理工大学,获得水文学及水资源专业工学博士学位,主要研究方向为水资源系统工程和生态环境规划。攻读博士期间参与多项研究,主要完成

的项目有“黄河干流水电站补偿效益分配方案与实施对策初步研究”、“黄河干流水电站补偿效益分配方案与实施对策研究”、“江河水资源统一调度应用基础研究”等,参与 973 项目子题“黄河流域水资源演变的多维临界调控模式”。现于黄河勘测规划设计有限公司工作,参与多项生产科研项目,参加“黄河流域(片)水资源综合规划”。发表论文 20 篇,其中 5 篇被 EI 检索。

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 研究的背景及意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(5)
1.3 存在的问题	(11)
1.4 研究方向	(12)
1.5 本书主要研究内容	(13)
1.6 研究的技术路线	(14)
第 2 章 新形势下水电站厂内经济运行的机遇与挑战	(17)
2.1 电力体制改革与水电站厂内经济运行的机遇与挑战	(17)
2.2 竞价上网	(19)
2.3 厂网分开与空耗水量计算	(22)
2.4 梯级水电站面临的新问题	(32)
2.5 小结	(33)
第 3 章 水电站厂内经济运行理论	(35)
3.1 厂内经济运行在水电站优化调度中的地位	(36)
3.2 厂内经济运行的研究内容	(37)
3.3 厂内经济运行模型	(40)
3.4 水电站厂内经济运行准实时系统	(44)
3.5 小结	(48)
第 4 章 基于 RBF 神经网络的水轮机组效率曲线计算	(50)
4.1 效率曲线的影响因素	(50)
4.2 传统的效率曲线计算方法	(51)

4.3	基于径向基神经网络的水轮机组效率曲线计算	(52)
4.4	小结	(62)
第5章	水轮机组耗流量的在线计算	(63)
5.1	RBF神经网络的在线训练算法	(64)
5.2	水轮机组耗流量计算在线训练过程	(65)
5.3	基于RBF神经网络在线训练的水轮机组耗流量计算	(69)
5.4	小结	(71)
第6章	基于进化算法的水电站负荷分配理论	(73)
6.1	水电站厂内经济运行负荷分配数学模型	(74)
6.2	负荷分配问题的求解方法	(75)
6.3	遗传算法求解负荷分配问题	(78)
6.4	自组织进化规划求解负荷分配问题	(80)
6.5	免疫算法求解负荷分配问题	(83)
6.6	进化算法求解特点比较	(86)
6.7	小结	(87)
第7章	水电站负荷分配的进化算法实例研究	(88)
7.1	径流式水电站厂内经济运行负荷分配实例	(88)
7.2	大型水电站厂内经济运行负荷分配实例	(98)
7.3	小结	(103)
第8章	基于UML技术的嵌入式水电站厂内经济运行 系统设计与开发	(104)
8.1	统一建模方法	(106)
8.2	基于UML技术的厂内经济运行准实时系统设计	(107)
8.3	嵌入式应用软件的开发工具	(114)
8.4	嵌入式厂内经济运行准实时系统的开发过程	(115)

8.5 小结	(117)
第 9 章 模型算法实现	(119)
9.1 基于 RBF 神经网络的水轮机组耗流量计算 算法	(119)
9.2 动态规划法求解负荷分配问题	(121)
9.3 遗传算法求解负荷分配问题	(124)
9.4 进化规划法求解负荷分配问题	(133)
第 10 章 总结及展望	(142)
10.1 研究成果	(142)
10.2 展望	(144)
参考文献	(145)

第1章 绪 论

1.1 研究的背景及意义

水能资源是可再生的、洁净的能源,水能资源比较丰富的国家都非常重视水电开发,发达国家的水能资源开发程度非常高^[1]。世界各国在能源资源利用上,一般都优先考虑开发本国的水能资源,水能资源较多的国家,其水电占本国电力的比重也比较高。例如,挪威的水电比重达 98.9%,是世界上水电比重最高的国家,日本、瑞典、瑞士、法国、意大利、加拿大、西班牙等 9 国的水电比重(包括抽水蓄能)在 50% 以上,见表 1-1。在水电比重较高的国家,电网能够安全经济运行,水电的效益都得到充分的发挥。

据 2005 年 11 月发布的全国水力资源复查成果,我国水能资源理论蕴藏量为 6.94 亿 kW,年发电量 6.08 万亿 kWh;技术可开发装机容量 5.42 亿 kW,年发电量 2.47 万亿 kWh,居世界首位。但我国的水能开发程度较低,截至 2004 年底,水电装机容量达到 1.05 亿 kW,占全国总电力装机容量的 22%,水电开发率仅为 19.4%,低于世界平均水平(22%),远低于工业发达国家的开发水平(50%~100%)^[2],所以水电开发潜力巨大,前景广阔。虽然水电的建设成本高于火电,但随着国家对环保控制要求的提高,若考虑到火电厂脱硫、脱硝、除尘等环保要求所需的资金(约占总投资的 1/3),水电的建设成本与火电差距大幅缩小^[3]。同时,水电站的长运营期和低运行成本是火电厂远远不及的。目前,国内水电厂运行成本一般是 0.04~0.09 元/kWh,而火电厂由于购买和运输大量燃料,其运行成本高达 0.19 元/kWh 左右,随着煤炭价格

的上涨,火电厂的发电成本还将上升。

表 1-1 世界各主要国家水能资源及开发程度

序号	国家名称	理论蕴藏量 (亿 kW)	技术可开	经济可开	1995 年 已建水电 装机/年发电量 (万 kW/亿 kWh)	1995 年 开发程 度 (%)
			发资源 装机/年发电量 (万 kW/亿 kWh)	发资源 装机/年发电量 (万 kW/亿 kWh)		
1	中国	59 222	37 853/19 233	29 000/12 515	5 200/1 906	13.7
2	巴西	30 204	25 849/11 949	15 839/10 917	5 131/2 539	21.2
3	俄罗斯	28 960	/16 700	/8 520	4 376/1 773	10.6
4	加拿大	12 238	16 280/6 317	/5 813	6 360/3 308	52.3
5	印度	26 378	8 590/6 000	/6 000	2 130/717	12
6	美国	5 285	14 725/5 294	/3 760	10 006/3 082	58.2
7	土耳其	4 330	/2 150	3 475/1 224	986/355	16.5
8	哥伦比亚	10 000	/2 000	9 300/1 400	798/343	17.2
9	阿根廷	5 350	/1 720	4 450/1 300	801/281	16.3
10	挪威	5 550	/1 623	/1 623	2 739/1 263	73.4
11	墨西哥	5 000	/1 600	5 353/800	1 001/292	18.3
12	塔吉克斯坦	2 996	/1 436	/850	405/142	9.9
13	瑞典	2 000	/1 350	/950	1 615/670	49.6
14	委内瑞拉	2 873	/2 772	7 000/1 035	1 068/556	20.1
15	吉尔吉斯斯坦	1 425	/729	/480		
16	法国	2 660	/720	/700	2 499/759	100
17	西班牙	1 380	1 000/700	430/410	1 678/246	35.1
18	格鲁吉亚	1 594	/679	/270	273/47	6.9
19	意大利	3 400	/765	/650	1 984/419	54.8
20	日本	5 961	3 283/1 347	2 515/649	4 346/913	67.8
21	哈萨克斯坦	1 986	/619	/270	214/83	13.4
22	奥地利	1 500	/750	/537	1 131/385	51.3
23	南斯拉夫	842	/501		381/562	100
24	瑞士	1 440	/410	/326	1257/360	87.8

注:资料来源于英国《国际水力发电和坝工建设》1997 年刊(International Water Power & Dam Construction Yearbook 1997)和联合国 1995 年《能源统计年鉴》(Energy Statistics Yearbook 1995)。

21 世纪是中国水电大发展的世纪,西部大开发和“西电东送”

战略任务将支撑着我国水电事业的腾飞,中国水电技术也将因此走在世界前列。到 2010 年,也就是中国开始水电建设 100 年时,水电装机容量应力争达到 1.55 亿 kW 以上,水电装机容量将超过美国而居世界第一,完成从资源第一大国到生产第一大国的转变。2011~2049 年,我国达到或超过中等发达国家的水平,按人均装机 1 kW 计,全国总装机约 15 亿 kW。基本完成常规水电的开发,开发率达到 85%~90%,装机约 4.3 亿 kW。西电东送的规模超过 1.9 亿 kW,东中部受电区和风电发展比较集中的地区,抽水蓄能电站也将相应得到发展,装机规模将达到 0.7 亿 kW。水电装机总量达到 5 亿 kW,占总装机的比例约为 33%。中国的水电技术将达到世界领先水平,进一步由生产数量上的水电第一大国成为水电数量、质量、科技、管理、效益等方面全面领先、真正意义上的水电第一大国。

作为水电站运行管理的重要组成部分——水电站厂内经济运行(Economical Operation of Hydropower Plant, EOHP)能够增加水电站的经济效益 1%~3%^[4,5],这部分效益增加对于我国这样的水电大国和能源供需矛盾日渐突出的形势都是非常有意义的。另据笔者计算^[6,7],我国黄河龙头大库龙羊峡水库在 2001 年,仅由于不合理调度造成的空耗水量为 3.01 亿 m³,折算电量为 7 462 万 kWh,空耗水量占到该年出库水量 162.96 亿 m³ 的 1.84%,折算电量占到当年实际发电量(40.122 6 亿 kWh)的 1.86%,按国家 1990 年颁布的西北电网平均影子电价 0.194 元/kWh 计算,经济损失达 1 448 万元,相当可观。

水电站厂内经济运行主要依赖其实时性^[8](Georgakakos et al, 1997),但水库实时调度虽然研究了近半个世纪,却进展甚微^[9](Klimes, 1979)。我国在 20 世纪 60 年代开始研究离线潮流和厂内经济运行调度^[10],70 年代末开始在线应用软件的研制,但总体无法投入实际应用^[11]。造成厂内经济运行无法投入实用主

要是技术手段方面的问题:一方面没有实时测量机组流量的仪器,而制造厂家从模型特性曲线换算出来的机组运行特性曲线与实际情况有较大出入^[12];另一方面是负荷分配的优化算法会出现“维数灾”,难以达到实时性要求^[13],严重制约了水电站“无人值守”的实现和节水增发获取更多的发电效益。随着计算机技术、通信技术与测量采集技术的发展,水电站的各种工作状态已能够准确而迅速地得到收集,与此同时,系统工程领域的先进优化方法也被引入求解水电站的负荷分配,加速了水电站厂内经济运行的发展,使其投入实际应用成为可能。

在水电大发展对厂内经济运行提供广阔舞台、技术进步使厂内经济运行更具实用性的同时,我国汹涌的电力市场改革大潮使厂内经济运行再一次焕发了勃勃生机。

20世纪90年代以来,英国、美国、阿根廷、澳大利亚以及北欧一些国家相继打破了传统的电力工业管理体制,引入竞争机制,向着构建电力市场的方向快速发展,并取得了相当大的成功^[14]。我国自2000年1月1日起,在山东、上海、浙江、辽宁、吉林、黑龙江等省市进行了以“厂网分开,竞价上网”为开端的电力市场改革,一批试点单位相继开始试运营。

随着电力市场化进程的加快,“厂网分开,竞价上网”的电力市场运营机制的实施,使发电企业成为了竞争主体。因此,发电企业只有挖掘一切可以挖掘的潜力,降低运行成本,才能在竞争中处于有利地位。水电厂在参与市场竞争的过程中,必须根据自身与竞争各方的运行特性,扬长避短,提高自身的竞争能力,才能适应电力市场改革。可以预见,在市场运行机制下,有关水电站厂内经济运行、水电站优化调度等不增加硬件投资就能产生效益的管理技术,将有可能获得真正广泛的应用。

综上所述,水电大发展使水电站厂内经济运行总量效益可观,技术进步使水电站厂内经济运行技术可行,而电力市场改革要求

水电站厂内经济运行从理论走向实用。因此,在科技和生产实际的双重促进下,水电站厂内经济运行的研究、开发和应用就具有显著的实用价值。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 水电站厂内经济运行的应用进展

20 世纪 60 年代初,美国的一些电力公司利用数字计算机实现电力系统经济调度,开始了计算机在调度中的应用。在 1965 年美国东北部大停电后,多数电力公司意识到依靠远动装置在模拟盘上显示信息的方式已远不能满足复杂电网安全运行的要求,将计算机应用于电力系统的调度中,不仅考虑到负荷分配的经济性,也考虑到整个电力系统的安全性。

加拿大自 20 世纪 90 年代^[15~17]开始将经济运行功能引入发电管理子系统(Generation Management Subsystem, GMS)中,使 AGC(自动发电控制)成为水电站实时管理系统的一个重要组成部分^[18,19]。

由研究监控技术发展起来的瑞士 MC - monitoring SA 公司^[20]于 20 世纪 90 年代开始开发水电站的模拟、分析与优化系统,其开发的 RunAid 4.0 系统可以为多台水轮机组分配负荷、制定工作计划并实现实时操作。

雅典的水电系统^[21]于 20 世纪末期实现了水电站参数的在线监控,根据水文资料、原始数据以及实际的参数情况,采用线性优化和非线性优化的方法实现水电系统的整体优化。

新西兰 Z&M numerics 公司^[22]开发的软件 Allocate 可以根据负荷和机组情况进行优化计算,使得水电站在同样的出库条件下发电量最大。该软件采用动态规划(DP)方法实现。该公司的另一软件 MaxHydro 可以实现最多 3 个水电站的联合优化调度。

在国内,20 世纪 80 年代末^[23]葛洲坝电厂计算机监控系统的研制成功成为电厂计算机监控技术从无到有发展的一个重要里程碑,使我国一举成为具有百万千瓦容量级水电厂计算机监控研制力量的国家。

长江支流上的丹江口水电厂计算机监控系统是继葛洲坝电厂之后攀上另一高峰的工程。在国内首次成功应用了分层分布式计算机监控系统及其他许多新技术,系统具有自动发电控制和自动电压控制的功能,自动发电控制中包括了厂内经济运行的负荷分配的功能。

南瑞自控公司^[24]采用开放系统的研究始于 1990 年,居全国领先。葛洲坝二江电厂的新计算机监控系统即为其首批开放系统之一,其 AGC 中包括经济运行功能。

1.2.2 厂内经济运行优化方法研究进展

1.2.2.1 负荷分配优化方法

20 世纪 60 年代,电力工作者认识到静态优化调度方法不能考虑系统的动态约束,难以计及负荷的未来变化,1971 年 Stadlin 等^[25]在研究负荷分配方法时,注意到当前的优化调度要顾及未来的负荷变化,在建立的负荷分配模型中考虑发电机组的上下限约束,并给出了一个调整裕度的限制要求。

国内外学者曾采用动态规划、方向搜索、等微增率、线性和非线性规划等方法求解水电站厂内经济运行问题^[26]。

线性规划法因能较容易地处理梯级间的水力联系等优点而在水、火电力系统的短期优化调度中得到广泛应用。但在具体应用中必须对具有非线性特征的目标函数和约束条件做相应的线性化处理才能求解,这就不可避免地降低了计算结果的精度。对水电厂的耗量特性、水位与库容关系及流量与下游水位特性常采用分段线性逼近来线性化,而对目标函数可采用分段线性逼近或取泰勒展开式的线性项来近似线性化处理^[27]。Ziad 等^[28]针对加拿大

B.C. 水电公司建立了电力市场环境中的短期发电计划线性优化模型,并以含有 20 个水电厂的水电系统 96h 的发电计划问题为例,采用专门的商业优化软件对此含有 30 000 个变量和 35 000 个约束的大型线性规划模型进行求解。田峰巍等^[29]采用非线性规划研究了厂内经济运行的负荷分配问题。

拉格朗日松弛法作为分支定界法的一种,对机组组合问题的应用研究始于 20 世纪 70 年代,80 年代逐渐推广,90 年代成为主流,取得了成功的应用^[30],其基本思想是把全系统的约束,如机组约束、备用容量约束等,以目标函数惩罚项的形式进行松弛。约束条件松弛后的对偶问题可分解为单机组的子问题。拉格朗日松弛法能避免当决策变量很多时造成的“维数灾”问题,可以得到较好的次优解。

目前采用的机组最优经济运行的实用算法主要有优先次序法与动态规划法两种。优先次序法是按机组的单位耗量性进行排队,单位耗量小(大)的机组排在前(后)面,先(后)启动。该算法一般不考虑机组的启停耗量,计算工作量小但不能保证获得最优解^[31]。动态规划法用于机组的最优组合可以考虑机组的启停耗量,但是当机组数目多时,组合的状态数将很多,导致计算量太大而无法使用^[32]。

20 世纪 80 年代,动态规划法应用于研究水电系统的实时监控与优化调度问题(1988, Naccarino J 等)^[33],由动态规划发展起来的离散动态规划法、增量动态规划法、微分动态规划法等,有很好的适应性和求解能力^[34~36]。王定一等(1989)^[37]采用分阶段优化的动态规划法确定最佳运行机组数和组合,用等微增率法分配机组间负荷,在葛洲坝二江电厂取得了良好的效果。针对大型水电站的厂内经济运行,杨侃(1995)^[38]提出了多重动态规划模型,可以获得在水库入流和水头为定值时的大型水电站各台机组的最佳负荷分配方案。姚齐国等(1999)^[39]用动态规划法给出了水电