



“十二五”国家重点图书出版规划项目
智能电网研究与应用丛书

智能发电控制

Smart Generation Control

余 涛 张孝顺 殷林飞 席 磊 李富盛 著

非外借



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

智能电网研究与应用丛书

智能发电控制

Smart Generation Control

余 涛 张孝顺 殷林飞 席 磊 李富盛 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书主要介绍智能电网背景下比自动发电控制更加智能、优化和协调的智能发电控制,内容包括:第1章概述;第2章介绍自动发电控制性能评价指标,提出智能发电控制的优化控制目标;第3章介绍传统发电系统、新型发电系统、虚拟发电系统以及互联电网负荷-频率响应数学模型;第4、5章分别介绍集中决策式、分散自治式智能发电系统的控制框架及其智能算法;第6、7章分别介绍虚拟发电部落、孤岛电网与微网的智能发电控制系统的概念及其实现方法;第8章介绍研究智能发电控制策略的仿真平台(JADE平台和RTDS平台),介绍基于信息物理社会融合系统的并行系统及其并行算法。

本书可作为电气工程、人工智能专业的研究生教材,也可供上述行业的研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能发电控制 = Smart Generation Control / 余涛等著. —北京:科学出版社, 2019.1

(智能电网研究与应用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-060000-4

I. ①智… II. ①余… III. ①自动发电控制 IV. ①TM734

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第274611号

责任编辑:范运年 王楠楠/责任校对:彭 涛

责任印制:师艳茹/封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年1月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019年1月第一次印刷 印张:23 1/2

字数:474 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《智能电网研究与应用丛书》编委会

主编：周孝信

编委：(按姓氏拼音排序)

白晓民(中国电力科学研究院)

蔡旭(上海交通大学)

曹一家(湖南大学)

陈希(中国电力科学研究院)

程浩忠(上海交通大学)

程时杰(华中科技大学)

丁立健(国家自然科学基金委员会)

董新洲(清华大学)

董旭柱(南方电网科学研究院有限
责任公司)

段献忠(华中科技大学)

郭剑波(中国电力科学研究院)

韩英铎(清华大学)

何湘宁(浙江大学)

胡学浩(中国电力科学研究院)

鞠平(河海大学)

李立涅(华南理工大学)

廖瑞金(重庆大学)

刘建明(国家电网公司)

卢强(清华大学)

梅生伟(清华大学)

穆钢(东北电力大学)

饶宏(南方电网科学研究院
有限责任公司)

荣命哲(西安交通大学)

宋永华(浙江大学)

孙元章(武汉大学)

王成山(天津大学)

王锡凡(西安交通大学)

王益民(国家电网公司)

肖立业(中国科学院电工研究所)

薛禹胜(国家电网公司)

杨奇逊(华北电力大学)

杨勇平(华北电力大学)

余贻鑫(天津大学)

张保会(西安交通大学)

张伯明(清华大学)

赵争鸣(清华大学)

《智能电网研究与应用丛书》序

迄今为止，世界电网经历了“三代”的演变。第一代电网是第二次世界大战前以小机组、低电压、孤立电网为特征的电网兴起阶段；第二代电网是第二次世界大战后以大机组、超高压、互联大电网为特征的电网规模化阶段；第三代电网是第一、二代电网在新能源革命下的传承和发展，支持大规模新能源电力，大幅度降低互联大电网的安全风险，并广泛融合信息通信技术，是未来可持续发展的能源体系的重要组成部分，是电网发展的可持续化、智能化阶段。

同时，在新能源革命的条件下，电网的重要性日益突出，电网将成为全社会重要的能源配备和输送网络，与传统电网相比，未来电网应具备如下四个明显特征：一是具有接纳大规模可再生能源电力的能力；二是实现电力需求侧响应、分布式电源、储能与电网的有机融合，大幅度提高终端能源利用的效率；三是具有极高的供电可靠性，基本排除大面积停电的风险，包括自然灾害的冲击；四是与通信信息系统广泛结合，实现覆盖城乡的能源、电力、信息综合服务体系。

发展智能电网是国家能源发展战略的重要组成部分。目前，国内已有不少科研单位和相关企业做了大量的研究工作，并且取得了非常显著的研究成果。在智能电网研究与应用的一些方面，我国已经走在了世界的前列。为促进智能电网研究和应用的健康持续发展，宣传智能电网领域的政策和规范，推广智能电网相关具体领域的优秀科研成果与技术，在科学出版社“中国科技文库”重大图书出版工程中隆重推出《智能电网研究与应用丛书》这一大型图书项目，本丛书同时入选“十二五”国家重点图书出版规划项目。

《智能电网研究与应用丛书》将围绕智能电网的相关科学问题与关键技术，以国家重大科研成就为基础，以奋斗在科研一线的专家、学者为依托，以科学出版社“三高三严”的优质出版为媒介，全面、深入地反映我国智能电网领域最新的研究和应用成果，突出国内科研的自主创新性，扩大我国电力科学的国内外影响力，并为智能电网的相关学科发展和人才培养提供必要的资源支撑。

我们相信，有广大智能电网领域的专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委的共同努力，本丛书将为发展智能电网，推广相关技术，增强我国科研创新能力做出应有的贡献。

最后，我们衷心地感谢所有关心丛书并为丛书出版尽力的专家，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和赞助，感谢广大读者对丛书的厚爱；希望通过大家的共同努力，早日建成我国第三代电网，尽早让我国的电网更清洁、更高效、更安全、更智能！

周孝信

序

科技是强国兴邦之路，而电力技术的创新与发展是国家蓬勃发展、永葆生机的源泉之一，也是国家占据国际战略先机的途径之一。电力技术的创新要紧紧把握国家重大需求，要有前瞻性的眼光，大胆地去考虑技术的发展方向。

当今的时代是一个大数据与互联网的时代，十三五规划将大数据作为基础性战略资源，电力技术应与大数据和互联网深入结合。未来的时代是一个人工智能的时代，余涛教授所提的智能发电控制的概念是具有创造性和前瞻性的。智能发电控制充分汲取人工智能和互联网、大数据等前沿技术的精华，将比自动发电控制系统“更智能”、“更优化”、“更协调”，未来互联电网的发电调度与控制必将被智能发电控制系统所代替。

进入 21 世纪以来，电力系统“源-网-荷-储”各个部分都在经历深刻的变化，在“源”侧，大规模风电场、光伏电站和海量的分布式电源以前所未有的速度接入电网，高渗透率的间歇性、低可控性电源的广泛接入正在深刻改变传统以水、火、气为主的集中式确定性、高可控性电源的电源结构。在“网”侧，特高压/高压直流输电、中低压直流配网和大量电力电子装置加速融入电网，高可控性、电力电子系统正深刻改变传统以低可控性、交流为绝对统治地位的电网架构和控制方式。在“荷”侧，满足实时需求响应和负荷控制要求的用电设备与广泛接入的电动汽车正一同改变着负荷构成和负荷特性，传统上所认为的随机、刚性负荷将日益变为可预测、可调度的柔性负荷。在“储”侧，大规模、分布式的各类型储能系统不断接入配电网，正在深刻改变传统上以抽水蓄能为主的单一储能结构，为电力系统调频、调峰、经济调度和安稳控制等提供了更多技术手段。“源-网-荷-储”各层次的深刻变化预示着电力系统控制将从“自动化”转变为“智能化”，控制架构也从传统的“集中优化式”演变为“分散自治，集中协调”方式。

该书详细地展示了智能发电控制的模型，深入地探讨了人工心理学在智能发电控制中的应用；提出了多种智能发电控制集中式和分布式智能算法以及多种一致性和迁移性的动态指令分配算法；展示了基于人工智能技术的智能发电控制算法，建立了传统机组组合、经济调度、自动发电控制和发电功率分配的模型与算法库。该书提出了多个人工智能的学习类算法，建立了基于信息物理社会融合系统的平行智能发电控制系统，将人工智能中的机器学习和人工心理学应用到发电控制中，填补了“智能发电控制”的空白。

该书的作者为华南理工大学电力学院余涛教授，他在人工智能技术应用到智能发电控制中潜心研究，在理论和工程实践中取得了很多成果。希望余教授继续奋斗，百尺竿头更进一步，促进我国电力系统智能发电控制的发展和进步。

该书为从事电力系统技术研究、工程设计、工程建设方面的专业技术人员提供参考，也可作为高等院校相关专业的教学参考用书。

李立涅

2018年12月26日

前言

自动发电控制(automatic generation control, AGC)是电力系统的一个基础问题,但真正研究此方向的学者相对较少,笔者也是在 2006 年承担广东省电力调度中心的两个与 CPS(control performance standard)标准有关的横向课题时才开始的。在研究中,笔者发现,经过数十年技术发展,AGC 已经基本停滞,各国电网调度 AGC 都是以参数固定的比例积分微分(proportional plus integral plus derivative, PID)控制或线性控制为核心的系统,性能虽然能满足一般工程需要,但依然存在调节次数高和频繁反调的问题。特别是在调度端形成的 AGC 调节总指令在实时下发时缺乏动态优化,无法有效地利用电网内不同类型的互补调节特性,动态控制品质和厂网协调性其实有很大提升空间。对于这一类无法准确建模且动态优化决策实时性强的庞大系统,基于精确模型的控制理论和经典优化方法碰到了很大困难,于是,笔者就想到了用人工智能的方法来解决问题。

在十多年前,笔者将机器学习和 AGC 结合起来研究既是工程应用需要,也是兴趣所在。早在二十年前笔者在写硕士毕业论文时就开始了神经网络和专家系统的研究,并将其运用到云南省科技厅重点科技项目——大型水电机组的故障知识表达和诊断推理中。这个时候国内外电力系统正在经历第一个人工智能热潮,模糊集、BP(back propagation)神经网络和专家系统是这个时期的主要代表,各种类型的论文和系统层出不穷,但没有几年,这种“拿来主义”和缺乏严格数学解释的研究就走到了尽头,甚至在最近十年人工智能学者成为其他很多学者眼中的“不务正业者”,笔者在后来强化学习的研究中也不得不经常颇费口舌地向同行解释其研究的机器学习方法与传统方法的不同。有趣的是,就如一个人往往在人生低潮时能获得伟大的成果,机器学习方法也在后来二十余年中实现了浴火重生,其中以具有自主学习能力的强化学习和多层神经网络——深度学习等为代表的高级机器学习算法就是在这个人工智能的低谷期诞生的。直到 2016 年,谷歌的 Deep Mind 公司研发的围棋机器人 AlphaGo 的出现,彻底颠覆了人们对人工智能“不行”的印象。很有趣的是,这种颠覆性的观念冲击甚至发生在很多计算机科学和人工智能的学者身上。2017 年 10 月,完全基于自主机器学习的 AlphaGo Zero 的诞生更宣告了人工智能新时代的到来。

智能发电控制(smart generation control, SGC)是在“智能电网”提出后不久被提出的。随着人工智能和互联网、大数据的高速发展,在笔者看来,AGC 也应该顺应这个巨大的变化趋势,进一步发展为 SGC,SGC 系统将比 AGC 系统更智

能、更优化、更协调,未来互联电网的发电调度与控制必将被SGC系统所代替。

本书得到笔者主持的国家自然科学基金项目“CPS标准下AGC的最优松弛控制及其马尔可夫决策过程(50807016)”、“智能发电控制的混合均衡态及其多智能体随机均衡对策理论(51177051)”、“电力系统频率自治与虚拟发电部落的智能协同控制理论(51477055)”、“基于平行CPSS结构的智慧能源调度机器人及其知识自动化理论(51777078)”和参与的国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“源-网-荷协同的智能电网能量管理和运行控制基础研究”的课题五“特性各异电源及负荷的能量互补协同优化调控(2013CB228205)”、国家高技术研究发展计划(863计划)项目“含大规模新能源的交直流互联大电网智能运行与柔性控制关键技术”的课题五“交直流互联大电网智能优化调度技术(2012AA050209)”的资助。

本书工作量大,时间跨度长,它的完成是笔者莫大的荣幸,也是笔者众多学生不断迎难而上、开拓进取的结果。本书作者分别是华南理工大学电力学院余涛、汕头大学工学院张孝顺、广西大学电气学院殷林飞、三峡大学电气与新能源学院席磊和华南理工大学电力学院李富盛。本人主要设计全书框架,统领各章内容与小结,完成第1、2章;第3章主要由梁海华、张孝顺、王宇名、殷林飞、郑宇和李富盛完成;第4章主要由本人、殷林飞、张孝顺、于文俊、王宇名、袁野完成;第5章主要由王怀智、殷林飞和张孝顺完成;第6章主要由席磊和张孝顺完成;第7章主要由殷林飞、张孝顺、席磊、王德志和张泽宇完成;第8章主要由席磊、殷林飞和李富盛完成。

在此感谢华南理工大学电力学院刘明波教授,“千人计划”吴青华教授、蔡泽祥教授,香港理工大学许昭教授、陈家荣副教授,“千人计划”董朝阳教授,悉尼科技大学李力博士,原工作于广东省电力调度通信中心的陈亮博士和卢恩博士等为本书提供帮助和指导的各位专家学者。从笔者研究生毕业后到各高校任职的湖南大学周斌副教授、深圳大学王怀智博士、昆明理工大学杨博副教授对本书的研究工作作出了重要贡献。在此一并感谢王宇名、童家鹏、袁野、于文俊、叶文加、程乐峰、张泽宇、郭乐欣、王德志、陈吕鹏等数年来为本书作出重要贡献的各位研究生。感谢林丹、陈焕城等同学在本书撰写整理中付出的艰辛。感谢我的父母和妻儿对我多年科研工作的默默奉献与支持!

本书是笔者在国家973计划项目、863计划项目、多项国家自然科学基金项目及中国南方电网科技项目的资助下完成的一个阶段性工作总结,相信通过抛砖引玉,本书会启发更多人参与到这个方向的研究工作中。笔者也希望在未来为国内外同行呈现出更多研究成果。

余涛

2018年10月10日

目 录

《智能电网研究与应用丛书》序

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 “智能化”发电调度与控制系统	1
1.2 AGC 基础	2
1.3 SGC 基本特征	6
参考文献	8
第 2 章 智能发电控制的性能评价指标与控制目标	11
2.1 自动发电控制系统控制性能标准	11
2.1.1 A1/A2 标准	11
2.1.2 CPS 标准	11
2.1.3 区域控制偏差评价标准	15
2.2 CPS 标准中的统计特性	17
2.3 智能发电控制的优化目标	18
参考文献	22
第 3 章 智能发电控制系统的模型与参数	24
3.1 传统发电系统	24
3.1.1 燃煤机组	25
3.1.2 燃气机组	26
3.1.3 水电机组	27
3.1.4 燃油机组	28
3.1.5 核电机组	29
3.2 新型发电系统	33
3.2.1 风电机组	33
3.2.2 光伏发电	35
3.2.3 储能装置	37
3.2.4 小水电	38
3.2.5 微型燃气轮机	40

3.3 虚拟发电系统	41
3.3.1 虚拟发电厂	41
3.3.2 需求侧可控负荷	42
3.3.3 电动汽车及其他电池储能系统	48
3.4 电力系统负荷频率响应模型	51
3.4.1 IEEE 两区域互联系统 LFC 模型	51
3.4.2 三区域互联系统及更多区域模型	51
3.4.3 考虑需求响应的电力系统负荷频率响应模型	53
3.4.4 考虑大规模可再生能源接入的电力系统负荷频率响应模型	56
参考文献	58
第 4 章 集中决策式智能发电控制系统	60
4.1 系统功能、架构与目标	60
4.2 基于单智能体技术的 CPS 控制器	61
4.2.1 传统 PID 控制器	61
4.2.2 变论域模糊控制	63
4.2.3 Q 学习控制与 $Q(\lambda)$ 学习控制	71
4.2.4 R 与 $R(\lambda)$ 学习控制	84
4.3 基于单智能体技术的发电控制指令动态优化分配	99
4.3.1 基于 Q 学习的动态优化分配	99
4.3.2 基于 $Q(\lambda)$ 学习的动态优化分配	101
4.3.3 基于分层 $Q(\lambda)$ 学习的动态优化分配	104
4.4 基于人工情感 Q 学习算法的智能发电控制设计	111
4.4.1 人工情感	111
4.4.2 人工情感 Q 学习算法	112
4.4.3 人工情感 $Q(\lambda)$ 学习算法的 SGC 控制器	115
4.4.4 仿真算例	117
4.5 基于松弛深度学习算法的统一时间尺度的智能发电控制	122
4.5.1 统一时间尺度的智能发电控制	122
4.5.2 统一时间尺度的仿真算例	125
4.6 基于深度强化森林算法的智能发电控制	133
4.6.1 深度强化森林算法框架	133
4.6.2 两区域、三区域和四区域仿真算例	141
参考文献	147
第 5 章 分散自治式的智能发电控制	149
5.1 多智能体系统功能、架构与目标	149

5.2 基于多智能体技术的智能发电控制	151
5.2.1 基于相关均衡博弈的智能发电协同控制	151
5.2.2 基于自博弈的智能发电协同控制	177
5.3 基于深度强化学习的智能发电控制	186
5.3.1 深度强化学习算法	186
5.3.2 基于深度强化学习的控制器的训练与互博弈	190
5.3.3 深度强化学习算法的 SGC 控制器设计	191
5.3.4 深度强化学习算法的算例	192
参考文献	199
第 6 章 虚拟发电部落控制	203
6.1 什么是虚拟发电部落控制	203
6.2 协同一致性协同控制原理	205
6.2.1 理想通信网络下的多智能体协同一致性控制	205
6.2.2 非理想通信网络下的多智能体协同一致性控制	220
6.3 基于狼群捕猎策略的 VGT 控制	233
6.3.1 框架设计	234
6.3.2 WPH-VTC 策略	236
6.3.3 基于 WPH-VTC 策略的 AGC 设计	239
6.3.4 算例研究	241
6.3.5 讨论	250
参考文献	251
第 7 章 面向孤岛电网与微网的智能发电控制	253
7.1 基于深度神经网络启发式动态规划算法的微网智能发电控制	253
7.1.1 自适应动态规划算法	253
7.1.2 深度神经网络启发式动态规划微网智能发电控制器设计	253
7.1.3 算例	256
7.2 孤岛主动配电网智能发电控制	281
7.2.1 基于多智能体一致性理论的分布式电源发电协同控制	281
7.2.2 基于集体智慧 Q 学习算法的负荷协同发电控制	306
7.3 基于孤岛智能配电网的狼群捕猎策略	324
7.3.1 狼群捕猎策略	324
7.3.2 狼群捕猎策略的设计	328
7.3.3 算例分析	329
参考文献	337

第 8 章 智能发电控制的研究工具与测试平台	340
8.1 MATLAB 平台	340
8.2 JADE 平台	344
8.2.1 SGC-SP 框架	344
8.2.2 JADE	344
8.2.3 实时数据通信	346
8.2.4 ACL 消息发送与监控	346
8.2.5 智能体的创建与销毁	348
8.3 RTDS 平台	350
8.3.1 RTDS 仿真系统的功能和特点	350
8.3.2 RTDS 仿真实验的工作原理	351
8.3.3 典型的 RTDS 动模试验方法	352
8.4 算法库的建立	352
8.5 基于 CPSS 的平行系统的仿真平台的建立	354
8.5.1 基于平行系统的电力系统智能发电控制仿真平台	354
8.5.2 平行系统的仿真算例	357
8.6 结论与展望	360
参考文献	361

第1章 概述

1.1 “智能化”发电调度与控制系统

20 世纪初电力系统诞生不久后,自动发电控制(automatic generation control, AGC)即出现,经过数十年,其技术发展已经基本停滞,各国电网调度 AGC 都是以参数固定的 PID 控制或线性控制为核心的系统,性能虽然能满足一般工程的需要,但依然存在调节次数高和频繁反调的问题。

最近二十年来,在人们熟悉的电力行业以外还发生了两个影响更加广泛的大事件,这两个大事件必将更为深刻地改变电力系统的形态和调控方式。“互联网+大数据”时代的到来是人类发展历史上的一个大事件,人类的交流方式也随之产生深刻的变化,新型的通信和数据分析技术手段层出不穷,电力系统也正在真正变为数字电力系统。以深度学习、强化学习等机器学习为代表的人工智能时代的到来是人类发展历史上的另一个大事件,机器人代替人,电力系统也就真正变成了智能电网。目前,这两个大事件正相互作用、相互推动,互联网和数据驱动方式正在改变传统的封闭式、监督式的机器学习方式,令机器学习方式更加开放,并在不远的未来逐步演变为具有自我探索、自我博弈能力的自主机器学习方式,机器自主思考的时代可期;人工智能技术极大地推动了大数据的挖掘和利用效率,让互联网和大数据分析渗透到自然环境变化和人类活动的方方面面,让未来的每种行为,无论自然行为还是人类行为都有迹可循、完全可预测。

智能发电控制(smart generation control, SGC)的一个最重要的关键词就是人工智能。最近两年来人工智能中最大的明星就是谷歌的 DeepMind 公司研发的围棋机器人(AlphaGo)。AlphaGo 的出现彻底颠覆了传统上认为人工智能难以在数十年内在复杂学习和博弈问题上战胜人类的观点,让人工智能的全球热潮提前到来。AlphaGo 催热了深度学习算法,但很少有人注意到 AlphaGo 还有一个技能就是强化学习。2017 年 10 月, *Nature* 上刊登了 AlphaGo Zero, 这个 Zero 表示新的 AlphaGo 不再依赖于人类历史棋局学习,而是利用纯强化学习(pure reinforcement learning)从零开始自我探索,且其仅通过三天的机器学习就获得对旧版 AlphaGo 100:0 的压倒性战绩。这让更多人意识到了强化学习这种强大的工具的力量。本书提出的 SGC 的智能化正是基于强化学习和其他机器学习算法的,希望能给读者一些有益的启示。

1.2 AGC 基础

互联电网 AGC 属于电网有功调度和控制中最基本的功能,是电力系统能量管理系统(energy management system, EMS)不可或缺的组成部分。在很多教科书和文献中,AGC 系统的功能一般狭义地定义为二次调频,但现代电力调度系统的节能发电调度和经济调度指令也往往是通过 AGC 系统通道下发到发电厂的,因此从广义的观点看,AGC 系统是包含了日前计划调度、实时滚动调度和二次调频的广义发电调度与控制系统。图 1-1 给出了现代省级电网发电调度与控制系统的的基本框架。

现代互联电力系统 AGC 的功能主要是承担系统二次频率调整和受控区域电网联络线功率偏差控制,主要控制方式一般为定联络线偏差控制(tie-line bias control, TBC)、定频率控制(flat frequency control, FFC)和定联络线交换功率控制(constant net interchange control, CNIC)。TBC 模式目前成为互联电网 AGC 的标准控制方式,FFC 模式一般为孤岛电网或区域大网直调(指本级调度直接调管的设备,设备状态的改变需经本级调度许可同意方可操作)调频厂的 AGC 方式,CNIC 模式则是在较为严格的电力交易约束条件下才采用的特殊控制模式。从单一的频率控制到区域联络线功率控制,AGC 的技术伴随着电力系统从孤岛小系统到互联大系统这一整个漫长过程逐步发展。

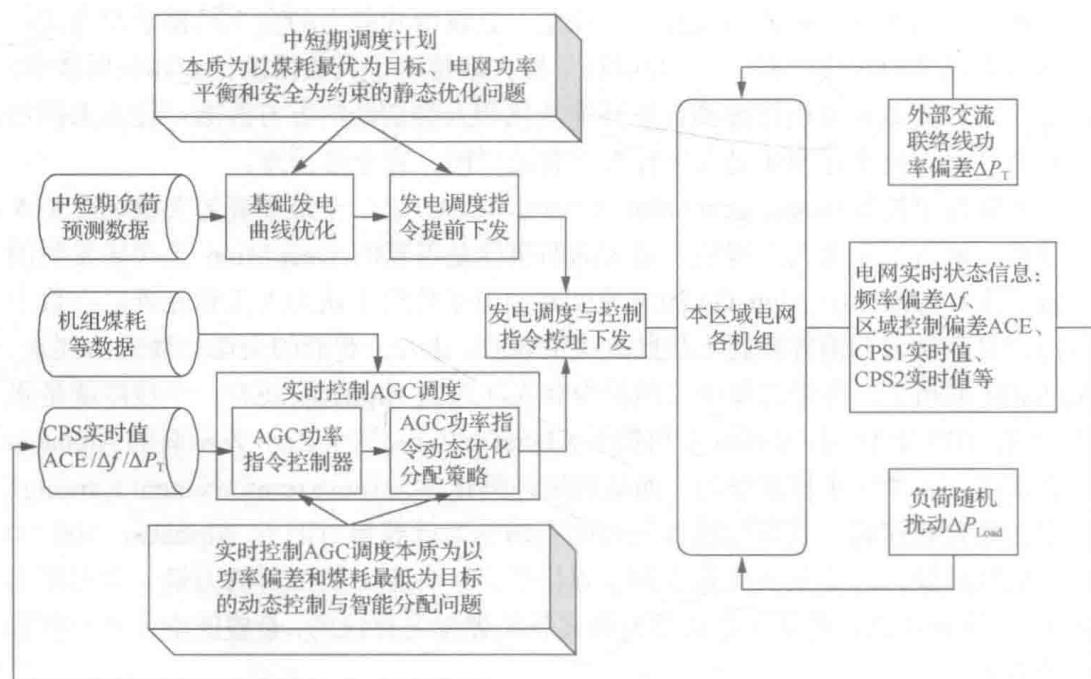


图 1-1 省级电网发电调度与控制系统的的基本框架

从 1937 年苏联研制出第一个频率调整器开始, AGC 相关研究已经发展了快一个世纪了。苏联这个频率调整器被安装在斯维尔斯克水电厂中, 与水电机组的调速器一起构成了系统调频控制系统。这个阶段电网 AGC 只有 FFC 一种控制模式。随着电网逐步扩大, 1959 年苏联开始在组成全苏统一电力系统的主要部分——南部、中部及乌拉尔、西伯利亚西部等联合电力系统中, 应用分散式频率与有功功率自动调整系统。随着其欧洲部分统一电力系统的形成, 苏联又逐步过渡到采用 TBC 准则。以联邦德国和法国电力系统为主, 由荷兰、比利时、卢森堡、意大利、瑞士和奥地利等国电网组成的西欧联合电力系统, 由于采用 TBC 准则实现联合控制, 尽管各国内部的控制准则和装置多种多样, 但整个电网仍可实现众多电厂的联合控制。美国各电力公司所属电力系统之间广泛采用 TBC 方式, 自动控制装置以田纳西河流域管理局(Tennessee Valley Authority, TVA)系统的高速频率负荷控制装置、统一爱迪生系统的自动负荷控制装置、堪萨斯电力照明公司的采用自整角机的电力系统自动负荷分配系统为代表。日本存在两个频率不同的联合电力系统, 分别包含 3 个和 6 个电力系统, 控制准则有固定频率控制和固定负荷控制等, 系统之间多数采用 TBC, 少数用选择式频率控制。1992 年, Jaleeli 和 VanSlyc 在国际权威期刊 *IEEE Transactions On Power System* 上系统地回顾了以上三种 AGC(TBC、FFC、CNIC) 方式及其各种控制策略的研究和应用情况。

我国电力系统的频率和有功功率自动控制工作开始于 1957 年, 当时确定以东北电力系统和京津唐电力系统两大电力系统进行试点。东北电力系统采用集中控制下的分区控制方案, 特点是将系统分为以中调辖区为范围的三个区, 并对联络线负荷及系统频率实现综合控制, 平时各区自行担负本区的负荷变动, 而不影响邻区, 在系统频率降低时, 可相互支援, 联络线负荷可以给定或定时加以修改, 控制装置由磁放大器及自整角机组成。京津唐电力系统采用分散式控制方案, 主要特点是在各主导电厂中分别装设系统微增率发生器, 对发电机组进行控制, 线损采用简化通道方案分散在电厂中进行修正, 因此可以不用或少用通道实现整个电力系统的频率和有功功率的自动控制。

华东电力系统从 20 世纪 60 年代开始进行 AGC 的试验工作, 1963 年华东电业管理局审查通过了《华东电力系统频率与有功功率自动控制方案》, 确定初期采用主系统集中控制下的地区分散控制方式, 远期逐步过渡到 TBC 方式, 并开始制定规划, 组织实施。1964 年实现了新安江水电厂单机自动调频。1966 年和 1967 年又相继完成了望亭电厂一期和二期共 8 台机组的频率与有功功率自动控制工程, 系统进入了水、火电厂联合自动调频阶段。1968 年用晶体管和可控硅实现的第二代自动调频装置试制成功, 与此同时, 华东电网总调度所装设了标准频率分频器、系统频率质量自动记录装置和自动时差校正信号发送器, 通过远动通道将信号发送到新安江水电厂, 实现了系统自动时差校正。