

600MW火电机组系列培训教材

第八分册



# 热工控制系统 及设备

中国大唐集团公司 | 组编  
长沙理工大学



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)



第八分册

# 热工控制系统及设备

中国大唐集团公司 组编  
长沙理工大学  
王鸿懿 主编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内容提要

为确保 600MW 火电机组的安全、稳定、经济运行,提高 600MW 火电机组的生产运行人员、检修人员和技术管理人员的技术素质和管理水平,适应员工岗位培训工作的需要,中国大唐集团公司和长沙理工大学组织编写了《600MW 火电机组系列培训教材》。

本书是《600MW 火电机组系列培训教材》中的第八分册。本书共九章,主要内容包括火电厂自动化概述、分散控制系统(DCS)、模拟量控制系统(MCS)、锅炉炉膛安全监控系统(FSSS)、顺序控制系统(SCS)、汽轮机数字电液控制系统(DEH)、汽轮机安全监视及保护系统(TSI&ETS)、辅助设备控制系统(BOP)、热工常见设备。

本套教材适用于 600MW 及其他大型火电机组的岗位培训和继续教育,也可供从事 600MW 及其他大型火电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员和管理人员阅读,并可供高等院校相关专业师生参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

热工控制系统及设备/中国大唐集团公司,长沙理工大学组编.  
北京:中国电力出版社,2009.12

(600MW 火电机组系列培训教材:8)

ISBN 978-7-5083-9585-2

I. 热… II. ①中…②长… III. ①火电厂-热力工程-自动控制系统-技术培训-教材②火电厂-热力工程-自动控制设备-技术培训-教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 191059 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

2009 年 12 月第一版 2009 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 28 印张 687 千字

印数 0001—5000 册 定价 58.00 元

### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
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

《600MW 火电机组系列培训教材》  
编 委 会

主 任 翟若愚

副 主 任 刘顺达 钟 俊 杨 庆 王 琳 蔡哲夫

邹嘉华 胡绳木 熊 皓 吴 静 金耀华

常 务 委 员 武洪举 高智溥 洪源渤

委 员 杨俊平 阮大伟 侯国力 雷 鸣 赵丕友

黄竹青 张 健 王彤音 张成虎

总 编 邹嘉华  
副 总 编 武洪举 杨俊平  
执行副总编 雷 鸣

编写工作组：

组 长 雷 鸣  
副 组 长 张成虎 陈 荐  
成 员 赵晓旻 刘 军 赵士杰 孙希瑾 戴曙光

近年来,为进一步深入贯彻落实实践科学发展观以及适应国家节能减排及环保的需求,大容量、高参数、高自动化的大型火力发电机组在我国日益普及。600MW火电机组因其具有大容量、高参数、低能耗、低污染、高可靠性等优点,现已成为我国火力发电厂的主力机型。为确保600MW火电机组的安全、可靠、经济及环保运行,600MW火电机组从业人员的岗位培训显得十分重要。

为适应这一形势发展的需要,中国大唐集团公司与长沙理工大学组织人员编写了《600MW火电机组系列培训教材》。本系列教材目前包括《单元机组集控运行》、《单元机组设备运行》、《辅控集控设备及运行》、《点检定修管理》、《汽轮机设备检修》、《电气设备检修》、《锅炉设备检修》、《热工控制系统及设备》共八册。今后还将根据电力技术发展情况,不断地充实完善。

本系列教材适用于具有大中专及以上文化程度的600MW及其他大型火电机组生产人员和技术管理人员的岗位培训和继续教育,也可供从事600MW及其他大型火电机组设计、安装、调试、运行、检修的工程技术人员和管理人员阅读,以及高等院校相关专业师生参考。

《热工控制系统及设备》是本系列培训教材中的第八分册。全书详细介绍了热工控制系统及设备,针对检修工作人员岗位培训和日常工作需要,通过九章的篇幅主要介绍了分散控制系统、模拟量控制系统、锅炉炉膛安全监控系统、顺序控制系统、汽轮机数字电液控制系统、汽轮机安全监视及保护系统、辅助设备控制系统、常见设备。书中出现参数均以某一设备为例,并不具有通用性。

本书由长沙理工大学王鸿懿主编。第一、二章由冯磊华编写,第三、六、七章由王鸿懿编写,第四、五、九章由陈前军编写,第八章由赵惠敏编写。

本书由欧艳清、刘玉成、吴克锋担任编审,他们对本书进行了认真的审阅,提出了很多宝贵的意见与建议,在此谨表诚挚的谢意。

本书在编写过程中得到了大唐湘潭发电有限责任公司、浙江大唐国际乌沙山发电有限责任公司、广东大唐国际潮州发电有限责任公司等单位的大力支持,并参阅了相关电厂、制造厂、设计院、安装单位和高等院校的技术资料、说明书、图纸等,在此一并表示感谢。

本系列教材由长沙理工大学陈冬林教授负责统稿。

由于编者水平所限和编写时间紧迫,疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。



前言	
第一章 火电厂自动化概述	1
第一节 火电机组热工自动化的内容及功能	1
第二节 火力发电机组及控制的发展历程	9
第三节 600MW 机组特点及典型启停过程	14
第二章 分散控制系统 (DCS)	18
第一节 概述	18
第二节 分散控制系统通信网络	22
第三节 分散控制系统人机接口	40
第四节 分散控制系统现场控制单元	62
第五节 分散控制系统电源及接地系统	85
第六节 分散控制系统抗干扰及可靠性分析	100
第三章 模拟量控制系统 (MCS)	111
第一节 概述	111
第二节 协调控制系统	112
第三节 锅炉燃烧控制系统	125
第四节 给水控制系统	141
第五节 汽温控制系统	149
第六节 启动控制系统	156
第四章 锅炉炉膛安全监控系统 (FSSS)	160
第一节 概述	160
第二节 锅炉吹扫及保护系统	166
第三节 燃油控制系统	182
第四节 制粉控制系统	189
第五节 FSSS 系统相关设备	198
第五章 顺序控制系统 (SCS)	214
第一节 概述	214

第二节	SCS 系统功能 .....	220
第三节	锅炉 SCS 逻辑说明 .....	223
第四节	汽轮机 SCS 逻辑说明 .....	230
第五节	电气 SCS 逻辑说明 .....	237
第六节	SCS 辅机联锁保护试验 .....	242
<b>第六章</b>	<b>汽轮机数字电液控制系统 (DEH) .....</b>	<b>266</b>
第一节	概述 .....	266
第二节	DEH 基本控制功能 .....	266
第三节	DEH 保护和限制功能 .....	280
第四节	DEH 辅助功能和自启停功能 .....	288
第五节	汽轮机调节及保安系统 .....	300
第六节	给水泵汽轮机电调控制系统 .....	313
<b>第七章</b>	<b>汽轮机安全监视及保护系统 (TSI &amp; ETS) .....</b>	<b>317</b>
第一节	概述 .....	317
第二节	汽轮机安全监视系统 .....	318
第三节	汽轮机危急遮断系统 .....	331
第四节	故障诊断系统 .....	333
<b>第八章</b>	<b>辅助设备控制系统 (BOP) .....</b>	<b>336</b>
第一节	概述 .....	336
第二节	可编程序控制器 .....	341
第三节	水网控制系统 .....	347
第四节	输煤控制系统 .....	358
第五节	除灰除渣控制系统 .....	371
第六节	脱硫脱硝系统 .....	379
第七节	其他辅控系统 .....	386
<b>第九章</b>	<b>热工常见设备 .....</b>	<b>394</b>
第一节	概述 .....	394
第二节	现场常用检测元件 .....	400
第三节	现场常用执行机构 .....	422
<b>参考文献</b>	.....	<b>437</b>



## 第一章

# 火电厂自动化概述

随着我国国民经济的高速发展,工农业生产和人民生活对电力的需求不断增长,电力工业通过引进、消化、吸收国外的先进技术和管理经验,得到了迅速的发展。随着单机发电容量的增大和电网容量的迅速扩大,我国已进入了大电网、大机组、高参数、高度自动化的时代。600MW及以上大容量、高参数机组的新技术发展迅速,装机数量日益增多,机组对热工自动化水平的要求越来越高。火电厂热工自动化的功能正和电网调度自动化相协调,以实现电网的自动化。

## 第一节 火电机组热工自动化的内容及功能

### 一、大型火力发电机组自动化内容

火电厂自动控制的任务所涉及的专业面相当广泛,除了对锅炉、汽轮机、发电机进行自动控制外,还要对各种辅助系统进行相应的控制。由于采用的主机及辅助设备不同,如汽包锅炉和直流锅炉,因此它们的控制方法也有较大的区别。又由于采用的控制设备不同,因而使自动化系统的结构更加复杂。但不管如何复杂的控制系统,它们的控制目的都是要保证电能生产过程的安全、经济、环保。为完成这一任务,要求大型火力发电机组具有自动检测、自动控制、顺序控制、自动保护的功能,这四部分即构成了自动化的内容。这些内容将有机地合成一个不可分割的整体,共同完成火力发电机组的自动控制任务。

#### (一) 自动检测

利用检测仪表自动地检查和测量反映生产过程运行情况的各种物理量、化学量,以及生产设备的工作状态,以监视生产过程的运行情况和趋势,称为自动检测。

锅炉、汽轮机装有大量的热工仪表,它们随时显示、记录、计算机组运行的各种参数,如温度、压力、流量、水位、转速等,以便进行必要的操作和控制,保障机组安全、经济运行。

大型机组一般采用巡回检测方式,对机组运行的各种参数和设备状态进行巡测、显示、报警、工况计算和制表打印。

#### (二) 自动控制

利用控制装置自动地维持生产过程在规定工况下进行,称为自动控制。自动控制的目的是为了表征生产过程的一些物理量,如温度、压力、流量等保持规定的数值。电力用户要求汽轮机发电设备在提供足量电力的情况下,能够保证供电质量。供电频率是供电质量的主要指标之一,为了使供电的频率维持在一定的准确度范围内,就要求汽轮机具备高性能的转速自动控制系统。锅炉运行中必须使一些重要的参数维持在规定范围内或按一定的规律变化,如维持汽包水位为给定值,以及保持锅炉的出力满足外界的要求。

锅炉的自动控制主要有给水自动控制、燃烧过程自动控制（包括燃料控制、送风控制、引风控制）、过热蒸汽温度和再热蒸汽温度自动控制等。大型机组的自动控制系统还应具有丰富的逻辑控制功能，以便根据机组的工作状况，决定机组的运行方式，并能实现全程控制和滑参数控制。

汽轮机自动控制系统以单回路为主，除了转速自动控制系统以外，一般还有汽封汽压、旁路系统、凝汽器水位等自动控制系统。

### 1. 自动控制常用术语

(1) 自动控制系统。自动控制系统是由起控制作用的自动控制装置和控制器控制的生产设备（被控对象），通过信号的传递、联系所构成的。简而言之，被控对象和控制器通过信号的传递相互联系，组成控制系统。

(2) 被控对象。控制的生产过程或工艺设备称为被控对象。

(3) 控制量。被控对象中需要加以控制的物理量叫控制量或控制参数。不能把对象中流入或流出的物质，如水、汽等介质，当作被控对象的控制量。

(4) 给定值。根据生产的要求，规定控制量应达到并保持的数值，称为控制量的给定值。

(5) 输入量。输入到控制系统中并对控制参数产生影响的信号（包括给定值和扰动）称为输入量。不可把控制设备使用的能源（如压缩空气、电源等）当作控制系统的输入量。

(6) 扰动。引起控制量变化的各种因素称为扰动。来自于系统内部的扰动称为内扰动，来自于系统外部的扰动称为外扰。阶跃变化的扰动称为阶跃扰动。

(7) 反馈。把输出量的全部或部分信号送到输入端输入称为反馈。反馈信号与输入信号极性相同时称为正反馈，极性相反时称为负反馈。

(8) 开环与闭环。输出量和输入量之间存在反馈回路的系统称为闭环系统，反之称为开环系统。

(9) 控制器。用于控制系统的控制装置称为控制器。

(10) 执行机构。接受控制器输出信号对被控对象施加作用的机构有机械、电动、液动、气动等几种类型。

### 2. 自动控制系统组成

现场自动控制系统大多采用反馈控制系统，即根据控制量偏离给定值的情况，通过自动控制装置按照一定的控制规律运算后输出控制指令，指挥控制机构动作，改变控制量，最后抵消扰动的影响，使控制量恢复到给定值。自动控制系统由以下几个单元构成：

(1) 测量变送器。其作用是测量控制量，并把测得信号转换成易于传送和运算的信号。

(2) 给定器。输入是控制量的目标值，产生与控制量信号同类型的定值信号。

(3) 控制器。输入是控制量与给定值，将两值比较并得到偏差值，经过一定的控制规律进行运算，输出信号给执行器。

(4) 执行器。根据控制器送来的指令去推动控制机构，改变控制量。

简单自动控制系统的组成如图 1-1 所示。

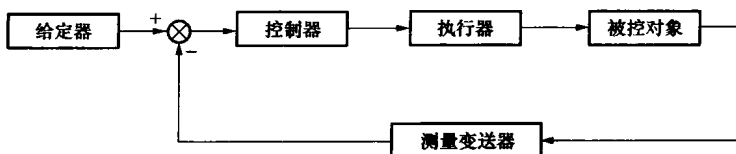


图 1-1 简单自动控制系统的组成

### 3. 自动控制系统的分类

(1) 按控制系统组成的内部结构分类。按控制系统组成的内部结构不同,可分为开环控制系统、闭环控制系统和复合控制系统。

开环控制系统是指控制器与被控对象之间只有正向作用,而无反馈现象,控制器只是根据直接或间接反映扰动输入的信号来进行控制,如图 1-2 所示。在这个系统中,控制器接受了对象输入端的扰动信号  $X$ ,一旦有扰动发生,控制器可按照预定的控制规律对被控对象产生一个控制作用  $u$ ,

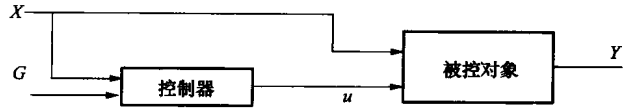


图 1-2 开环控制系统框图

以抵消扰动  $X$  对控制量  $Y$  的影响。这种控制方式也称为“前馈控制”。从理论上讲,只要对扰动进行的控制量合适,就可能及时抵消扰动的影响,而使控制量不变。但由于没有控制量的反馈,因此控制过程结束后,不能保证控制量等于给定值。在生产过程自动控制中,前馈控制是不能单独使用的,但用扰动补偿的方法来控制系统量的变化是十分有效、可取的。

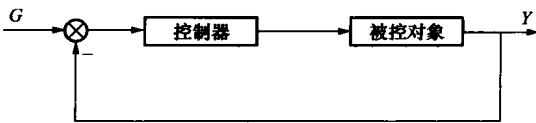


图 1-3 闭环控制系统框图

闭环控制系统的控制目的是尽可能减少控制量与规定值之间的偏差,因此,它根据控制量与其规定值的偏差进行不断反馈、控制,最终消除偏差。闭环控制系统是自动控制中最基本的控制系统,但对于延迟较大的对象,控制过程中会出现数值较大、持续时间较长的控制量偏差。

在反馈控制的基础上,加入对主要扰动的前馈控制,构成复合控制系统,也称前馈—反馈控制系统,如图 1-4 所示。所谓复合控制,实质上是在闭环系统的基础上用开环通道提供一个时间上超前的输入作用,以提高系统的控制精度和动态性能。在外界扰动  $X$  作用的控制量  $Y$  还没有反应之前,先由前馈补偿装置进行粗调,尽快使控制作用  $m_1$  在一开始就能大致抵消  $X$  的影响,使控制量  $Y$  不至于发生大的变化。如果  $m_1$  的补偿作用不是恰到好处,则通过闭环回路来进行控制。因此,这类控制对于扰动作用  $X$  来说,能获得比一般闭环控制更好的控制效果。

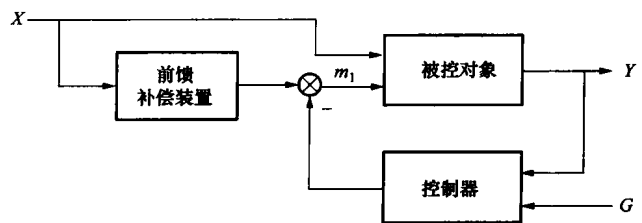


图 1-4 复合控制系统框图

(2) 按给定值变化规律分类。按给定值变化的规律来分,可分为定值控制系统、程序控制系统和随动控制系统。

定值控制系统的规定值在运行中恒定不变,从而使控制量保持恒定。例如,锅炉的汽压、汽温、水位等控制系统都是给定值控制系统。

程序控制系统的规定值是时间的已知函数。控制系统用来保证控制量按预先确定的随时间变化的数值来改变。例如火电厂锅炉、汽轮机的自启停都是程序控制系统。

随动控制系统的规定值是时间的未知函数,只是按事先不确定的一些随机因素来改变的。例如,在滑压运行的锅炉负荷控制回路中,主蒸汽压力的规定值是随外界负荷而变化的,其变化的规律是时间的未知函数。此控制回路的任务是使主蒸汽压力紧随主压力给定值而变,从而实现机组在不同负荷下以不同的主蒸汽压力进行滑压运行。随动控制系统在大型单元机组的自动控制中应用很广。

另外,还有几种分类方法,如:按控制系统闭环回路的数目分,有单回路和多回路控制系统;按系统变化特性来分,有线性和非线性控制系统。在各类控制系统中,热工生产过程中应用最广泛、最基本的是线性、闭环、恒值控制系统。

### (三) 顺序控制

根据生产工艺要求预先拟定的程序,使工艺系统中各个被控对象按时间、条件或顺序有条不紊地、有步骤地进行一系列的操作,称为顺序控制。

顺序控制主要用于机组启停、运行和事故处理。每项顺序控制的内容和步骤,是根据生产设备的具体情况和运行要求决定的,而顺序控制的流程则是根据操作次序和条件编制出来,并用具体装置来实现的,这种装置称为顺序控制装置。顺序控制装置必须具备必要的逻辑判断能力和联锁保护功能。在进行每一步操作后,必须判明该步操作已实现,并为下一步操作创造好条件,方可自动进入下一步操作;否则中断顺序,同时进行报警。

锅炉上应用的顺序控制主要有锅炉点火,锅炉吹灰,送、引风机的启停,水处理设备的运行,制粉系统的启停等。汽轮机的顺序控制主要是汽轮机的自启动和停机。

采用顺序控制可以大大提高机组自动化水平,简化操作步骤;避免误操作,减轻劳动强度;加快机组启停速度。随着高参数、大容量机组的大量应用,我国应用顺序控制装置的水平正逐步提高。

### (四) 自动保护

当设备运行情况异常或参数超过允许值时,及时发出报警并进行必要的动作,以免发生危及设备和人身安全的事故,自动化装置的这种功能称为自动保护。

随着机组容量的增大,生产系统及操作控制更加复杂,对自动保护的要求也越来越高。锅炉的自动保护主要有灭火自动保护,汽包高低水位自动保护,超温、超压自动保护,辅机启停及其事故状态的联锁保护。汽轮机自动保护主要有超速保护、润滑油压低保护、轴向位移保护、胀差保护、低真空保护、振动保护等。

上述火力发电厂生产过程自动化四个方面的主要内容只是人为的划分,其实它们在火力发电厂中是紧密联系的,共同维护机组的安全、经济运行。特别是随着单元机组参数的提高、容量的增大,计算机技术的广泛应用,大型单元机组均把锅炉、汽轮机、发电机作为一个不可分割的整体集中控制,火力发电厂生产过程自动化四个方面的主要内容之间的联系也更加紧密,有利于实现火电厂生产过程综合自动化。

## 二、大型火力发电机组的自动化功能

300MW 以上的大型火力发电机组具有大容量、高参数的特点,因此要有相应的现代自动化功能与之相适应。这些新的自动化功能主要包括计算机数据采集与处理系统(DAS)、模拟量控制系统(MCS)和单元机组协调控制系统(CCS)、汽轮机数字电液控制系统(DEH)、锅炉炉膛安全监控系统(FSSS)或燃烧器管理系统(BMS)、旁路控制系统(BPC)、顺序控制系统(SCS)、电气监控系统(ECS)和辅机控制系统(BOP)等。

### 1. 数据采集与处理系统

随着火力发电机组单机容量的增大，其热力系统变得更加复杂，在运行过程中必须监视信息量和操作指令量成倍增加。采用常规仪表是很难胜任对它的监控任务的，一般由微型计算机来完成。在微型计算机的指令下，输入通道从生产过程采集过程变量（模拟量、开关量信号等），并对采集的信号数据进行初步的数据处理（滤波、隔离、A/D 转换、标度变换、线性化处理等），称为预处理。必要时还要对测量值进行精确度补偿计算（如汽包水位的压力、温度补偿，蒸汽流量的压力、温度补偿，给水流量、空气流量的温度补偿，热电偶的冷端补偿及线性化等），最后通过显示器、打印机和硬拷贝机等设备实现显示。同时，建立实时的分布式数据库供运行人员随时调用所需的信息。操作员站还将实时输出报警信息，并给出操作指导，最大限度地满足操作人员的需要。

DAS 一般通过组态可实现显示、操作、记录和管理等功能。它是一个开环的系统，不直接参与对生产过程的控制。

### 2. 模拟量控制系统和单元机组协调控制系统

模拟量控制是在机组正常运行的工况下，对机组运行参数进行自动、连续地调节，使之维持在规定的范围内，或按一定的规律变化，以控制机组的运行工况。600MW 机组的模拟量控制系统（MCS）的控制项目包括给水自动控制、燃烧自动控制（包括燃料调节、送风调节和引风调节）、过热器和再热器蒸汽温度调节、汽轮机转速自动控制等。

常规的自动控制系统对锅炉和汽轮机是分别进行控制的，一般汽轮机调节机组的转速和负荷，锅炉调节主蒸汽压力。从控制角度来观察锅炉和汽轮机，锅炉是一个时间常数较大、变化较慢的对象，而汽轮机是一个时间常数较小、变化较快的对象。随着单元机组容量、电网容量的不断增大，以及对电网调频调峰要求的提高，常规控制系统很难满足火电单元机组既要快速响应负荷变化，又要稳定运行参数的要求。机组负荷的变化必然反映到机前主蒸汽压力的变化，所以必须将锅炉和汽轮机视为一个统一的控制对象进行协调控制。协调控制是指通过回路协调控制锅炉和汽轮机的工作状态，同时给锅炉和汽轮机控制系统发出指令，以达到快速响应负荷变化的要求，以及稳定运行参数的目的。

协调控制系统包括机、炉主控制系统，锅炉的各个自动控制子系统，汽轮机控制系统。机、炉主控制系统是单元机组协调控制系统（CCS）的核心，由负荷管理控制中心（LMCC）和机炉主控制器组成，锅炉各子系统和汽轮机控制系统是 CCS 的执行级。机炉协调控制系统简化框图如图 1-5 所示。

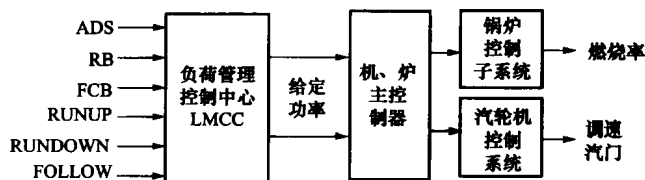


图 1-5 机炉协调控制系统简化框图

负荷管理控制中心的主要任务是确定运行方式，接受和处理负荷指令。CCS 可以无扰地在几种运行方式之间进行切换，以适应机炉不同的工作状态（局部故障、定压运行或滑压运行等），并具有完善的联锁保护，使机组在不超过规定的负荷范围内运行，控制升降负荷速率。

### 3. 汽轮机数字电液控制系统

汽轮机数字电液控制系统（DEH）具有多种功能，能满足大型机组在各种工况下的要求。

DEH 能完成下列任务:

(1) 自动检测。完善、可靠、精确的自动检测系统是保证汽轮机安全经济运行的必要条件。高参数、大容量的汽轮机需要检测的参数很多,如汽轮机转速、发电机功率、调节级压力和温度等。特别是汽轮机启停和负荷变化过程中,汽轮机缸体很容易产生较大的温度差和热变形,从而产生较大的热应力,必须进行严密监视,以防越限。

(2) 自动保护。当锅炉主、辅机或电力系统出现故障后,一方面能及时发出报警信息,提醒运行人员采取相应的紧急措施,另一方面能遮断汽轮发电机组,保证机组及运行人员的安全,避免事故进一步扩大。大机组汽轮机保护的项目主要有超速保护、低油压保护、低真空保护、轴向位移保护、差胀保护和振动保护等。

(3) 自动启停。机组启停时间长,不仅经济损失大,操作员的劳动强度也大,因此必须实现汽轮机自动启停控制(ATC)。目前,大功率机组多采用机组寿命管理法,根据转子热应力的大小,来确定升/降速的速率。由计算机实现汽轮机自动启停,根据机组运行的进程选择控制策略,既可保证汽轮机安全启停,又可保证汽轮机启停时间最短,减少启动过程的能量损耗,实现最优化启停。

(4) 自动调节。汽轮机的自动控制系统在保证机组安全运行的前提下,还必须维护其经济运行,即在额定的功率和转速下工作,提供足够数量的电能,并保证供电质量。所以,控制系统除应具有良好的静态和动态特性外,还应提供灵活多样的控制方式。具体表现为 DEH 除受控于操作员外,还应能接受 CCS 来的协调信号和电网自动调度系统来的远方遥控命令,参与电网调频与调峰。

#### 4. 汽轮机保护系统

随着汽轮发电机组容量不断增大,蒸汽参数越来越高,热力系统越来越复杂。为提高机组的经济性,汽轮机的动静间隙、轴封间隙都选择得较小。而汽轮机的旋转速度很高,在机组启动、运行或停机过程中,因操作不当或某些相关设备故障,很容易使汽轮机的转动部件和静止部件发生摩擦,引起叶片损坏、大轴弯曲、推力瓦烧毁等恶性事故。为保证机组安全启停和正常运行,需对汽轮机的轴向位移、转速、振动等机械参数,以及轴承温度、油压、真空、主汽温等热工参数进行监视和异常保护。当被监视的参数超过报警值时,发出报警信号;超过极限值时,保护装置动作,关闭主汽门,实行紧急停机。其目的是不扩大事故范围,把损失降至最低,保护主设备。实现这一功能的控制系统称为汽轮机保护系统,也称为危机遮断系统(Emergency Trip System, ETS)。

#### 5. 锅炉炉膛安全监控系统

锅炉炉膛安全监控系统(FSSS)是大型火电机组自动保护和自动控制系统的-一个重要组成部分。其主要功能是保护锅炉炉膛,避免发生爆炸事故,对油、煤燃烧器进行遥控或程控管理,故也称为锅炉燃烧器管理系统(BMS)。它是一种将锅炉的燃烧控制系统与安全保护系统融为一体的数字式逻辑控制系统。它既向运行人员提供整个燃烧系统的操作手段,又可在锅炉运动的各个阶段对其进行连续的监视、报警和保护。

FSSS 在功能上分为燃烧器控制系统和锅炉安全系统两部分。燃烧器控制系统为进行连续的检测和程序控制,提供远方操作手段,并为 CCS、厂级计算机和全厂报警系统提供燃烧系统的状态信号。锅炉炉膛安全系统在锅炉运行包括启停过程的各个阶段中,预防在锅炉内形成可爆燃的燃料和空气混合物。当发生对设备与人身有危险的故障时,实施主燃料跳闸(MFT)

操作,并提供“首次跳闸原因”的报警信息。闭锁由此跳闸条件引起的其他跳闸条件指示。在MFT之后,仍需维持炉内通风,进行吹扫,以除炉膛及锅炉尾部烟道中的可燃物。在吹扫结束之前,有关允许条件未满足的情况下,不允许再送燃料至炉膛,如果违反安全程序启动设备,设备将自动停止启动。

## 6. 旁路控制系统

汽轮机旁路系统一般分为高压旁路(高旁)和低压旁路(低旁)两级。高压旁路为过热器出口蒸汽经减温减压后到再热器进口;低压旁路为再热器出口蒸汽经减温减压后去凝汽器。为了配合锅炉和汽轮机的特定运行规律,旁路控制系统一般具有以下功能:

(1) 锅炉启动过程中的汽温、汽压控制,避免再热器干烧。

(2) 在锅炉汽压过高时,减少对空排汽,避免锅炉超压,并回收汽、水。

(3) 配合汽轮机实现中压缸启动和带负荷,以减少转子在启动过程中的热应力。

(4) 在发电机甩负荷时,维持汽轮机空载运行或带厂用电运行,以便外界故障消除后能及时并网带负荷。

旁路控制系统(BPC)的任务就是在旁路系统中实现上述功能时,自动地控制主蒸汽压力、高压旁路出口蒸汽及低压旁路出口蒸汽的压力和温度。在正常情况下,它将按固定值或可变值调节旁路系统蒸汽的压力和温度;在异常情况下,它将起保护作用,快速开启旁路阀门,维持入口压力,保证旁路阀后的蒸汽温度和压力在安全范围内。

汽轮机高压旁路控制的目的是要用滑参数运行的方法,将锅炉和汽轮机从停运状态(冷态、温态和热态)中快速启动起来。当电网发生事故时,为了事故后能迅速恢复供电,要求机组维持厂用电。在此情况下,汽轮机旁路允许锅炉缓慢降到技术上要求的最小负荷,避免机炉温度的突然下降。当汽轮机跳闸时,应维持锅炉不灭火,控制系统快速开启高、低压旁路,使蒸汽流过过热器和再热器受热面,使汽轮机能随时启动。

汽轮机高压旁路具有抑制锅炉出口蒸汽压力超压的功能。在运行中,包括高压旁路已关闭的工况,如果出现锅炉蒸汽压力超过给定值,则控制系统将通过安全回路快速打开高压旁路阀,并联锁开启低压旁路阀,保证蒸汽压力不超过给定值。在机组甩负荷时,维持机组带厂用电运行,使机组具备快速再带负荷的能力。

低压旁路再热蒸汽压力控制回路的压力给定值与汽轮机负荷相适应,它应正比于汽轮机负荷,并补偿汽轮机内蒸汽自然膨胀的压力值。另外,低压旁路的控制需经凝汽器和减温器的保护限制。限制的目的是要减小旁路阀开度,从而保证凝汽器的安全运行。如凝汽器压力增加时,低压旁路阀开度应减小,以避免凝汽器真空被破坏。当再热蒸汽压力达到一定值时,旁路阀开度应随压力增加而逐渐减小,以避免旁路流量过大,超过额定值。

## 7. 顺序控制系统

顺序控制系统(SCS)是机组自启停控制的重要组成部分。SCS可对送/引风机、给水泵、盘车装置等电厂辅机进行开/关、启/停或程序控制,可对电厂中大量的阀门和挡板进行遥控(顺序控制),并具有联锁保护功能。它涉及面很广,有大量的输入、输出信号和逻辑判断功能。SCS具有下列控制形式:

(1) 驱动控制。SCS可在过程接口级提供对所有驱动装置和执行机构的控制。输入到驱动控制接口的指令和设备保护逻辑信号,经指令逻辑处理后,转换成与执行机构输入电路相





适应的执行信号，在此过程中，SCS 担负指令处理和监视驱动装置的功能。驱动控制接口指令可以是手动指令，也可以是控制室来的自动指令或保护指令信号。指令优先级应满足手动指令优先于自动指令，而保护逻辑信号具有最高优先权。

(2) 元件控制。元件控制是一对一的操作，即一个启/停操作对应一个驱动装置。SCS 可完成单个特定驱动装置（阀门或挡板）的顺序控制。

(3) 子组控制。子组控制（设备控制）是一种以一个设备为主，将其辅助设备和相关设备包括在内，作为一个整体来控制的形式，如一台风机及其油泵，进、出口挡板等可作为一个子组，由 SCS 按实际运行条件依次自动地操作。

(4) 功能组控制。电厂按工艺系统的特点，将机组的辅助设备和系统划分为多个执行某一特定功能的组，功能组控制就是对这个特定的组进行自动顺序控制。功能组控制可包含较多的元件控制和子组控制。控制程序可以在集控室内由人工启动，或由机组自启停控制系统的自动指令启动。

另外，在 SCS 中还包含辅机设备的保护和闭锁功能，以预防故障事件的发生和扩大。闭锁的主要作用是防止或减少控制作用产生不安全的工况，即防止执行不正确的程序或操作。保护是当危及人身安全或设备安全的异常情况出现时，自动切除设备或自动投入设备。保护信号具有最高的优先权，保护指令将一直保持到设备完全停止或断开，或者得到应答为止。所有保护功能的执行不取决于其他任何控制系统。

## 8. 电气监控系统

电气监控系统（ECS）的单元机组部分和公用部分实现多数电气开关量的控制功能，并实时显示各开关的分、合状态和设备状态、报警、电流、电压、功率等模拟量。

ECS 具有控制对象相对较少，控制频度低，要求自动保护装置可靠性高，动作速度快，电气系统的联锁逻辑较简单，但电气设备的操动机构复杂的特点。因此，要求控制装置具有很高的可靠性，除了能实现设备正常启停和运行操作外，尤其要能实现实时显示异常运行和事故状态下的各种数据和状态，并提供相应的操作指导和应急处理措施，保证电气系统在最安全、合理的工况下运行。

ECS 主要的监控对象包括发电机—变压器组、发电机励磁系统、机组程序启停系统和厂用电源系统，还对 UPS 系统、厂用 220V 和 110V 直流电源、柴油发电机组等进行监视。

大机组的上述七种功能均在 DCS 上得以实现。DCS 具有很好的综合功能，既能实现监视功能（DAS），又能实现控制功能（MCS、SCS、DEH、FSSS、BPC 和 ECS 等）。其监视和控制功能之间可通过通信网络进行数据通信，实现信息共享；还可以通过接口与全厂管理计算机联网，实现整个厂级范围的协调控制。

## 9. 辅助控制系统

600MW 机组的全厂辅助生产系统（如化学补给水、净水、煤水处理、化学加药、废水、煤、灰和燃油泵房等）一般均采用程序控制，以及辅助系统集中监控方式。将辅助系统各监控系统进行联网。水、灰、脱硫、输煤和燃油泵房联网组成辅助生产系统控制网，水系统、灰系统、脱硫系统联网后在机组集控室控制，输煤和燃油泵房联网后最终可在机组集控室监视，脱硫系统的控制系统采用分散控制系统（DCS），其监控点也设在机组集控室，输煤系统和燃油泵房在输煤控制楼集中控制。

## 第二节 火力发电机组及控制的发展历程

### 一、火力发电机组发展现状

#### 1. 国外火电机组发展现状

近年来,随着科技的进步,世界各主要发电设备制造厂商采取了提高蒸汽参数,改进汽轮机通流气动性能,降低漏汽损失,采用新叶型和末级长叶片,改进给水再热系统,提高最终锅炉给水温度,降低锅炉排烟温度,降低凝汽器压力,减少电站辅机耗功,减少厂用电等措施,使超临界火电机组的净效率有很大的提高。

下面以 GEC-ALSTHOM 公司研制的供丹麦 NORDJYLLANDSVARKET 电站的汽轮机为例来说明具有世界先进水平超临界汽轮机的改进情况。该电站在选方案时,曾考虑采用蒸汽初压为 30MPa,后选用蒸汽初压为 28.5MPa,与 30MPa 相比,效率下降 0.2%。该电站在燃煤时,电站的功率为 410MW,电站净效率为 47%。汽轮机设计中采取了以下具体措施:改进低压缸超音速叶型,提高低压缸效率 2.7%;采用复合倾斜式叶型,提高透平级效率 0.4%;高压缸中采用可控涡叶型,它与径向叶型相比,提高高压缸效率 1.2%,提高中压缸效率 0.8%;采用可调间隙的汽封结构,可提高高压缸级效率 0.2%;采用新的长叶片,增大出口环形面积,使出口流速由 290m/s 降到 210m/s,出口马赫数由 0.76 降到 0.55,排汽损失由 42kJ/kg 降到 22kJ/kg,使汽轮机效率提高 0.8%;采用单流中压缸,降低进口前几级的端部漏汽损失,提高中压缸效率 2%。NORDJYLLANDSVARKET 3 号火电机组与丹麦的 ESEJERG 3 号火电机组相比,丹麦的 ESEJERG 3 号机组的功率为 400MW,蒸汽参数为 24.1MPa/558℃/560℃,锅炉给水温度为 275℃,凝汽器压力为 2.3kPa,锅炉排烟温度为 104℃,厂用电率为 5.7%,电厂净效率为 45.3%。NORDJYLLANDSVARKET 3 号机组采用二次再热,给水温度由 275℃升高到 300℃,给水泵功率下降 6%,就可提高电站效率 2%;新汽压力由 25MPa 升高到 28.5MPa 可提高电站效率 0.8%;新汽温度由 560℃升高到 580℃可提高效率 1%;凝汽器压力由 2.3kPa 降到 2.1kPa,可提高电站效率 0.3%;改进锅炉、减少厂用电可提高电站效率 0.5%。综上所述,可提高电站效率 4.6%。另外,在有烟气处理条件下,电厂的净效率可达 47.5%。

近年来,ABB 公司也设计制造了具有当代世界先进水平的汽轮机。据 ABB 公司的设计,蒸汽参数由 26MPa/545℃/560℃提高到 27.5MPa/580℃/580℃,可提高相对效率 0.7%;凝汽器压力由 4.6kPa 降到 3.7kPa,可提高相对效率 0.7%;蒸汽初压每提高 1MPa,可改善汽轮机相对效率 0.2%;蒸汽初温和再热蒸汽温度每提高 10℃,可改善汽轮机相对效率 0.5%;每提高锅炉给水温度 10℃就可改善汽轮机相对效率 0.6%;在给水加热系统中,高压加热器数量由 2 台增加到 3 台,可改善汽轮机相对效率 0.15%;低压加热器数量由 4 台增加到 5 台,可改善汽轮机相对效率 0.1%;另外,ABB 公司也改进了汽轮机的气动设计。由此,ABB 公司的汽轮机构成的火电站的净效率也已达到 45%左右。例如,丹麦的 ESEJERG 电站的效率为 45.3%,3 号火电机组锅炉的净效率为 92.95%,汽轮机的净效率为 49.6%。

据美国能源开发研究所资料称,电站的毛功率为 360MW,背压为 8.5kPa,蒸汽参数为 31MPa/593℃/593℃/593℃的燃煤电站,比蒸汽参数为 16.55MPa/538℃/538℃的燃煤电站的相对纯热耗低 13.8%,该电站的净效率约为 43.9%。

另外,美国 GE 公司在日本东芝公司参与下,已设计和正在制造供日本 TACHIBANA WAN