

大型火电机组控制技术丛书

数字电液调节与旁路控制系统

降爱琴 郝秀芳 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

大型火电机组控制技术丛书

数字电液调节与旁路控制系统

降爱琴 郝秀芳 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书详细介绍了汽轮机数字电液调节系统、旁路控制系统的组成及工作原理,并结合INFI—90组态逻辑分析了转速调节系统、负荷调节系统、阀门控制与管理、超速保护、自启停功能等内容;还介绍了基于西门子TX—P、西屋 Ovation 的电液调节系统的组态逻辑及主要功能。介绍了旁路控制系统的工作方式、旁路调节系统的组成及工作原理和旁路系统的连锁逻辑。

本书可作为高等院校自动化、热动、集控等专业的相关课程的教材,也可供从事火电机组运行、调试、仪控的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字电液调节与旁路控制系统/降爱琴,郝秀芳编著.
北京:中国电力出版社,2005

(大型火电机组控制技术丛书)

ISBN 7-5083-3448-5

I. 数... II. ①降...②郝... III. ①火电厂—蒸汽透平—液压调节系统—高等学校—教材②火电厂—蒸汽透平—控制系统—高等学校—教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 074723 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>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 13.75 印张 334 千字 1 插页

印数 0001—3000 册 定价 22.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

《大型火电机组控制技术丛书》

(编委会)

顾问 李子连 金以慧 刘吉臻 熊淑燕

林金栋

主编 张丽香 石 生

编委 (以姓氏笔划排序)

王 琦 印 江 冯江涛 白建云

杨晋萍 张丽香 降爱琴 郝秀芳

前言

随着现代工业生产的迅猛发展和人民生活质量的日益提高,要求供电质量日益增加,电网负荷的峰谷差明显加大,用电结构也发生了很大变化。为了适应机组调频和调峰的需要,要求大型火力发电机组均能实现自动发电控制(AGC)。

随着工程技术人员对分散控制系统(DCS)应用于火力发电厂生产过程控制策略研究与实践的不断深入和DCS软/硬件系统的不断升级换代,使火电生产过程的数据采集系统、模拟量控制系统、程序控制系统、机炉安全监测保护系统、汽轮机电液调节与旁路控制系统以及部分电气系统逻辑控制等都由DCS组态实现,使锅炉、汽轮发电机组的主要设备和系统均处于DCS的统一监控管理之下。同时,还可以借助DCS这一控制平台,将先进控制理论和智能决策方法应用到火电生产过程控制系统中,解决常规控制方案无法应对的现场控制难题。

为了提高火电机组运行的自动化水平,我们结合国内、外机组控制系统的特点和近年来对大时滞、非线性、时变及强耦合生产过程控制策略研究与现场实践的成功经验编著了这套《大型火力发电机组控制技术丛书》。该丛书共有5个分册:《火电厂分散控制系统》、《模拟量控制系统》、《程序控制系统》、《电液调节与旁路控制系统》和《安全监测保护系统》。主要读者对象为从事自动控制、热工过程自动化、热能动力、集控运行、计算机等专业的科学研究与工程技术人员和大学高年级学生。

组编和出版这套丛书是一次尝试。我们热忱欢迎选用本套丛书的科学研究工作者、现场技术人员、大专院校老师和学生提出批评和建议。

《大型火力发电机组控制技术丛书》编委会

2005年6月

数字电液调节与旁路控制系统

编者的话

汽轮机的调节和保护是机组安全经济运行的重要技术环节,随着计算机的广泛应用,目前大型火电机组普遍采用了数字电液调节系统(DEH),以往采用液压调节系统的小机组也逐渐改造为采用电液调节或电液调节为主、液压调节为备用的调节系统。由于汽轮机数字电液调节系统(DEH)近年来大量投运,而与之相关的资料比较少,为此,我们编著本书,希望能满足教学和从事一线工作的工程技术人员需要。

本书从DEH的实际功能出发,以DEH的组态逻辑为主线,系统地分析了DEH的基本原理、功能组成、工作方式及具体功能实现方法,最后还介绍了与汽轮机控制密切相关的旁路控制系统(BPS),以期使读者对汽轮机控制系统有完整的认识。

全书共有十一章:第一章概述,介绍汽轮机控制的发展历史和内容;第二章介绍汽轮机电液调节系统的组成及功能;第三章介绍DEH的液压控制系统;第四章介绍DEH转速调节系统;第五章介绍DEH负荷调节系统;第六章介绍阀门控制与管理;第七章介绍汽轮机保护系统;第八章介绍自启动功能;第九章介绍操作员站功能;第十章介绍其他汽轮机电液调节系统;第十一章介绍旁路控制系统。

本书由山西大学工程学院降爱琴、郝秀芳编著,山西大学工程学院林金栋教授对原稿进行了仔细的审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,山西大学工程学院陈凤兰老师参与了本书的编写工作,在此对他们的工作表示衷心的感谢。编写过程中作者还参考了一些文献资料,在此也向有关作者表示感谢。

热工自动控制技术不断发展,日新月异,加之作者水平有限,书中不妥之处难免存在,恳请专家和读者批评指正。

编 者

2005年9月

目 录

前言

编者的话

第一章 汽轮机数字电液控制系统概述	1
第一节 汽轮机控制系统的发展	1
第二节 汽轮机控制系统的内容	3
第二章 汽轮机电液调节系统的组成及功能	19
第一节 汽轮机本体简介	19
第二节 DEH 系统组成	22
第三节 DEH 系统的功能	27
第三章 液压控制系统	30
第一节 高压抗燃油供油系统	30
第二节 液压执行机构	33
第三节 危急遮断系统	36
第四章 DEH 转速调节系统	42
第一节 DEH 自动调节系统总貌	42
第二节 转速调节系统	55
第五章 DEH 负荷调节系统	70
第一节 负荷目标值及负荷设定值的形成原理	70
第二节 归一设定值 (SETPPOINT%) 的形成原理	73
第三节 负荷控制系统分析	78
第四节 控制方式逻辑	85
第五节 启动状态及暖机逻辑	88
第六节 启动方式及运行逻辑	92

第六章 阀门控制与管理 ⇨	95
第一节 阀门位置控制	95
第二节 阀门试验	108
第三节 液压伺服卡 HSS03 介绍	113
第七章 汽轮机保护系统 ⇨	116
第一节 汽轮机挂闸与跳闸逻辑	116
第二节 超速保护及负荷不平衡功能	120
第三节 试验逻辑	121
第八章 ATR—自启动功能 ⇨	126
第一节 参数检测功能	126
第二节 应力计算	129
第三节 控制程序	130
第九章 硬操作盘 HOP 和操作员站 OIS ⇨	137
第一节 DEH 硬操作盘 HOP 功能及操作说明	137
第二节 操作员接口站 OIS 画面操作	147
第十章 其他汽轮机电液调节系统简介 ⇨	153
第一节 Ovation 组态的 DEH 系统	153
第二节 西门子 T-XP DEH 系统	173
第十一章 旁路控制系统 ⇨	182
第一节 旁路系统概述	182
第二节 高压旁路控制系统	194
第三节 低压旁路控制系统	201
第四节 基于 OVATION 的旁路控制系统	206
参考文献	212

汽轮机数字电液控制系统概述

第一节 汽轮机控制系统的发展

汽轮机是电厂中的重要设备,在高温高压蒸汽的作用下高速旋转,完成热能到机械能的转换。汽轮机驱动发电机转动,将机械能转换为电能,电力网将电能输送到各个用户。为了保证供电质量,就必须保证电力系统的电压、频率稳定;同时在电网出现故障时,又要能保证机组自身的安全。电压的调节另有专门设备承担,不属于汽轮机调节系统的范围,而频率则直接取决于汽轮发电机的转速,一般要求汽轮发电机的转速稳定在额定转速附近很小的一个范围内,通常此范围为 $\pm (1.5 \sim 3.0) \text{ r/min}$ 。为了达到此要求,汽轮机必须配备可靠的自动控制装置。汽轮机控制系统的发展经历了以下几个阶段。

一、机械液压调节系统

以一套机械液压机构实现转速的自动调节和负荷的手动调节的系统称为机械液压调节系统(MECHANICAL-HYDRAULIC CONTROL,简称MHC)。MHC仅具有转速调节和超速保护功能,其转速-功率静态特性是固定的,运行中不能加以调节。汽轮机的调节系统按其调节阀动作时所需能量的供应来源可分为直接调节系统和间接调节系统两类。

1. 直接调节系统

图1-1是一个直接调节系统示意,其调节阀动作所需的能量直接由调速器供给。

当外界负荷增加时,汽轮机转速下降,经减速器齿轮1的传动,调速器2的转速也下降,调速器飞锤离心力减小,在弹簧力的作用下使滑环3下移,通过杠杆4开大调节阀5,增加汽轮机的进汽量,于是汽轮机的功率增加。当功率增加至与外界电负荷相平衡时,调节系统重新稳定。当外界负荷减小时,动作过程与上述相反。由于调速器的能量有限,使得直接调节系统的应用范围只限于小功率汽轮机。功率稍大一些的汽轮机,由于移动阀门需要较大的力,所以一般都将调速器的输出位移在能量上加以放大,这种系统称为间接系统。

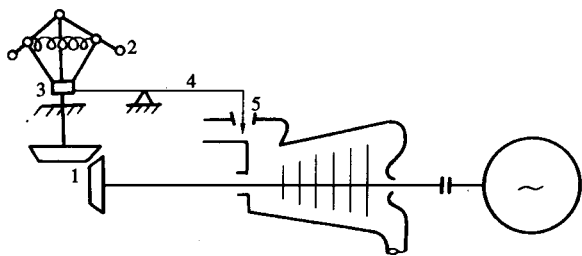


图 1-1 直接调节系统示意

1—减速器齿轮；2—调速器；3—滑环；4—杠杆；5—调节阀

2. 间接调节系统

图1-2是一种简单的间接调节系统示意。系统中调速器A所带的不是调节阀,而是一个断流式滑阀,又称错油门。从图中可看出,一个间接调节系统由以下几部分组成。

(1) 转速感应机构。它能感应转速的变化并将其转变为其他物理量的变化(滑环位移)。

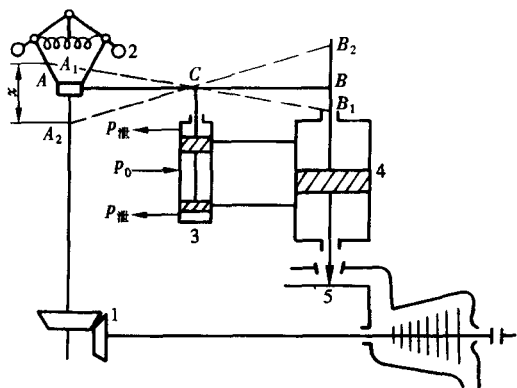


图 1-2 间接调节系统示意

1—减速齿轮；2—调速器；3—错油门；4—油动机；5—调节阀

当外界负荷增加时，汽轮机的转速降低，调速器飞锤的离心力减小，滑环下移，杠杆 AB 以 B 为支点，带动错油门 3 下移，打开错油门上的上下两个油口。压力油进入活塞下部油室，活塞上部油室的油经错油门上油口排走，油动机活塞在上下油压差的作用下移至 B_2 位置，调节阀 5 开大，进汽量增加，汽轮机的功率增加。在油动机活塞上移的同时，杠杆 AB 以 A_2 为支点，带动错油门 3 上移，使其回到中间位置，关闭错油门的上下油口，油动机活塞停止移动，汽轮机的功率与外界负荷相平衡，调节系统处于新的稳定状态。当外界负荷减小时，动作过程与上述相反。

机械液压调节系统原理如图 1-3 所示。

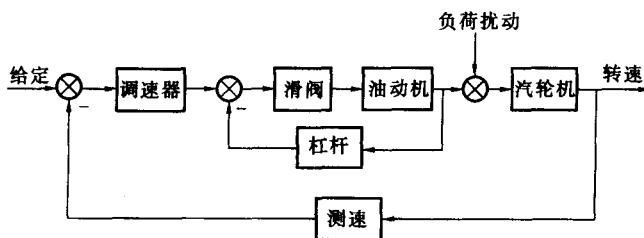


图 1-3 机械液压调节系统方框图

可见，汽轮机液压调节系统以转速的偏差作为唯一的调节信号，调节过程中一个转速的变化对应一个负荷的变化，不能实现无差调节。对于大容量机组，由于动态飞升时间常数减小，动态特性变差，所以对调节系统静态特性和动态特性提出了更高的要求。另外，随着电厂自动化水平的提高，必然采用集中控制、机炉协调的运行方式，而液压调节系统是不能满足要求的。

二、电液调节系统

随着汽轮机单机容量的增大和中间再热机组的出现，单元制运行方式的普遍采用以及电网自动化水平的提高，MHC 已不能适应汽轮机的控制要求，于是出现了电液调节系统（ELECTRO-HYDRAULIC CONTROL，简称 EHC）。EHC 系统中执行机构仍采用液压伺服装置，运算部件则由电子元件组成，这种系统具有信号综合方便，运算精度高，能适应多种运行工况的特点。早期的 EHC 系统采用模拟电子装置构成，由于电子器件的可靠性不高，故汽轮

机控制系统多设计为 EHC 和 MHC 并存的工作方式, MHC 作为 EHC 的后备调节手段。正常控制由 EHC 完成, 一旦 EHC 故障退出, MHC 立即投入。这种以模拟电路为主的 EHC 系统称为 AEH (ANALOG ELECTRO - HYDRAULIC CONTROL)。随着模拟电子器件质量的提高, 汽轮机控制系统由电液并存工作方式过渡到采用 AEH 纯电调的工作方式。

典型的 EHC 系统原理如图 1-4 所示。

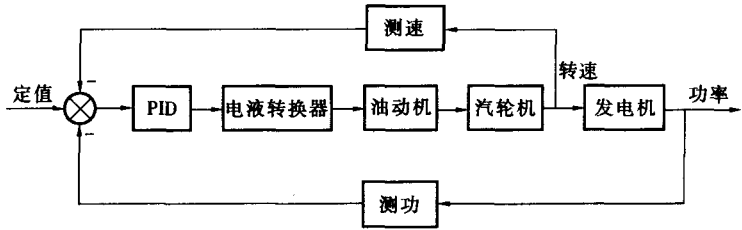


图 1-4 电液调节系统方框图

该系统采用了功率和频率两个调节信号, 有三种基本的调节回路。

- (1) 转速调节回路。它用于单机运行工况, 在机组启动时升速、并网和在停机(包括甩负荷过程)中控制转速。
- (2) 功率调节回路。在机组并入电网运行时或机组在电网中不承担一次调频任务时, 频差放大器(转速调节回路)均无输出信号, 此时, 机组由功率调节回路控制。
- (3) 功—频调节回路。当汽轮机参与一次调频时, 调节系统构成了功率—频率调节回路, 此时, 频率、功率调节回路均参与工作。无论是功率通道产生不平衡, 还是频率通道产生不平衡, 都将引起调节系统动作, 直至系统趋于稳定。

三、数字式电液控制系统

当计算机在工业控制领域得到广泛应用时, 汽轮机功频电调装置进一步发展为以计算机为基础的数字式电液控制系统, 这种系统称为 DEH (DIGITAL ELECTRO - HYDRAULIC CONTROL, 简称 DEH)。早期的 DEH 多以小型机为核心组成, 以微机为基础的分散控制系统出现后, 汽轮机 DEH 系统逐步转向由分散控制系统组成。

目前, 我国火力发电厂中 300、600MW 级汽轮机大都配置了纯电液调节系统, 基本都采用分散控制系统, 如新华控制工程有限公司生产的 DEH - III A, 用于西柏坡电厂、宝鸡电厂、太原第一热电厂等; 美国 ETSI 公司 INFI - 90 (贝利公司产品) 组成的电液调节系统, 用于广东韶关电厂、山西阳泉二电厂等国产 300MW 汽轮机; 美国西屋生产的 OVATION 电液调节系统用于山西古交电厂、华能榆社电厂等。

电液调节系统种类繁多, 其工作原理和功能各异。但大多数电液调节系统设置转速控制、负荷控制、阀门控制、阀门管理, 应力计算, 应力限制, 负荷限制, 保护跳闸和 ATC 等功能, 能够满足汽轮机的安全运行和启停要求。

第二节 汽轮机控制系统的内容

目前火力发电厂多采用单机容量为 300 ~ 600MW 的亚临界压力的单元机组。随着电网自动化程度和单元制运行水平的不断提高, 对汽轮机控制系统提出了更高的要求。一个完善的

汽轮机控制系统包括以下几方面内容。

一、监视系统

监视系统是保证汽轮机安全运行必不可少的设备，它能够连续监视汽轮机运行中各参数的变化，监视参数可分为两大类：机械量和热工量。属于机械量的有：汽轮机转速、轴振动、轴承振动、转子轴位移、转子与汽缸的相对膨胀、汽缸热膨胀、主轴晃度、油动机行程等。属于热工量的有：主蒸汽压力、主蒸汽温度、凝汽器真空、高压缸速度级后压力、再热蒸汽压力和温度、汽缸温度、润滑油压力、调节油压力、轴承温度等。汽轮机的参数监视通常由 DAS 系统实现。测量结果同时送往调节系统作限制条件，送往保护系统作保护条件，送往顺序控制系统作控制条件。

二、调节系统

汽轮机调节系统的功能包括大范围的转速控制、负荷控制、异常工况下的负荷限制、主汽压力控制以及阀门位置控制等。调节系统原理如图 1-5 所示。

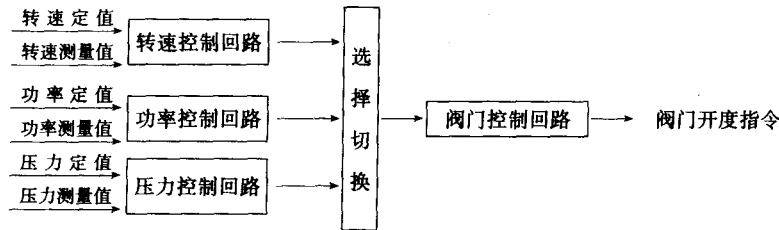


图 1-5 调节系统原理

(一) 转速控制

转速控制可以实现大范围的转速自动调节，使汽轮机从盘车转速逐渐升到并网前的转速，调速范围为 50 ~ 3300r/min，调节精确度为 $\pm 1 \sim 2r/min$ 。大多数电液调节系统是以实际转速作为测量信号与转速定值比较，将转速偏差送入转速控制回路运算，通过选择切换回路输出阀位控制指令，阀位指令作用于阀门控制回路去操作蒸汽阀门的启闭，达到转速控制目的。汽轮机升速过程中转速定值以预先给定的升速率连续变化，是一条随时间增长的直线。升速率的值由汽轮机制造厂提供具体数据或曲线，运行中操作人员可以根据汽轮机热状态进行选择，也可以由控制系统自动选择升速率。大多数汽轮机的升速率规定为 100、150、300、600r/min² 等几种。

除上述转速控制方案外，也有的电液调节系统采用升速率作为被调量来实现汽轮机升速过程的转速控制，控制系统的原理如图 1-6 所示。

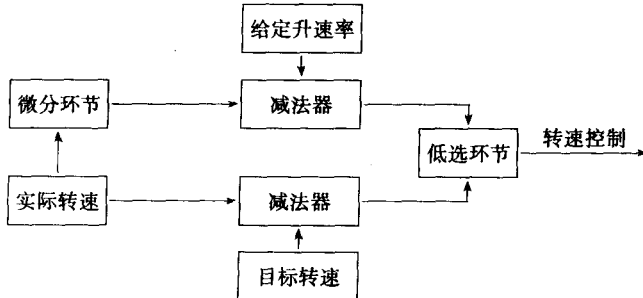


图 1-6 转速的升速率控制原理

测取的实际转速经微分环节运算后得到实际升速率信号,该信号与给定的升速率相比较后得到升速率偏差信号,此信号送到低选环节,低选环节还接受转速偏差信号,取两偏差值的小值作为转速控制信号。机组启动升速过程中,由于转速偏差值很大,故汽轮机按给定升速率控制转速的上升。升速率可以由运行人员选择,也可以由电液调节系统根据机组的热状态自动选择。当汽轮机转速接近目标转速时,转速偏差小于升速率偏差,低选环节选择转速偏差为控制信号,这时汽轮机转速很快稳定于目标转速。

(二) 负荷控制

负荷控制系统是在汽轮机启动升速过程结束、机组已完成并网任务后开始工作的。负荷控制的功能是通过开环或闭环工作方式去控制汽轮机发电机组的负荷。闭环工作时以发电机实发功率值为测量信号与功率定值相比较,得到功率偏差值经负荷控制回路运算后去控制调节阀的开度,达到调节功率的目的。开环工作时,根据功率定值及频差信号由负荷控制回路直接给出阀门开度指令。无论应用哪种方式,最终都要使汽轮机实发功率达到功率给定值。功率给定值回路与转速定值回路相似,也是根据目标负荷和变负荷速率给出连续变化的负荷指令。变负荷速率通常由运行人员在 $(0.5\% \sim 10\%) / \text{min}$ 范围内选择。具有热应力限制功能的电液调节系统可根据热应力在线计算值限制变负荷速率的大小。

当机组并网发电后,转速控制回路的转速偏差实际上反映的是电网实际频率与额定频率之差。当出现频差信号后,为了调节电网频率使之维持在额定频率(50Hz)值上,可将转速偏差根据汽轮机静态特性曲线转换为功率偏差,然后通过负荷回路去调节机组的实发功率,使机组参加一次调频。

(三) 异常工况下的负荷限制

当发生工质参数越限或者机组运行出现异常时,为了保障设备的安全,要求电液调节系统具有负荷限制的功能,负荷限制功能包括以下几方面。

(1) 功率反馈限制。当机组实发功率与功率定值之差超过某一规定值,例如差值达到额定功率的10%时,系统判断为发电机甩负荷,控制系统自动切除功率反馈回路变闭环为开环,并降低功率定值以确保机组安全。

(2) 变负荷速率限制。机组在变动负荷过程中进汽量的变化使汽缸、转子等部件出现热应力。为了使热应力不超过允许数值,要求对变负荷速率加以限制。由电液调节系统根据热应力在线计算回路的输出值自动选择变负荷速率,一旦应力裕度系数下降,回路自动降低变负荷速率。

(3) 主蒸汽压力限制。单元机组运行中,为了协调锅炉和汽轮机两者在能量供需方面的关系,通常在汽轮机控制系统中引入反映锅炉运行工况的机前压力信号。汽轮机改变负荷必然引起机前压力的变化。如果机前压力低于额定压力的5%,依靠锅炉自身很难迅速恢复主蒸汽压力,这时必须对汽轮机的负荷进行限制以加速机前压力的恢复过程。限制的措施是,在电液调节系统中设置一个主蒸汽压力限制回路,使汽轮机的负荷不再受功率控制回路的控制而受主蒸汽压力限制回路的控制,降低汽轮机的负荷以协助锅炉恢复主蒸汽压力。

除了以上三种负荷限制功能,有的电液调节系统中还设置了低真空限制、转速加速度限制、高压缸排汽温度异常限制、再热汽压过低限制等功能。上面这些负荷限制功能并不是在每台机组的电液调节系统中都必须具备。

(四) 主蒸汽压力控制

单元机组的基本运行方式有三种：锅炉跟随汽轮机方式（炉跟机）、汽轮机跟随锅炉方式（机跟炉）以及机炉协调方式。单元机组的负荷控制也相应有以下三种方式。在后两种控制方式中，汽轮机控制系统均引入机前压力信号，汽轮机不同程度地承担了调节主蒸汽压力的任务，所以有的电液调节系统中设置了主蒸汽压力控制回路，根据机前压力的偏差由主蒸汽压力控制回路产生阀门开度指令，去控制汽轮机调节阀的开度，达到调节主蒸汽压力的目的。

(五) 阀门控制与管理

无论是启动过程中的转速控制，还是正常运行中的负荷调节以及主蒸汽压力控制，最终都是通过对汽轮机的高、中压调节阀和高压主汽阀的阀位控制来实现的，因此阀门管理与阀位控制是汽轮机电液控制系统中必备的功能。

1. 汽轮机启动过程中的阀门控制

汽轮机启动时的阀门控制与汽轮机的启动方式有关。带有中间再热的大型单元机组，常见的汽轮机启动方式有以下几种。

(1) 高压缸启动。启动前高压调节阀和中压主汽阀全开，而后开启高压主汽阀和中压调节阀控制蒸汽流量进行汽轮机的冲转、升速、同期并网、带初始负荷暖机。带初始负荷暖机过程中要进行阀门切换，高压调节阀由全开状态逐渐关小，高压主汽阀逐步达到全开，两阀完成控制任务的交接。这种启动方式使汽轮机在启动过程中通过高压主汽阀的节流调节实现高压缸全周进汽，使转子受热均匀。

(2) 中压缸启动。中压缸启动又可分为高压缸通汽和高压缸隔离两种启动方式。汽轮机采用中压缸启动必须与旁路系统配合。

高压缸通汽启动方式是，汽轮机冲转前高压主汽阀和中压主汽阀全开，高压调节阀全关，使高压缸处于隔离状态，利用中压调节阀控制汽轮机冲转、升速、同期并网和带初始负荷。当汽轮机转速达到额定转速的 75% 时，开启高压缸排汽阀，使蒸汽进入高压缸尾部，再逆流至高压缸前端，通过专用的排汽阀进入凝汽器。当中压调节阀开度达到 50% 时，进行高、中压缸的切换，开启高压调节阀使高压缸内蒸汽由逆流变为顺流。

高压缸隔离启动方式是，汽轮机冲转前高压主汽阀、高压调节阀全关，中压主汽阀全开，旁路系统维持过热汽温和再热汽温。当再热汽压达到规定值时，开启中压调节阀控制汽轮机冲转、升速、同期并网和带初始负荷，此时高压缸处于隔离状态，转子因鼓风作用而加热，通过调节高压缸排汽止回阀和真空疏水门的开度来调节高压缸内压力，从而达到控制高压转子温度的目的。当负荷达到 36% 时，进行高、中压缸切换，先开启高压主汽阀，关闭真空疏水门，再开启高压调节阀使高压缸带负荷，并开启高压缸排汽止回阀。切换过程中，中压缸所带负荷要向高压缸转移一部分。为了保证切换平稳进行，必须保持负荷指令稳定不变，待切换过程结束后再增加负荷。

2. 阀门管理

汽轮机高压缸有两种进汽方式，即节流调节的全周进汽和喷嘴调节的部分进汽。阀门管理是指对调节阀两种运行方式的选择和切换。节流调节全周进汽时，多个高压调节阀的启闭同步进行，像一个阀门一样，因此这种进汽方式也称为单阀控制；喷嘴调节部分进汽时，前一个阀门开启到指定开度，后一个阀门才开始开启，这种进汽方式又称为顺序阀控制。节流

调节全周进汽可保证汽轮机升速和变负荷过程中转子均匀加热,减小转子的热应力。在汽轮机升速、低负荷暖机、滑压运行以及大幅度变负荷过程中应选择全周进汽方式。在定压运行过程中及额定负荷时,应选择部分进汽方式。凡存在两种进汽方式的汽轮机,其电液调节系统中要设置阀门管理功能。

实现阀门管理的方法一般是,在每个高压调节阀的阀位控制回路输入的开度指令信号上分别叠加不同的偏置信号,以改变阀门的起始开启位置,每个阀门所加偏置信号的大小应能保证几个高压调节阀按顺序开启,实现顺序阀控制。当解除偏置信号后,几个调节阀即可以同步开启和关闭,实现单阀控制。

3. 阀门在线试验

汽轮机高、中压主汽阀和高、中压调节阀都是由液压执行机构驱动的机械装置。为了保证汽轮机故障时阀门能可靠关闭,电液调节系统应设置阀门在线试验功能,即在汽轮机带负荷情况下逐个关闭阀门,以检验其工作情况。

高、中压调节阀在线试验的方法是,在被试验阀门的阀位控制回路输入端施加一个呈斜坡变化、与开度指令相反的信号,随试验信号的逐渐增大,阀门逐渐关闭。全关后阀位行程开关通过逻辑回路使试验信号减小,于是阀门重新开启。试验信号消失后,阀门恢复到原来的开度。采用呈积分变化的试验信号可以避免对汽轮机产生过大的负荷扰动。

高、中压主汽阀的试验方法是,由逻辑回路控制每个阀门控制油路上的试验阀动作,以泄掉被试验阀门液压回路的油压,从而使阀门关闭。阀门关闭后由行程开关通过逻辑回路使试验阀门复位,恢复油压,阀门重新开启。

阀门在线试验是在汽轮机带负荷运转下进行的,电液调节系统的负荷控制回路已投入工作,所以被试验阀门关闭后,其承担的蒸汽通流量将由其他阀门分担,不会对汽轮机负荷产生影响。由于每个阀门的通汽量裕度有限,因此阀门在线试验应在额定负荷的 90% 以下进行。

4. 阀门快关

这是汽轮机参与维持电力系统动态稳定的一种技术措施。当电力系统发生短路故障时,虽然电气保护动作可以快速切除故障点,但是系统的稳定状态会受到冲击。如果汽轮机能参与事故处理,在电力系统发生故障而大幅度减小负荷时,汽轮机能迅速、准确地大幅度减小负荷,而后将负荷恢复到原水平或低于原水平,这对尽快恢复电力系统的稳定是极为有利的。

由于汽轮机的惯性很大,通常做法是,故障时同时关闭高压调节阀和中压调节阀,待过一段时间(1s 以内)后重新开启阀门恢复负荷。快关阀门控制信号通过两种渠道获取:①测取汽轮机输出功率与电负荷的不平衡值,将汽轮机输出功率与发电机功率相比较,当汽轮机功率超过发电机功率的数值达到发电机额定功率的 30% 时,电液调节系统即发出快关阀门的控制信号。汽轮机功率一般用中压排汽压力表征。②测取汽轮机转子的加速度值或超速值(加速度值可用实际转速经微分运算后获得),当转速和加速度值达到设定值时,电液调节系统发出快关阀门信号。为了使阀门能以最快速度进行操作,快关阀门指令一般送入阀门控制回路或者直接送入阀门的液压执行机构。

三、电液控制系统的热应力监控功能

1. 热应力监控概述

热应力是由于金属内部热状态不同而产生的应力。金属的热状态不同表现为其各个部分

的温度不同,因此热应力和温度差值有关。假设一圆柱形金属物各部分的温度是一致的,则不产生热应力。若用高温工质对其加热,外表面温度将升高,内部仍保持原温度,圆柱表面金属要膨胀,内部金属保持原状,于是产生压应力;反之,若用工质冷却金属圆柱,其表面温度降低而产生收缩,金属内部温度不变而保持原状,于是在金属圆柱内产生拉应力。无论是加热还是冷却,当时间足够长后,金属内部达到热平衡,各处温度均相同,热应力也随之消失。各类金属材料都有一定的强度,因此工作中允许金属材料出现各类应力。只要应力值小于金属的许用应力,金属部件就可以长期可靠地工作。若应力值超出许用应力,其结果会产生金属部件损坏或者使用寿命缩短。

汽轮机是在高温高压下工作的机械设备,转子处于连续高速旋转状态,因此存在一定的机械应力。当汽轮机运行工况改变时,热状态的变化使汽缸、转子产生热应力。为了保证汽轮机安全运行,必须对热应力进行连续监视。

就汽轮机整体而言,其各部件在升速和负荷变化时所产生的热应力并不是一样的。汽轮机转子是高速旋转部件,因其本身已经承受了比较大的离心力,转子的热应力越大,危险性也越大,故运行中对转子热应力必须进行监视。

高压缸调节级的焓降最大,做功最多,调节级汽室内的压力及温度随负荷变化也很大,所以高压缸调节级在启动和负荷变化过程中的热应力最大,是热应力监视的重点部位。对于中间再热机组,中压缸进汽部分在启动和负荷变化时汽温变化也很大,同样是监视的重点。

由上述分析可知,高压缸调节级和中压缸第一级处转子和汽缸都是热应力较大的部位,其中转子热应力是最危险的。因此在汽轮机运行中,只要监视这几处的热应力不超过允许值,其余部位的热应力一般不会超过允许值。

转子热应力值可采用两种方法获取:①用汽轮机转子传热数学模型计算求得;②用转子物理模型求得。

为了便于监视和控制应力,引用应力裕度系数 K 表征实际应力的相对值。应力裕度系数用下式计算

$$K = \frac{\sigma_L - \sigma}{\sigma_L} \quad (1-1)$$

式中 σ_L ——材料在使用温度下的许用应力;

σ ——实际应力。

应力裕度系数 K 表示在许用应力范围内还有多大裕量可供使用。 $K=1$,表示实际应力为零,这种情况只有在汽轮机停机且充分冷却后才会出现。只要汽轮机运转,即使没有热应力,也存在机械应力, K 不会等于 1。 $K=0$,表示实际应力等于许用应力,无裕量可供使用。 $K<0$,表示实际应力已超过许用应力,这是不允许的。

对转子应力裕度的监视可以指导机组在最佳状态下运行,可以保证在汽轮机转子实际应力不超过许用应力的情况下以最大升速率升速和以最大的变负荷速率变负荷。

当电液调节系统具有应力限制功能时,可以自动控制转子的应力。应力裕度系数 K 在规定值以上时(通常为 0.2),不限制升速率和变负荷速率;当系数 K 值低于规定值而大于零时,限制回路自动降低升速率和变负荷速率;若 K 值降为零,则升速率和变负荷速率也降为零。一般,将应力裕度系数 K 限制在 0~0.2 之间为好。

2. 转子热应力数学模型计算

汽轮机转子在升速和变负荷的过程中,热应力变化最大,是监视的重点,因此应快速实时计算转子热应力。为了解决这一问题,硬件上目前都采用计算机,软件上应尽可能简化计算方法,建立易于计算的数学模型。

为了简化计算,通常将汽轮机转子视为一个无限长的圆柱体,既不考虑转子的叶轮形状,也不考虑轴向传热过程,只考虑径向传热,并且只计算圆柱体外表面和中心孔内表面的热应力。计算过程为,根据测得的蒸汽热力参数和汽缸金属温度实时值计算转子内、外表面的温度及转子的平均温度,再计算转子内、外表面的热应力及转子的机械应力,最后算出应力裕度系数。检测的参数有高压主汽阀前的蒸汽温度和压力、高压缸进口内壁金属温度、高压缸内壁金属温度、高压缸排汽压力、中压缸主汽阀前蒸汽温度和压力、中压缸进口内壁金属温度、中压缸内壁金属温度和发电机功率等。

对于无限长圆柱体,径向受热时导热的微分方程可用式(1-2)表示,即

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \theta}{\partial r} = \frac{1}{A} \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1-2)$$
$$A = \frac{\lambda}{\rho c_p}$$

式中 θ ——转子任意半径 r 处的金属温度;

r ——转子任意一点的半径;

t ——时间;

A ——热扩散率;

λ ——转子材料热导率;

ρ ——材料体积质量;

c_p ——材料质量定压热容。

λ 、 ρ 、 c_p 均为温度的函数,当材料已知时, $\lambda(\theta)$ 、 $\rho(\theta)$ 、 $c_p(\theta)$ 都是已知值。

式(1-2)在下列边界条件下求解:转子的内孔是实心的或者内孔是绝热的,则内表面满足式(1-3)

$$\left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right)_I = 0 \quad (1-3)$$

转子的外表面直接与热汽流接触,则外表面满足式(1-4)

$$\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial r} \right)_E = H(\theta_D - \theta_E) \quad (1-4)$$

式中 H ——蒸汽对转子的传热系数,取决于蒸汽参数、转子转速和几何形状;

θ_D ——蒸汽温度;

θ_E ——转子外表面温度。

将边界条件代入式(1-2),即可求出转子的平均温度 θ_M 、转子外表面温度 θ_E 、转子内表面温度 θ_I ,据此可求出转子内、外表面的热应力。

转子内表面热应力用式(1-5)计算,即

$$\sigma_I = \frac{E\epsilon}{1-\mu}(\theta_M - \theta_I) \quad (1-5)$$

转子外表面热应力用式(1-6)计算,即