

实时发电调度及其 智能控制技术研发与应用

贵州电网有限责任公司 组编



贵州大学出版社
Guizhou University Press

实时发电调度及其 智能控制技术研发与应用

贵州电网有限责任公司 组编



贵州大学出版社
Guizhou University Press

图书在版编目 (C I P) 数据

实时发电调度及其智能控制技术研发与应用 / 贵州电网
有限责任公司组编. — 贵阳: 贵州大学出版社, 2014.11

(贵州电网有限责任公司科技创新系列丛书)

ISBN 978-7-81126-733-4

I. ①实… II. ①贵… III. ①发电调度—实时控制—智能控制—研究 IV. ①TM734

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 246232 号

实时发电调度及其智能控制技术 研发与应用

组 编: 贵州电网有限责任公司

责任编辑: 但明天

出版发行: 贵州大学出版社

印 刷: 贵阳快捷彩印有限公司

开 本: 720 毫米×1000 毫米 1/16

印 张: 9.25

字 数: 172 千字

版 次: 2014 年 12 月 第 1 版

印 次: 2014 年 12 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81126-733-4

定 价: 32.00 元

版权所有 违权必究

本书若出现印装质量问题, 请与本社联系调换

电话: 0851-5981027

编 委 会

主 编 刘明忠

副主编 孙 斌 王 宁

参 编	赵翔宇	朱刚毅	陈巨龙	黄文伟
	朱楞方	单 克	戴席伟	王向东
	廖胜利			

前 言

电力系统的迅猛发展对电网运行智能化水平要求日益提升，特别是在发电调度过程中，规避传统的人工经验模式，构建自动、智能、闭环的发电调度新模式，已成为当前电网运行的核心问题。纵观我国当前从日前到 AGC 整个发电调度业务流程，日前计划编制和 AGC（Automation Generation Control，自动发电控制）调整阶段，往往已具备自动化支持系统。实时计划调整则更多依赖于调度员的人工经验，毋庸置疑，是发电调度的最大短板。为此，贵州电网公司积极启动了实时发电调度及其智能控制技术的研究。经过一年多的努力，项目取得了突破性进展，在扩展短期负荷预测、机组角色优化、水火电协调优化等方面取得了一系列成果。三年的实践应用证明，实时发电调度及其智能控制技术，能够有效提升电网发电调度智能化水平，提高系统运行的安全性与节能性。

为促进实时发电调度及其智能控制技术成果的推广应用，本书主要基于贵州电网实时发电调度及其智能控制研发实践经验，对实时发电调度关键技术进行了系统的总结，实用性较强，是电力系统发电调度方面的专业参考书。

纵观当前实时发电调度技术，负荷预测和优化模型是两大研究重点，也是本书介绍的主要内容。负荷预测是实时发电调度的基础，本书介绍了在实时发电调度中广泛应用的扩展短期负荷预测技术，该技术由于对预测点之前电网实际负荷走势进行了分析，因此预测精度更高。在优化模型部分，结合贵州电网水火互济的电源特征，本书介绍了梯级水电协调与优化方法。

参加本书编写的人员主要为贵州电网公司电力调度控制中心一线的调度人员。本书由刘明忠主编，孙斌、王宁副主编，赵翔宇、朱刚毅、陈巨龙、黄文伟、朱楞方、单克、戴席伟、王向东、廖胜利等参加了编写，赵翔宇对全书进行了校阅。

贵州电网公司电力调度控制中心和科技部等部门对本书的编写给予了大量支持，清华大学、大连理工大学、清大高科系统控制有限公司等单位也给予了帮助，特别是清华大学吴文传副教授在本书写作过程中给予了大量指导，在此一并表示衷心感谢。

电网实时发电调度技术在我国还处于研究应用开始阶段，还有很多问题需要解决完善，书中涉及的一些技术方法研究还需要不断深入，加之作者水平有限，虽然多次校验，疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论.....	1
第 2 章 技术框架与系统架构.....	13
2.1 概述.....	13
2.2 多级协调的一体化发电调度框架.....	13
2.2.1 “日前+实时+AGC”三级协调的发电调度模式.....	13
2.2.2 实时调度与日前计划的协调关系.....	16
2.2.3 实时调度与 AGC 控制的协调关系.....	17
2.3 三维分解协调的实时发电调度模型.....	18
2.3.1 三维分解协调的实时发电调度模型.....	18
2.3.2 有功调度时间维的分解与协调.....	20
2.3.3 有功调度空间维分解与协调.....	24
2.3.4 有功调度目标维分解与协调.....	25
2.3.5 实时发电调度关键技术及其衔接.....	26
2.3.6 时间、事件双触发机制.....	28
2.4 系统架构.....	29
2.4.1 网络架构.....	29
2.4.2 数据流转.....	29
2.4.3 接口功能实现.....	31
2.5 本章小结.....	33
第 3 章 扩展短期负荷预测技术.....	35
3.1 概述.....	35
3.2 负荷数据预处理.....	37
3.3 负荷分解.....	40

3.3.1	日负荷曲线变化特征	41
3.3.2	分解原理	42
3.3.3	滤波原理	43
3.4	预测模型及算法	48
3.4.1	线性外推法	48
3.4.2	基于负荷分解的算法	49
3.4.3	日周期负荷多点外推法	51
3.4.4	神经网络法	54
3.4.5	综合法	56
3.5	实际应用分析	58
3.5.1	负荷分解应用分析	58
3.5.2	单日预测应用分析	67
3.6	本章小结	70
第 4 章	机组角色优化技术	71
4.1	概述	71
4.2	AGC 机组简介	71
4.3	机组角色的分配	72
4.4	基点制定方案	73
4.5	AGC 机组角色优化模型	75
4.6	实际应用分析	77
4.6.1	AGC 调节需求测算	77
4.6.2	机组性能监测	81
4.6.3	AGC 机组建议	81
4.7	本章小结	82
第 5 章	实时发电调度模型及其求解算法	83
5.1	概述	83
5.2	平滑机组出力的实时发电调度建模	84
5.2.1	经典的动态经济调度模型	84

5.2.2	考虑火电实际煤耗水平的节能调度目标项	86
5.2.3	平滑机组出力的机组调节次数约束项	87
5.3	高效求解算法设计	88
5.3.1	基于拉格朗日算法的理想发电曲线生成	88
5.3.2	发电曲线阶梯化	94
5.3.3	失配功率分配	97
5.4	实际应用分析	98
5.4.1	基础数据	98
5.4.2	优化效果分析	99
5.5	本章小结	99
第 6 章	梯级水电实时发电调度技术	101
6.1	智能水电开停机建议	101
6.2	梯级实时调度模型	103
6.2.1	储能最大目标函数	103
6.2.2	约束条件	103
6.3	水火协调基本算法	105
6.3.1	以水定电算法	105
6.3.2	以电定水算法	105
6.3.3	逐次切负荷算法	106
6.4	梯级实时校正策略	107
6.4.1	来水预测偏差的实时校正	107
6.4.2	电站计划执行偏差校正	107
6.5	实际应用分析	108
6.5.1	基本情况	108
6.5.2	智能开停机建议	109
6.5.3	优化结果	112
6.5.4	结果分析	113
6.6	本章小结	114

第 7 章 基于交流潮流预报的高效有功安全校核	115
7.1 概述	115
7.2 交流潮流预报技术	116
7.3 基于稀疏矢量的高效静态安全校核	118
7.4 实际应用分析	121
7.5 本章小结	123
第 8 章 总结与展望	125
参考文献	129

第 1 章 绪 论

受负荷预测精度、天气和事故等因素的影响，电网计划运行方式与电网的实际运行情况会有一定差别，日前发电计划的出力水平与实际运行时的负荷水平也可能出现较大偏差。这种偏离计划的非指导性的偏差将导致电能的不平衡，并且不能简单地依靠自动模式下的 AGC 来消除。如图 1-1 所示，在传统的调度运行过程中，调度员需要不间断监视电网运行状态，通过修改机组发电计划曲线，变更机组 AGC 投退状态等手段以消除这种偏差造成的影响。

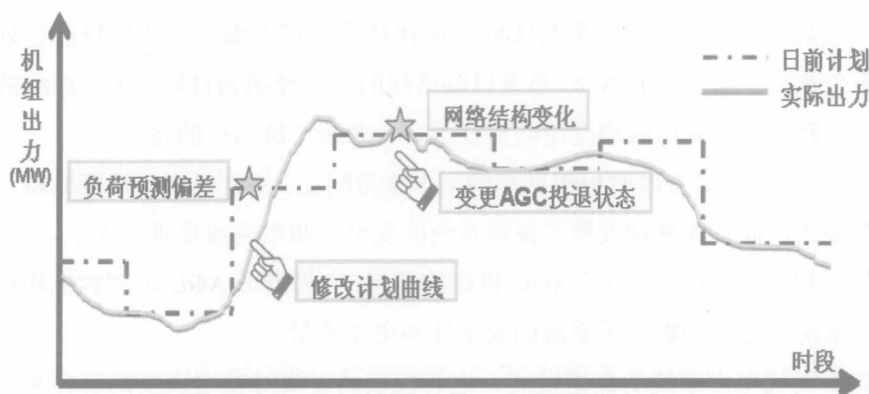


图 1-1 传统日内发电调度模式图

上述传统的日内发电调度过程实际上是一种基于人工经验的发电调度模式，调度运行效益主要取决于调度员的经验和判断，无法从根本上保证电网运行的综合效益。

所谓实时发电调度及其智能控制技术，本质上就是一种智能化的日内发电调度决策技术。与人工决策为主的传统发电调度不同，智能实时发电调度是以电网当前实时运行点和系统超短负荷预测为基础，按照一定的优化策略，综合考虑系统煤耗、发电成本等目标，在满足机组容量约束、机组爬坡出力

约束、线路容量约束、断面约束等安全性要求的前提下，快速制定各种类型机组在未来短时间内的发电计划，以应对未来负荷波动、风功率变化等预测偏差。以此计划替代机组或电厂的日前计划，直接下发到各个电厂以控制机组运行，从而消除偏差，避免由于负荷偏差等因素对电网运行效益产生的负面影响。

电力调度工作的核心任务是维系系统出力与负荷相平衡、保证电力系统安全稳定运行。但是到目前为止，国内主要采用“日前优化调度计划+AGC控制”的两阶段调度方式，时间尺度跨度大、调度模式较粗放，给调度员造成了巨大的工作负担。

概括来说，当前两阶段式的调度方式主要存在以下问题：

(1) 由于没有合理的科学依据，凭经验的调度策略与电厂的期望之间存在矛盾，而且日前负荷预测结果与实际负荷往往存在较大偏差，使得日前计划不能充分执行。由于目前 AGC 系统以联络线的偏差控制为目标，未考虑经济与节能问题，因此做出的调度策略往往不符合系统经济运行的要求。

(2) 由于调度员要时时根据功率的不平衡量制定 AGC 机组的调度策略，工作量很大，而且此种调度模式使得系统的安全性和电能质量难以保证。

(3) 这种调度模式增加了 AGC 机组的负担，容易出现 AGC 可调容量相对不足的情况，进一步影响了系统的安全性和电能质量。

随着现代电力系统的高速发展，迫切需要通过实时发电调度的研究和应用来解决上述问题。

下面将从三个方面来阐述实时发电调度及其智能控制技术的必要性。

(1) 实时发电调度及其智能控制技术是提升发电调度智能化的必然选择

发电调度，主要包括年、月、日等不同时间尺度的计划编制，日内调度计划修正以及 AGC 控制三个主要环节。当前在年、月、日等长时间尺度的发电计划编制中智能化系统应用已经比较普遍，可以实现对机组发电计划的自动化编制。在 AGC 控制环节，多区域多目标智能 AGC 控制技术也已经得到了广泛的研究应用。但在实时计划调整中，发电调度的智能化水平还有待提升，目前在我国大多数省市，还一直沿用调度员人工调整模式。整个发电调

度过程，并不是一个闭环、反馈、智能化的决策过程。

发电调度智能化水平直接影响电网频率稳定，是电网安全稳定运行的重要支撑。为提升电网运行的安全性，提升发电调度智能化水平势在必行。必须紧抓实时发电调度这一发电调度中存在的短板，通过研究应用实时发电调度及其智能控制技术，全面提升发电调度的智能化水平。

(2) 实时发电调度及其智能控制技术是落实节能发电调度的重要手段

节能发电调度是指在保障电力可靠供应的前提下，按照节能、经济的原则，优先调度可再生发电资源，按机组能耗和污染物排放水平由低到高排序，依次调用化石类发电资源，最大限度地减少能源、资源消耗和污染物排放。为提高电力工业能源使用效率，节约能源，减少环境污染，促进能源和电力结构调整，确保电力系统安全、高效运行，实现电力工业的可持续性发展，依据《中华人民共和国电力法》《电网调度管理条例》《电力监管条例》，制定了具体的实施办法。以确保电力系统安全稳定运行和连续供电为前提，以节能、环保为目标，通过对各类发电机组按能耗和污染物排放水平排序，以分省排序、区域内优化、区域间协调的方式，实施优化调度，并与电力市场建设工作相结合，充分发挥电力市场的作用，努力做到单位电能生产中能耗和污染物排放量最少。

目前节能发电调度工作的重点主要是在计划电量分配中考虑不同类型机组的煤耗与排放水平。在传统的实时发电调度模式中，机组发电计划的调整依赖于人工经验，而电网运行的实际能耗水平受限于调度员的人工经验，无法从根本上保证电网运行的节能性。通过实施实时发电调度及其智能控制技术，在实时计划调整中，考虑不同场景下机组计划调整对系统运行煤耗水平的影响，能够从根本上保证电网运行的节能性。

(3) 实时发电调度及其智能控制技术是推进电力市场改革的技术基础

与其他商品相比，电能最大的特征在于难以大规模储存，电能的生产与消费具有同时性。因此，纵观世界范围各电力市场，实时市场都是其最重要的组成部分。电能生产者和消费者在实时市场中通过竞价，及时消除由于预测偏差等因素导致的电力供需偏差。实时发电调度优化技术实际上就是上述

竞价的技术支撑。在实时发电调度过程中，电网公司通过生成者和消费者的报价信息，智能优化，实现了对生成者发电计划或者消费者用电计划的智能调整。

当前，我国电网发展迅速，电力市场化水平不断提升，电力市场改革的呼声一浪高过一浪。作为电力市场的重要技术基础，实时发电调度及其智能控制技术必须先行，即在电网中必须尽快实施应用实时发电调度及其智能化控制技术，为将来的电力市场改革奠定良好的技术基础。

实时发电调度，这一理念最早由国外电力市场提出。电力市场条件下，日前发电调度计划往往由调度中心通过日前市场竞价交易并结合年度合同及月度竞价交易电量分解来确定。但在电力实时生产交易中，电网故障、机组故障、突发性天气及社会因素变化常常造成电网实际情况与日前计划之间产生偏差。由于电力生产传输消费的同时性要求，这种偏差必须及时校正，否则将引起电力系统故障，轻则影响电能质量，重则危及电力系统安全运行。实时发电调度正是消除这一偏差的有效技术手段。

更重要的是，实时发电调度实际上是一种计及安全校核的最优调度。为了保证电网运行安全，就需要仔细考虑电网运行的各种安全约束，在此基础上，以购电成本最低为目标，对机组日前计划的偏差部分进行再调度，从而实现电网运行在安全性和经济性上的最优态势，在满足安全的前提下，提升电网运行效益。

从实际执行效果来看，在传统的日前计划模式下增加实时发电调度环节，确实有效提升了电网运行安全性和经济性，全面提升了电网运行的综合效益。

当前实时发电调度作为实时市场重要的组成部分，已经在国外电力市场广泛应用。以美国 PJM 电力市场为例进行介绍：以 15 分钟作为一个时间断面，电网公司会根据超短期负荷预测，要求各家发电企业进行实时报价，依托于实时发电调度这一核心技术工具，对电厂的发电计划进行再分配调度。作为整个电量分配的重要组成部分，实时发电调度在提升电网运行效益方面起到了极大的作用，在保证电网运行安全约束的前提下，大大降低了电网运行购电成本。

当前我国主要实行节能发电调度,虽然在运行目标上,与国外电力市场并不一致,但是从思路上来说,节能发电调度和经济调度均为最优调度。如何实现电网运行能耗最低,不仅仅需要在年度电量合约、日前发电计划等环节考虑机组的煤耗水平,更重要的是在实时调度过程中,需要根据电网的实际运行情况,特别是负荷预测偏差,对发电厂的发电计划曲线进行调整,以满足电网运行的实际要求。

特别是近年来,随着电网精益化程度的不断提高,实时发电调度在电网运行中的地位日益显著,我国各网省也开始加大力度,研究开发实时发电调度系统。

山东、山西、吉林三省较早地开始了相关课题研究。在国家电网 D5000 平台内,“日前-滚动”计划模式作为四大高级应用之一已经在各个网省公司开始实施部署。

调研表明:当前国家电网范围内实时发电调度智能控制技术在应用上还存在一系列尚未解决的技术难题,因此该系统在实际应用中还处于研究探索开发阶段。主要问题可概况如下:

- 计划有效性 当前滚动计划在负荷预测准确率上还存在不足,预测精度不高,直接导致所下达计划对实际执行没有显著的改进效果。同时滚动计划的实施,导致机组出力计划频繁调整,也没有考虑机组的性能差异,机组疲于奔命,出力调整过于频繁,调节效果较差。
- 计划灵活性 当前滚动计划主要采用时间触发模式,每 15 分钟启动计划更新机组出力,但是由于实际执行过程中网络拓扑变化,滚动计划执行结果常常使关键断面潮流恶化。这种僵化的滚动计划模式不能适应实际使用多变的应用需求。
- 水火电协调特性 当前滚动计划在优化过程中侧重于火电机组调节的研究,而对水电的发电调度考虑较少,尚不能处理水电日内开停频繁等一系列水火互济条件下的发电调度问题。

贵州电网公司是南方电网境内首家研究应用实时发电调度及其智能控制技术的省份。早在 2007 年,贵州电网公司电力调度控制中心(下简称贵州中调)

有关专家结合自身发电调度业务实际，就萌发了开发实时发电调度的想法。2011 年，贵州电网公司实时发电调度及其智能控制研究与应用项目正式立项。项目开发过程中，来自贵州中调的技术专家、一线调度员和来自清华大学的专家学者、北京清大高科系统控制有限公司技术专家一道，群策群力，共同攻关，克服了项目开发中一系列的技术问题，最终圆满完成了项目的开发。该项目共发表论文两篇，申请发明专利八项，攻克了该领域一系列的技术难题，并获得了多项科技奖项。自 2012 年 12 月验收以来，该项目已经过长达 16 个月的正式上线闭环运行，运行期间，系统运行稳定，效益显著，不仅极大地降低了调度员发电调度调整的工作量，提升了电网发电调度智能化水平，同时还提升了电网运行的安全性和节能性，提高了电网频率合格率，降低了运行煤耗，取得了显著的运行效益。

贵州省属山区，水、煤资源较为丰富。煤炭贮量超过 2000 亿吨，水力资源可开发容量 1900 万 kW。自西电东送以来，特别是国发 2 号文颁布后，在贵州省委、省政府和南方电网的领导下，贵州电力实现了跨越发展。

在发电能力方面，截止 2013 年底，贵州电网统调装机达 3574 万 kW，其中统调火电装机 2100 万 kW，占比 58.75%；统调水电装机 1279.358 万 kW，占比 35.79%；统调风电装机 134.81 万 kW，占比 5.46%。贵州电网电源结构图如图 1-2 所示。

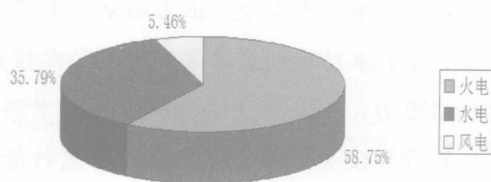


图 1-2 贵州电网装机结构图

在输变电建设方面，截止 2013 年底，贵州电网共有 500kV 变电站(开关站)17 座，500kV 线路 62 条，共计 4908km，已建成覆盖全省各市州的“目”字形坚强环网结构；共有 220kV 变电站 88 座，220kV 线路 272 条，共计 9569km，县级覆盖率达 75%；作为西电东送西部重要的送电端，截止 2013 年已建成“五

交两直”的黔电送粤通道，其中五条交流分别为 500kV 黎桂双回线、500kV 山河双回线、500kV 天金线，两条直流分别为高坡换流站至广东肇庆的高肇直流和兴仁换流站至深圳宝安的兴安直流。

在国家发改委的指导下，按照南方电网公司和贵州省政府的部署，作为国内首家节能发电调度试点的贵州电网公司，建立了一套国内领先的包括组织体系、技术体系和制度体系在内的三位一体的节能发电调度体系。特别是日前发电计划编制环节，已经实现了基于实际煤耗的日前计划智能支持系统，能够实现机组日前计划的自动编制。

在实时 AGC 控制环节，依托自主开发的多区域多目标自动发电控制系统，已经完成了 AGC 控制的自动智能化。

然而在日内实际计划偏差调节上，一直依赖于调度员的人工调整，为此早在 2007 年贵州电网就提出了实时发电控制的想法。2011 年实时发电调度及其智能控制项目正式立项，并于 2012 年验收通过。该项目攻克了众多项目实施中的技术难题，取得了大量理论成果和实际应用效益，并荣获了多项科技奖励。

贵州实时发电调度及其智能控制系统总体目标是：紧密联系贵州发电调度中存在的水电机组装机容量大，水情复杂的实际情况，实现水火电的协调调度。同时，满足系统结构设计的可靠性、经济性和信息共享，应用功能的设计充分体现技术先进、功能实用、操作方便、安全可靠的原则，在保障电网安全的同时减轻调度员的操作压力。

基于此目标，系统结构的设计应满足以下原则：

(1) 可靠性、经济性和信息共享的原则。充分整合利用贵州电网现有 EMS 系统(Energy Management System, 能量管理系统)，节能发电调度、水情自动化系统等方面的信息资源和控制功能。

(2) 充分利用计算机网络技术，保证信息传递的快捷性。遵从信息分层采集，控制分层实施的原则。

(3) 系统设计应遵循国际标准化组织的有关规定，实现信息共享，系统接口标准，保证系统的开放性，信息的准确性和操作的灵便性。主站的软、硬