

火电机组控制系统建模仿真的 实践与应用

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组编

盛锴 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

火电机组控制系统建模仿真的 实践与应用

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组 编

盛 镔 主 编

朱晓星 寻 新 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

由于火电机组控制特性复杂,火电机组控制优化和故障诊断始终都是这一领域难点问题。工程实践中,控制系统的优化和故障诊断主要依据技术人员的经验定性判断。与定性分析相比,通过建模和仿真技术能够实现对控制系统的定性定量分析,能够快速和准确地实现对系统的优化和诊断,从而保证机组的安全经济稳定运行。本书结合作者在系统优化和故障诊断实践中对建模仿真技术的应用,着重介绍建模仿真与工程实践的结合方法与案例,以指导实践工作。

本书可供发电企业、电力科研院所从事热工控制的技术人员、大专院校热控专业师生阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

火电机组控制系统建模仿真的实践与应用/盛锴主编;国网湖南省电力公司电力科学研究院组编. —北京:中国电力出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5123-8586-3

I. ①火… II. ①盛… ②国… III. ①火力发电-发电机组-电力系统运行-控制系统-系统建模-研究②火力发电-发电机组-电力系统运行-控制系统-系统仿真-研究 IV. ①TM621.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 281790 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>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 12 月第一版 2015 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 16.5 印张 391 千字

印数 0001—1500 册 定价 69.00 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

编 委 会

主 编 盛 锴

副主编 朱晓星 寻 新

参 编 王伯春 傅 强 倪宏伟 陈厚涛

王志杰 徐湘沪 陈思铭 胡雄辉

序

近年来,以超(超)临界机组为代表的大容量、高参数火电机组已成为电网中的主力机组。截至2014年,国内已经投入运行的1000MW超超临界火电机组超过60台,我国已成为世界上百万千瓦级超超临界机组投运最多的国家。随着新建机组容量和参数的提高,火电机组平均供电煤耗不断下降,从2005年的370g/kWh下降到2013年的330g/kWh。其中,上海外高桥第三发电厂的百万千瓦超超临界火电机组的发电净效率达到全球领先的水平,供电煤耗达到276g/kWh,为世界发电行业标杆。

随着我国电力工业的突飞猛进,大型火电机组热工控制技术也取得了迅速的发展。目前,以“工业4.0”为代表的第四次工业革命即将来临,在此背景下,如何进一步提升火电机组的利用效率仍然是中国火电技术发展的重要课题,而设计更加智能和适应性强的机组控制系统无疑是机组节能降耗、维持和延长主设备寿命、降低环境影响的有效途径。火电机组自动控制系统的控制对象是具有强耦合、非线性、大惯性、参数时变和不确定因素的典型复杂热工系统,它有多个控制量和被控量,具有复杂控制目标和控制任务,具有多种非时变性质或动态性质的运行约束极限条件。机组运行中存在的各种扰动,将对调节过程和调节品质带来很大影响。因此为了设计出性能优越的控制系统,针对火电机组的各个主要部分、分系统和整体,开展动态特性研究并建立精确的数学模型就显得必要和非常关键。

国网湖南省电力公司电力科学研究院热控技术研究所早在2007年就开始火电机组控制系统建模仿真和应用的研究工作。通过《直吹式双进双出钢球磨煤机仿真料位自动的研究》《600MW机组汽温特性及控制策略优化研究》《汽轮机及其调速系统参数智能化辨识技术及建模优化研究》《汽轮机调速系统工作特性对电力系统的安全稳定性的研究》《基于预估调节的火力发电机组AGC调节策略设计及应用》《增量式控制算法及其在锅炉过热汽温控制中的应用》等近10个科研项目,积累了大量宝贵的火电机组建模的实践和应用经验。《火电机组控制系统建模仿真的实践与应用》一书是热控技术研究

所多年研究工作的积淀，该书以火电机组控制系统为研究对象，围绕火电机组整体、分系统和各主要组成部分的建模和控制优化等重点问题，从系统建模、过程仿真、控制优化、故障诊断等方面，系统地阐述该书作者在这些问题上的研究应用成果。该书取材广泛，内容丰富，结合热工自动控制系统的特点，引用了大量应用案例，实用性强，能够为热工自动控制专业人员设计、优化、整定热工自动控制系统提供较好的借鉴和参考。

国网湖南省电力公司电力科学研究院 张建玲

2015 年 10 月

前 言

随着我国电力工业的发展,以超临界、超超临界技术为代表特征的大容量、高参数火电机组已成为电网中的主力机组。机组容量的增大和参数的提高,导致设备数量增多且控制系统结构复杂。随着电力体制改革的逐渐深化,火电机组都将面临以下挑战:机组不仅要满足电力系统的负荷需求,也要保证供电电压和频率的恒定;火电机组参与电网调峰调频的任务增加;机组运行必须达到节能降耗、维持和延长主设备的寿命及降低环境影响等严格要求。实现上述要求的途径之一是研究开发更加综合和适应性强的机组控制系统。总的来说,技术和时代的发展对火电机组自动化水平提出了更高的要求。

然而火电机组是一复杂的热工系统。随工况变化,其显现出的强非线性、多变量耦合、大惯性及参数时变特征都极大地增加了控制系统设计的难度,降低了控制系统的适用性。为了克服火电机组控制系统设计中的以上障碍,针对火电机组的各个主要部分、分系统和整体,开展动态特性研究并建立精确的数学模型就显得必要且关键。

本书是国网湖南省电力公司电力科学研究院在火电机组控制系统建模领域研究工作的阶段性总结,从系统建模、过程仿真、控制优化、故障诊断等方面,阐述本书作者在这些问题上的应用研究成果。全书共分为8章,其中第1章是绪论,重点介绍了火电机组控制系统建模仿真的现状和意义;第2章介绍了系统建模仿真的基本原理和主流方法;第3章介绍了单回路控制系统仿真分析和优化实践案例;第4章介绍了建模仿真技术在汽温控制系统优化中的应用;第5章介绍了建模仿真技术在机组协调控制系统控制优化中的应用;第6章介绍了汽轮机调节系统建模技术及汽轮机调节系统模型参数辨识与校核软件;第7章介绍了火电机组网源协调模型及其应用案例;第8章介绍了实时仿真技术在火电机组控制系统故障诊断中的应用。本书第1章由寻新、王伯春、傅强撰写,第2章由朱晓星、寻新撰写,第3章由盛锴、陈思铭撰写,第4章由陈厚涛、王志杰撰写,第5章由倪宏伟、王志杰、盛锴、胡雄辉撰写,第6章由朱晓星、陈思铭撰写,第7~8章由盛锴、徐湘沪撰写。全书由盛锴统稿。

衷心感谢本书的主审人，国网湖南省电力公司电力科学研究院的张建玲党委副书记，他在本书编写过程中提出的宝贵建议和指导意见，使我们受益匪浅。感谢中国电力科学研究院电力系统研究所的陶向宇高工、王官宏高工、何凤军主任等人在汽轮机及其调速系统建模方面给予我们的帮助。

本书是作者所在单位近年来在火电机组控制系统建模研究和应用工作的总结和提炼，虽然我们开展火电机组控制系统建模研究工作已有一段时间，但由于作者水平有限，加之时间仓促，疏漏之处在所难免，敬请读者指正。

作 者

2015 年 10 月

目 录

序	
前言	
第一章 绪论	1
1.1 火电机组生产工艺流程	1
1.2 火电机组发展概况	3
1.3 火电机组控制系统	5
1.4 火电机组控制系统建模仿真研究和应用状况	10
参考文献	11
第二章 系统建模仿真基础	13
2.1 系统仿真	13
2.2 系统建模	24
2.3 系统辨识	30
参考文献	41
第三章 单回路控制系统仿真分析与优化实践	42
3.1 单回路控制系统及应用	42
3.2 单回路控制系统参数整定与仿真	45
3.3 典型单回路控制系统建模与优化应用	51
参考文献	62
第四章 建模仿真技术在汽温控制系统中的优化应用	63
4.1 汽温控制概述	63
4.2 汽温控制对象动态特性	63
4.3 典型汽温控制策略	70
4.4 增量式汽温控制系统建模与仿真	73
4.5 增量式控制算法在火电机组仿真系统中的应用	82
4.6 增量式控制算法及优化软件的现场应用	90

4.7 基于汽温对象特性的内模控制系统现场应用	94
参考文献	102
第五章 机组协调控制系统建模与控制优化	105
5.1 机组协调控制系统简介	105
5.2 协调控制策略概述	107
5.3 机组协调控制系统建模与特性分析	112
5.4 基于建模的协调控制系统优化设计与实践应用	121
参考文献	130
第六章 汽轮机及其调节系统建模与应用	132
6.1 概述	132
6.2 现场试验	136
6.3 系统建模与参数辨识	142
6.4 模型的仿真校核	159
6.5 自动辨识与校核软件	170
参考文献	180
第七章 火电机组网源协调模型及其应用	182
7.1 火电机组网源协调模型的构建	182
7.2 基于源网协调目的火电机组控制特性分析和优化	193
7.3 火电机组一次调频性能优化研究	204
7.4 基于内模控制的火电机组功率控制系统及其仿真分析	219
参考文献	227
第八章 实时仿真技术与火电机组控制系统故障诊断	229
8.1 实时仿真在火电机组中的应用情况	230
8.2 Simulation 实时仿真技术在控制系统故障诊断中的应用案例	232
8.3 Simulation 实时仿真技术在控制系统故障诊断中的应用案例	244
参考文献	253

绪 论

当前, 在我国的电力结构中, 火电占据主导地位的局面依然未变, 随着电力体制改革的逐渐深化, 总体来讲, 火电企业都将面临如下问题的挑战: ①为满足最终用户的电力需求, 各独立的发电厂家进行市场竞争; ②面临的自然资源 and 环境保护方面的压力逐渐加大; ③发电主设备的老化以及投资新厂区的效益不确定性等。在这种情况下, 火电机组这种应用最广泛的发电机组的运行方式必然会受到下列因素的制约: ① 机组在任何时刻不仅要在数量上满足电力系统的负荷需求, 而且在质量上也要保证供电电压和频率的恒定; ②发电企业之间的竞争以及市场的驱动力使得机组参与电网调峰调频的任务增加; ③ 机组运行必须达到节能降耗、维持和延长主设备的寿命及降低环境影响规定的严格要求。实现上述要求的途径之一是研究开发更加综合和适应性强的机组控制系统, 这些控制系统应当具有保证机组高性能、大范围负荷跟随能力, 同时, 在变化的物理和经济条件下满足维持和延长主设备寿命、污染物排放以及燃料消耗量等方面的要求^[1]。

热工控制系统的控制对象——火电机组是具有强耦合、非线性、大惯性、参数时变和不确定因素的复杂系统, 它有多个控制量和被控量, 具有上述复杂控制目标和相应的复杂控制任务。具有多种非时变性质或动态性质的运行约束极限条件, 环境中存在着的各种扰动, 对过程动态带来了很大影响。常规的机组控制方案结合前馈补偿、串级等控制策略, 采用基于 PID 线性控制算法的多个 SISO 反馈控制回路组成的分散控制结构, 目前仍在大多数机组中广泛应用。总体来说, 采用常规控制算法的控制系统基本能够满足正常情况下机组运行的需要, 但在复杂工况条件下, 机组运行仍然需要运行人员的手动干预, 否则机组参数偏离经济指标, 造成大量的能量损失, 增加了设备故障率, 严重影响机组的经济效益和安全可靠运行^[2]。

由于火电机组是一复杂的热工系统, 它所呈现出的强非线性、变量耦合、大惯性、参数时变以及不确定因素扰动等问题都是控制系统设计和优化所必须详细考虑的。为了设计出性能优越的控制系统, 针对火电机组的各个主要部分、分系统和整体, 开展动态特性研究并建立精确的数学模型就显得必要且关键。

1.1 火电机组生产工艺流程

1.1.1 火电机组主要设备及工作原理

火电厂的燃料主要有煤、石油 (主要是重油、天然气)。我国的火电厂以燃煤为主, 一般燃煤火电厂由三大主机——锅炉、汽轮机、发电机组成。

锅炉是火电厂的主要设备之一, 它的作用是将燃料的化学能转变为蒸汽的热能, 以供汽轮发电机发电和供热之用。它是利用燃料的燃烧热能或其他热能加热给水以生产规定参

数和品质的蒸汽、热水的机械设备。在电站锅炉中，通常将化石燃料（煤、石油、天然气等）燃烧释放出来的热能，通过受热面的金属壁面传给其中的工质——水，把水加热成具有一定压力和温度的蒸汽。蒸汽驱动汽轮机，把热能转变为机械能，汽轮机再带动发电机，将机械能转变为电能供给用户。电站锅炉中的“锅”即锅炉的汽水系统，它的主要任务是吸收燃料燃烧释放的热量，将给水加热到指定温度和压力的过热蒸汽，一般包括省煤器、水冷壁、过热器及再热器等以及通流分离器件如联箱、汽包（汽水分离器）等部件。“炉”即锅炉的燃烧系统，它的主要任务是组织燃料在炉内进行良好的燃烧，一般包括炉膛、燃烧器、空气预热器、风道及烟道等。

汽轮机是一种以蒸汽为动力，并将蒸汽的热能转化为机械能的旋转机械，是现代火力发电厂中应用最广泛的原动机。来自锅炉的蒸汽经主汽门和调节汽门进入汽轮机的各级，蒸汽在每一级的喷嘴膨胀加速，将其中一部分焓转变为蒸汽的动能，即降低蒸汽压力和温度，形成高速汽流，向动叶冲击，推动转子旋转。蒸汽经动叶通道折转进入下一级喷嘴，使蒸汽中的焓再一次下降，转变为动能，流向后一级动叶，推动转子旋转做功。蒸汽如此逐级行进，直到从末级动叶出来排入凝汽器。蒸汽排入凝汽器被冷凝为凝结水，由水泵经回热系统送回锅炉再行加热，变为具有一定压力和温度的蒸汽，继续进入汽轮机做功。蒸汽轮机具有单机功率大、效率高、寿命长等优点。

由汽轮机或燃气轮机驱动的发电机，是火电厂的主要设备之一，与锅炉、汽轮机合称为火电厂的三大主机。现代汽轮发电机均是三相同步发电机，利用电磁感应原理，将汽轮机的机械能转换为电能输出。当原动机拖动直流励磁的同步发电机转子以一定转速旋转时，根据电磁感应原理，三相定子绕组便感应出交流电势。定子绕组若接入用电负载，发电机就有交流电能输出，其构造主要有定子和转子两个部分，转子由汽轮机拖动，励磁电流接入转子绕组后产生旋转磁场，并在定子绕组产生感应电动势。发电机的配套系统主要有轴承润滑油系统，若是氢气冷却的发电机还配套有密封油系统和氢气系统。空气冷却的发电机还有空冷器。

1.1.2 火电机组工艺流程

火力发电厂由三大主要设备——锅炉、汽轮机、发电机及相应辅助设备组成，它们通过管道或线路相连构成生产主系统。原煤是火力发电厂运行过程中的最初处理对象，原煤特性的改变将影响到发电厂整个的后续生产过程，对锅炉机组的出力与可利用率、机组的效率与维修费用、整个发电厂的经济性与运行的可靠性都具有很大的影响。以直吹式制粉系统为例，磨煤机需要连续的煤炭供应，制粉系统的出力必须随时与锅炉的负荷相平衡，而发电厂的输煤系统则通常不是连续运行的，原煤斗是在煤炭耗用和输送之间设置的缓冲装置，其容量考虑了输煤系统出现故障的可能。

锅炉风烟系统按平衡通风设计，平衡通风方式使炉膛和风道的漏风量不会太大，保证了锅炉较高的经济性，能防止炉内高温烟气外冒。烟气系统将炉膛中的烟气抽出，经尾部受热面、空气预热器、除尘器和烟囱排向大气。在除尘器后设有引风机。为使除尘器前后的烟气压力平衡，使进入除尘器的烟气分配均匀，在两台除尘器进口烟道处设有联络管。为防止烟气倒流入引风机，在引风机出口处装有严密的烟气挡板。

锅炉主蒸汽经汽轮机主汽阀后分为多路分别进入到各个高压调节阀，经过导管进入汽轮机膨胀做功；汽轮机的级是由喷嘴静叶和与之相配合的动叶组成，是汽轮机做功的基本

单元,当具有一定温度和压力的蒸汽通过汽轮机的级时,首先,将通过喷嘴静叶的蒸汽的热能转换为动能,然后,在动叶中将动能转换成机械能,从而完成汽轮机做功的任务。汽轮机带动发电机,将机械能转化为电能输出。

(1) 汽水系统。深井水经除盐后补入凝汽器,然后被凝结水泵送入除氧器进行除氧,除氧后的凝结水经给水泵打入锅炉进行升温升压,变成具有高温高压的水蒸汽进入汽轮机推动汽轮机高速旋转,汽轮机通过联轴器带动发电机高速旋转并对外输出电能。在汽轮机内做过功的蒸汽排入凝汽器,被循环水冷却成凝结水,经凝泵升压打入除氧器。如此的周而复始,水在火电厂的热力系统里所承担的角色就是能量转换的介质。

电厂基本汽水系统流程(朗肯循环):给水→锅炉→过热蒸汽→汽轮机→凝汽器→给水泵→给水送入锅炉。

(2) 制粉系统。火电厂大型燃煤锅炉机组一般都采用煤粉燃烧方式。这种燃烧方式具有较高的燃烧效率、较广的煤种适应性以及较迅速的负荷响应性。煤粉在炉内是处于悬浮状态燃烧的,燃烧过程在煤粉流经炉膛的短暂时间内完成,从着火稳定性与系统的经济性角度,电站锅炉都对煤粉的细度和干度提出一定的要求。火力发电厂制粉系统的任务就是为锅炉制备和输送细度及干度符合运行要求的煤粉。

制粉系统从系统风压方面可分为正压式和负压式,从工作流程方面又可分为直吹式和中间储仓式两类。所谓直吹式制粉系统,就是原煤经过磨煤机磨成煤粉后直接吹入炉膛进行燃烧,而中间储仓式制粉系统是将制备出的煤粉先储存在煤粉仓中,然后根据锅炉负荷需要,从煤粉仓取出经给粉机送入炉膛燃烧。直吹式制粉系统制备出的煤粉一般是被具有一定风压的一次风吹至炉膛的,系统处于正压状态,所以直吹式制粉系统一般属于正压式制粉系统;而在中间储仓式制粉系统中制备出的煤粉一般是由排粉风机抽出的,系统处于负压状态,故而中间储仓式制粉系统一般属于负压式制粉系统。

(3) 风烟系统。锅炉风烟系统是锅炉重要的辅助系统。它的作用是连续不断地给锅炉燃烧提供空气,并按燃烧的要求分配风量,同时使燃烧生成的含尘烟气流经各受热面和烟气净化装置,最终由烟囱及时地排至大气。

锅炉风烟系统按平衡通风设计,系统的平衡点发生在炉膛中,因此,所有燃烧空气侧的系统部件设计为正压运行,烟气侧所有部件设计为负压运行。平衡通风方式使炉膛和风道的漏风量不会太大,保证了锅炉较高的经济性,能防止炉内高温烟气外冒,对运行人员的安全和锅炉房的环境均有一定的好处。

二次风系统供给燃烧所需的空气,一般配有两台 50% 容量的送风机,在风机出口挡板后设有联络风管以平衡送风机出口风压。在送风机的入口风道上设有热风再循环装置,当环境温度较低时,可以投入热风再循环,以提高进入空气预热器的空气温度,防止空气预热器冷端积灰和腐蚀。

1.2 火电机组发展概况

电力工业在我国国民经济中有着非常重要的作用,中国已经成为世界上电力建设速度最快的国家,截至 2014 年年底,我国发电装机总容量达 13.6 亿 kW,居世界第一位。中国煤炭资源丰富,是世界上最大的煤炭生产国和消费国,也是世界上少数几个以煤炭为主

要一次能源的国家。中国一次能源的结构决定了中国发电机组中火电机组占绝对优势。2014 年底,我国火电机组总容量为 9.1 亿 kW,占发电装机总容量的 67.4%,而火电机组中 90%是燃煤机组。

现代大型火力发电厂,一般都是一台锅炉配置一台汽轮发电机组成单元制机组。200MW 以上,一般都采用超高压、亚临界甚至超临界(蒸汽压力大于 22.16MPa)参数。按照锅炉汽水参数的不同,现代大型火电机组可划分为亚临界机组和超(超)临界机组。亚临界机组一般只能用于出口蒸汽压力小于或等于 16.66~17.64MPa 的锅炉,锅炉汽水循环依靠汽水比重差进行,超(超)临界机组没有汽包,汽水流动完全依靠给水泵的压力从锅炉进口一直到出口。超(超)临界机组发电是有效利用能源的一项技术,其水蒸气工质的压力、温度均超过以往亚临界机组的参数,从而可以大幅度提高机组热效率。超临界机组的效率比亚临界机组提高 2~3 个百分点,而超超临界机组的效率比超临界机组提高 2~4 个百分点。配有污染物排放控制技术的超(超)临界机组已经是商业化的成熟发电技术,在可用率、可靠性、运行灵活性方面比其他类型机组具有很大的优势,因而也成为了火电机组发展的主流趋势,以下主要介绍国内外超(超)临界机组的发展概况。

(一) 美国超临界机组的发展

美国是发展超临界机组最早的国家。1957 年,世界上第一台超临界机组在 Philo 电厂投运,容量为 125MW,参数为 31MPa、621/566/560℃,该机组由 B&W 和 GE 公司设计制造;1958 年,第二台超临界机组在 Eddy stone 电厂投运,容量为 325MW,参数为 34.4MPa、649/566/566℃,该机组由 CE 和 WH 公司设计制造。它们为美国超临界机组的设计、制造、运行提供了宝贵经验。

到 20 世纪 80 年代初,美国超临界机组达 170 余台,占燃煤机组的 70%以上、总装机容量的 25.22%,其中单机容量介于 500~800MW 的占 60%~70%,至 1994 年共安装和投运了 9 台 1300MW 的超超临界机组。

(二) 欧洲超临界机组的发展

德国是最早研究、制造超临界机组的国家之一,1956 年投运的一台容量为 88MW 的超超临界机组,因容量较小,未获得很大的发展。20 世纪 70 年代,政府对环保的要求日益严格,并加强了对排放量的控制,由此开始发展大容量的超临界机组。目前德国已投运和在建的超临界和超超临界机组近 20 台,其中具有代表性的机组是 2000 年在 Niederrhein 电厂投运的 965MW 超超临界机组(蒸汽参数为 26.9MPa、580/600℃)以及 2000 年在 Hessler 电厂投运的 700MW 超超临界机组(蒸汽参数为 30MPa、580/600℃)。

丹麦是热能动力技术先进的国家,在火电机组上也处于领先地位。1998 年在 skærbæk 发电厂投产的 400MW 机组,两次中间再过热,蒸汽参数为 29MPa、582/582/582℃,海水直接冷却,净效率高达 49%,是当今世界上效率最高的火电机组。1999 年在 Nordjyllands 电厂投产的 400MW 机组,使用同样的蒸汽参数,效率也高达 47%。2001 年在 Avedøre 电厂投产的 375MW 机组,采用的蒸汽参数为 30MPa、580/600℃,其净效率也是高达 48%。其他如意大利、荷兰等国在采用超临界机组方面也都有成功的经验。

(三) 日本超临界机组的发展

日本发展超临界机组起步较晚,但发展速度很快。自日立公司于 1967 年从美国引进的第一台超临界 600MW 机组在沛崎电厂投运后,日本的超临界机组技术得到了迅速的发

展。1989 和 1990 年在川越电厂投运的两台 700MW 机组的参数是两次再过热的蒸汽参数为 31MPa/566℃/566℃/566℃, 在满负荷下的热效率达 41.9%, 投运以来情况很好。目前在日本, 450MW 以上的机组全部采用超临界参数。

(四) 中国超临界机组的发展

我国火电技术与当今世界火电技术的发展趋势是基本一致的。我国在 20 世纪 80 年代引进国外亚临界 300、600MW 机组的设计和制造技术后, 制造企业进行了相应的技术改造, 设计、制造、运行能力都有了很大的提高。河南华能沁北电厂两台 600MW 工程作为国产超临界机组示范电站, 主机招标锅炉由东方锅炉厂中标, 汽轮发电机组由哈尔滨动力集团中标。该工程于 2002 年 8 月动工, 2004 年 12 月通过 168h 试运行并正式投产发电。2006 年 11 月, 华能玉环电厂国内第一台百万千瓦超超临界燃煤机组建成投产。该机组汽轮机和发电机由上海电气制造, 锅炉由哈尔滨锅炉厂提供。2010 年 12 月, 华电宁夏灵武电厂二期两台 106 万千瓦工程 3 号机组投运, 这是国内首台投运的百万千瓦级空冷机组, 标志着百万千瓦超超临界空冷机组应用水平迈上了新的高度。截至 2014 年, 我国已建成投产的百万千瓦级超超临界机组超过全球同类机组的总和, 自主创新的 600MW 超临界、超超临界火电机组已实现向印度、俄罗斯、土耳其等国家的出口。

1.3 火电机组控制系统

火电机组控制系统的功能是满足机组的安全启动、停机以及在各种运行工况下稳定、经济运行的需要。在自动控制范围内, 火电机组控制系统要求能够处于自动方式而不需要人工干预, 完成所有闭环控制回路及被调量、被控设备运行状态的监视。同时, 在负荷变化或危急工况下, 控制系统能够实现必要的联锁保护等, 以确保机组设备的安全。

按照信号类型来分, 火电机组控制系统可分为开关量控制系统和模拟量控制系统。限于本书内容, 以下主要介绍模拟量控制系统。火电机组模拟量控制系统按照面向的控制对象可划分为协调控制系统、燃烧控制系统、给水控制系统、汽温控制系统及其他控制系统。

1.3.1 协调控制系统

单元机组协调控制系统的主要任务是使机组在主汽压力偏差不超过允许范围的情况下, 尽快适应负荷变化的要求, 同时应使被调节变量变化平稳, 不致过分超调。单元机组协调控制系统是根据单元机组负荷控制的特点, 为解决负荷控制中内、外两个能量供求平衡关系而构造的一种控制系统, 通常指机、炉闭环控制系统的总体。该系统通过协调机组内、外能量的平衡, 以及压力控制和功率控制的矛盾, 从而达到满意的控制效果。单元机组协调控制系统的主要功能包括:

(1) 接受电网调度的自动负荷指令、运行人员的负荷指令和电网频率偏差信号, 及时响应负荷请求, 使得机组具有一定的调峰、调频能力, 适应电网负荷变化的要求。

(2) 协调锅炉和汽轮发电机的运行, 在负荷变化率较大时, 能维持两者之间的能量平衡, 保证主蒸汽压力稳定。

(3) 协调机组内部各子控制系统(燃料、送风、炉膛压力、给水、汽温等控制系统)的控制作用, 在负荷变化的过程中使机组的主要运行参数在允许的工作范围内, 以确保机

组较高的效率、可靠性和安全性,实现锅炉自身的协调,主要是风、水、煤的协调。

(4) 协调外部负荷请求与主辅设备实际能力的关系。在机组主辅能力受到限制的异常情况下,能根据实际情况,限制或强迫改变机组负荷,这是协调控制系统的联锁保护功能。

单元机组协调控制包括基本方式、锅炉跟随方式、汽轮机跟随方式和机组协调控制方式等4种方式。

(1) 基本方式(BM)。当汽轮机主控与锅炉主控均在手动方式时,机组就工作在基本方式。在该方式下,汽轮机和锅炉的调整只能通过手动方式来实现,即通过手动操作汽轮机主控和锅炉主控的输出来控制机组功率和主蒸汽压力。

(2) 锅炉跟随控制方式(BF)。锅炉跟随方式是由汽轮机侧调功率,锅炉侧调汽压。在这种方式下,锅炉主控在自动,汽轮机主控在手动,通过手动控制汽轮机主控的输出来控制汽轮机的功率,锅炉主控则根据主蒸汽压力和主蒸汽压力设定值的偏差,通过PID运算后作为锅炉主控的输出,改变锅炉的燃烧率及相应的给水流量等,从而保持主蒸汽压力在设定值附近。

(3) 汽轮机跟随控制方式(TF)。与BF控制方式相反,TF控制方式以汽轮机控制器控制主汽压,而锅炉控制器控制实发功率,所以也称该方式为锅炉基本负荷控制方式。当外界负荷指令变动时,锅炉控制器根据功率设定值 P_0 与实发功率 P_E 的偏差信号运算,通过输出信号改变进入炉膛的燃料量,主汽压力 P_T 随之变化,汽轮机调节器根据 P_T 与汽压设定值 P_{T0} 的偏差信号运算,通过输出信号改变进汽量,机组实发功率 P_E 随之变化,直到实发功率等于负荷指令。该方式的优点是主蒸汽压力稳定,有利于机组的安全稳定运行,但锅炉侧具有的大惯性和延迟特性使得机组的负荷响应能力较差。

(4) 机炉协调控制方式(CCS)。机炉协调控制是将锅炉和汽轮机作为一个整体进行考虑,以解决负荷响应快速性和汽压运行稳定问题。当锅炉主控和汽轮机主控处于自动方式时,机组就处于机炉协调控制方式。机炉协调控制方式具有闭环调节主蒸汽压力和机组功率的功能,从而维持主蒸汽压力的稳定和满足机组负荷要求。锅炉主控主要控制主蒸汽压力偏差,汽轮机主控主要控制机组负荷。

1.3.2 燃烧控制系统

燃烧控制的基本任务是使锅炉燃烧提供的热量适应锅炉蒸汽负荷的需要,同时还要保证锅炉的安全经济运行。燃烧控制是锅炉控制系统的重要子系统,它接受锅炉主控系统发出的锅炉负荷指令,并将该指令分别送往燃料、风量控制系统,使燃料量和风量按预先设置好的比例同时动作,以保证合适的风煤比,并通过燃料控制和风量控制的交叉限制作用,满足升负荷时先加风后加燃料和减负荷时先减燃料后减风的生产要求,以保证锅炉安全又经济地正常运行。

燃烧控制系统是一个复杂的多输入多输出系统,各变量之间相互耦合。燃烧控制系统具有如下特点:

(1) 燃烧控制系统的任务是使锅炉的燃烧率随时适应外界负荷的需要。在外界负荷变化时,主蒸汽压力能迅速、成比例地发生相应变化。因此,主蒸汽压力可作为反映锅炉燃烧率是否满足外界负荷要求最主要的被调量。

(2) 当机组负荷变化时,燃料量、送风量、引风量必须同时按比例地快速改变,给水

量也要同时按比例地快速改变,才能使主蒸汽压力、烟气含氧量、炉膛压力和主蒸汽温度控制在满意范围内;当机组负荷需求不变时,燃烧控制系统应能迅速消除内扰,保持燃料量、送风量、引风量稳定不变。相应地,给水控制系统也应能迅速消除内扰,保持煤水比的稳定。

(3) 对于主蒸汽压力,从给粉量变化到炉膛热负荷的变化,再到主蒸汽压力的变化具有一定的迟延。所以,在机组负荷需求变化时,如何尽可能及时调整燃烧率是燃烧控制的主要问题,主蒸汽压力迟延特性是影响燃烧过程自动调节的主要问题之一。

(4) 燃烧自动控制的实现需要涉及较多的信号,特别是燃料量信号、风量信号以及氧量信号的准确测量是实现燃烧过程自动控制的前提。

燃烧控制系统可分解成燃料控制、送风控制、引风控制三个子系统。

(1) 燃料控制系统。燃料控制的任务在于使进入锅炉的燃料量随时与负荷要求相适应。主蒸汽压力是锅炉燃料发热量与汽轮机能量需求平衡的标志,并且在负荷扰动下主蒸汽压力具有成比例的响应特性,因此主蒸汽压力可作为燃料控制系统的被调量。

燃料控制系统一般都采用了燃料、送风交叉限制措施。例如,采用负荷指令与总送风量信号送到小值选择器,取较小值作为燃料调节器的给定值;锅炉负荷要求指令与热量信号送到大值选择器,取较大值作为送风调节器的给定值,从而实现在增负荷时先加风后加燃料,而降负荷时先减燃料后减风,其目的是保证在变负荷过程中炉膛内有一定的送风裕量,从而保证燃料量的充分燃烧。

此外,对于燃煤锅炉来说,运行中的煤量的自发性扰动是经常出现的,如煤粉的堵塞、燃料发热量变化等,所以在设计燃煤锅炉的燃烧控制系统时,必须考虑使系统具有消除燃料自发性扰动的措施。

因此,在锅炉负荷变化时,燃烧控制系统如何快速改变进入炉膛的煤粉量,以及当锅炉负荷不变时,控制系统如何及早发现原煤量的扰动就成为燃烧自动控制系统中两个需要特别予以考虑的问题。

(2) 送风控制系统。送风控制的任务在于保证燃烧过程的经济性,具体来说就是通过调节送风量来保证燃烧过程中合适的风煤比。在该系统中,被调量是烟气含氧量,调节量是各台送风机的导叶开度,反馈量是总送风量,构成串级控制系统。事实上,氧量设定值也不是常数。系统一般通过函数发生器产生一个随负荷变化的最佳氧量信号,并经过运行人员根据实际运行情况修正后作为氧量设定值,构成更加完善的燃烧经济型控制系统。总风量测量回路提供总风量的反馈信号,并设有偏差报警逻辑装置,当变送器的信号偏差较大时,偏差报警信号送入逻辑判断并采取一系列的控制措施,送风量信号通常还要进行风温修正。

为了保证锅炉风量始终富裕燃烧,设置大值选择组件,一般取锅炉指令、总风量和30%额定风量等信号。通常情况下,锅炉指令和总风量信号都大于30%额定风量信号,由它们三者中选大值去控制送风量。若由于某些原因,锅炉指令和风量信号都小于30%额定风量信号,则风量就受该定值控制,以免锅炉灭火。

(3) 引风控制系统。引风控制(炉膛压力控制)的任务是通过调节引风机入口挡板开度,与送风机配合,使炉膛压力保持在允许范围内,以保证燃烧的安全。由于引风调节对象动态响应快,测量也容易,所以引风控制系统一般只采取以炉膛负压作为被调量的单回