

普通高等教育“十五”规划教材



STEAM TURBINE DIGITAL
ELECTRO-HYDRAULIC CONTROL SYSTEM

汽轮机数字电液 控制系统

王爽心 葛晓霞 合 编



中国电力出版社
<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书针对火电机组汽轮机控制中比较行之有效、且较成熟的汽轮机数字电液控制系统(DEH)的组成、基本原理、功能实现及典型工业应用等方面进行了比较系统和深入的探讨。主要内容包括汽轮机自动控制的基本概念,汽轮机功频电液控制与数字电液控制的基本原理,DEH系统的特性及控制逻辑,DEH的液压伺服系统,汽轮机保护和危急遮断系统,DEH的计算机系统、典型系统以及控制仿真与故障诊断技术等。本书理论联系实际,内容切合信息时代的需要,反映了当前最新科研成果,并力求深入浅出,着重物理概念。

本书可作为高等学校热能与动力工程、自动化、测控技术与仪器、电气工程及其自动化以及其他相关专业本科生或研究生教材,亦可供从事电厂集控运行、设备检修的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机数字电液控制系统/王爽心,葛晓霞合编. —北京:中国电力出版社,2004.8

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-2060-3

I. 汽... II. ①王...②葛... III. 蒸汽透平-液压控制系统, 数字式-高等学校-教材 IV. TK263.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 080185 号

中国电力出版社出版、发行

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

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2004年8月第一版 2004年8月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 24.75印张 580千字 1插图

印数 0001—3000册 定价 36.80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)

序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多本教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推

荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416222）

中国电力教育协会

前 言

随着火电机组向大容量、高参数发展,机组的自动化程度也相应地不断提高,各类自动化方面的新技术、新系统相继出现并得以成功应用。

汽轮机作为热力发电厂的重要设备,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,并驱动发电机转动,将机械能转换为电能,并且在这些能量转换的过程当中,为了保证电能质量,维持电网频率,通常要求它的转速稳定在额定转速附近很小的范围内变化,这就对汽轮机的控制提出了更高的要求。随着科学技术的迅猛发展,汽轮机控制技术也发生了日新月异的变化,目前 300MW 以上大机组,一般均采用数字电液调节系统(DEH),使单元机组的运行操作发生了质的飞跃,为协调控制系统(CCS)、自动发电控制(AGC)等系统的顺利实施创造了条件。

由于汽轮机数字电液控制系统(DEH)在我国属于近十年才逐渐成熟应用的技术,国内公开出版教材不多,这为该课程的教学和现场培训带来了很大不便,为此,本书从 DEH 的实际功能出发,本着深入浅出,通俗易懂的宗旨,将 DEH 的基本原理、结构组成及具体功能实现方法介绍给读者,以期为电力系统安全稳定运行做出一定贡献。

全书共八章,以讲授火电厂 300MW 等级机组汽轮机数字电液控制系统的基本控制原理和典型控制系统为主要内容,力求较全面地反映汽轮机的控制机理和新技术的应用。第一章概论,主要介绍汽轮机自动控制的基本概念及数字电液控制技术的应用与发展现状;第二章介绍汽轮机功频电液控制与数字电液控制的基本原理;第三章介绍 DEH 系统的特性及控制逻辑;第四章介绍 DEH 的液压伺服系统;第五章介绍汽轮机的保护和危急遮断系统;第六章介绍 DEH 的计算机系统;第七章介绍 DEH 的典型系统;第八章介绍 DEH 的控制仿真与故障诊断技术。

本书在题材的选择上,突破现有教材的思路,注重了内容的先进性、实用性和广泛性,增加了许多汽轮机控制的新技术,并结合编者科研工作,介绍了 DEH 的仿真技术,为读者深刻理解和验证 DEH 的动态特性,提供了很大方便。

作为普通高等教育“十五”规划教材,本书由北京交通大学王爽心副教授和南京工程学院葛晓霞副教授主编,其中,第一章、第二章、第三章、第八章由王爽心编写,第四章、第五章、第六章、第七章由葛晓霞编写,由王爽心统稿。全书由华北电力大学谷俊杰教授和东南大学杨建明教授主审,两位教授认真审阅了本书的全部书稿,并提出了很多宝贵的修改意见。北京交通大学研究生马玲同学为本书的文字部分做了大量工作,华北电力大学华仿科技有限公司工程部段新会部长也为 DEH 系统的仿真实验提供了有益的帮助,对他们的辛勤工作表示感谢。编写过程中作者参考了许多文献资料,在此亦向有关作者表示感谢。

在华北电网有限公司资助下，我们开发了“汽轮机数字电液控制系统多媒体 CAI 软件”，该软件运用图像、视频、动画等多种媒体技术，生动地讲述了 DEH 的工作原理，是本书很好的辅助教材。该多媒体 CAI 软件已获得第六届全国多媒体教学软件大赛高教组三等奖，并已在高校和电厂中得到很好应用。读者如需要，请与：王爽心（wsx@jdxj.njtu.edu.cn）、葛晓霞（gexiaoxia@163.com）联系。

本书可作为高等学校热能与动力工程、自动化，测控技术与仪器，电气工程及其自动化等专业本科生的教材，也可作为火电厂相应专业技术人员的培训教材，同时对有关专业领域的研究人员和工程技术人员也有重要的参考价值。

由于热工自动控制技术发展很快，在编写过程中又有许多新技术应用于生产实际之中，书中不妥和错误之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2004 年 6 月

目 录

序

前言

第1章 概论	1
1.1 汽轮机自动控制的基本概念	1
1.2 数字电液控制 (DEH) 在再热汽轮机中的应用	12
1.3 汽轮机数字电液控制技术中的应用现状	27
本章小结	34
习题	35
第2章 汽轮机数字电液控制 (DEH) 的基本原理	37
2.1 功频电液控制的基本原理	37
2.2 数字电液控制 (DEH) 的基本原理	59
本章小结	68
习题	68
第3章 DEH 控制系统的特性及控制逻辑分析	70
3.1 DEH 控制系统的特性	70
3.2 DEH 系统的转速控制	76
3.3 DEH 系统的负荷控制	87
3.4 DEH 系统的阀位限制与阀门管理逻辑分析	96
3.5 汽轮机自启停控制 (ATC)	102
3.6 抽汽机组的 DEH 控制	121
本章小结	130
习题	131
第4章 DEH 控制系统的供油系统及液压伺服系统	133
4.1 EH 抗燃油系统	133
4.2 DEH 控制系统的液压伺服系统	150
4.3 DEH 控制系统的液压系统的故障及处理	168
4.4 润滑油系统	182
本章小结	201
习题	202
第5章 汽轮机的超速保护和危急遮断系统	204
5.1 超速保护系统 (OPC)	204
5.2 汽轮机危急遮断系统	211
5.3 汽轮机保护及监测仪表	237
本章小结	238

习题	239
第6章 DEH 控制系统的计算机系统	241
6.1 DEH 计算机系统的组成	241
6.2 计算机系统的硬件系统	242
6.3 DEH 系统的应用软件	253
本章小结	259
习题	259
第7章 典型 DEH 控制系统	262
7.1 新华 DEH - III A 控制系统	262
7.2 国产 300MW 机组 DEH 系统	280
7.3 ABB 公司的汽轮机数字电液控制系统	294
7.4 日立公司的汽轮机数字电液控制系统	296
7.5 日本三菱重工株式会社 DEH 系统	301
本章小结	304
习题	305
第8章 DEH 的控制仿真与故障诊断技术	307
8.1 系统仿真概述	307
8.2 汽轮机及其控制系统的数学模型	318
8.3 DEH 的控制仿真应用一——应用 MATLAB 建模与仿真	356
8.4 DEH 的控制仿真应用二——应用 STAR - 90 实时仿真	361
8.5 DEH 的控制仿真应用三——仿真验收	372
8.6 DEH 的故障诊断技术	376
本章小结	384
习题	385
参考文献	387

第1章 概 论

1.1 汽轮机自动控制的基本概念

1.1.1 汽轮机控制的发展过程

汽轮机是火电厂中的重要设备,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,电力网将电能输送给各个用户。为了维持电网频率,要求汽轮机的转速稳定在额定转速附近很小的一个范围内,通常规定此范围为: $\pm 1.5 \sim 3.0 \text{r/min}$ 。为了达到此要求,汽轮机必须配备可靠的自动控制装置。汽轮机控制装置的发展经历了以下几个阶段:

早期的汽轮机控制系统是由离心飞锤、杠杆、凸轮等机械部件和错油门、油动机等液压部件构成,称为机械液压式控制系统 (Mechanical - Hydraulic Control, MHC), 简称液调。这种系统的控制器是由机械元件组成的,执行器是由液压元件组成的。通常只具有窄范围的闭环转速控制功能和超速跳闸功能,并且系统的响应速度低。其转速 - 功率静态特性是固定的,运行中不能加以控制。

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,仅依靠机械液压式控制系统已不能完成控制任务。这时产生了电气液压式控制系统 (Electro - Hydraulic Control, EHC), 简称电液控制装置,其示意如图 1-1 所示。

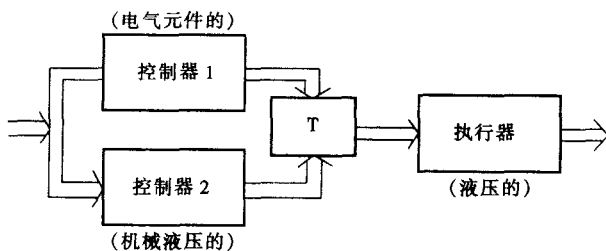


图 1-1 电气液压式控制装置示意

这种系统有两个控制器,控制器 1 由电气元件组成,控制器 2 由机械元件组成,执行器仍保留原来液压部分。这种系统很容易实现信号的综合处理,控制精确度高,能适应复杂的运行工况,而且操作、调整和修改都比较方便。由于早期电气元件的可靠性还比较低,组成电路的可靠性还不能满足汽轮机控制系统的要求,故此时的汽轮机控制系统 EHC 多设计为 MHC 和 EHC 并存的工作方式,当电液控制的电路因故障退出工作时,还有机械液压式控制系统接替工作,以保证机组的安全连续运行。

随着电气元件可靠性的提高,20 世纪 50 年代中期,出现了不依靠机械液压式控制系统作后备的纯电液控制系统。开始采用的纯电液控制系统是由模拟电路组成的,称为模拟式电气液压控制系统 (Analog Electric - Hydraulic Control, AEH), 也称模拟电液控制装置,这种系统的控制器是由模拟电路组成的,执行器仍保留原有的液压部分,两者之间通过电液转换器

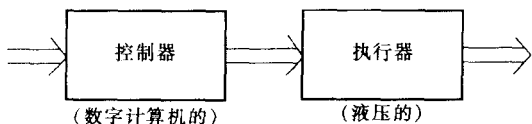


图 1-2 数字式电气液压控制装置示意

相连接。

数字计算机技术的发展及其在过程自动化领域中的应用,将汽轮机控制技术又向前推进了一大步,20 世纪 80 年代出现了以数字计算机为基础的数字式电气液压控制

制系统 (Digital Electro-Hydraulic Control, DEH),简称数字电液控制装置,其示意如图 1-2 所示。其组成特点是控制器用数字计算机实现,执行器保留原有液压部分不变。早期的数字电液控制大多是以小型计算机为核心的。以微机为基础的分散控制系统出现后,近期的汽轮机 DEH 系统逐步转向以分散控制系统 (DCS) 为基础,它具有对汽轮发电机的启动、升速、并网、负荷增/减进行监视、操作、控制、保护,以及数字处理和 CRT 显示等功能。

基于 DCS 的 DEH 系统有如下特点:

- (1) 用操作员站的 CRT 和打印机来监视机组各种参数及其变化趋势。
- (2) 具有转速控制、功率控制功能。
- (3) 可进行主蒸汽压力控制 (TPC)、超速保护控制、阀门快关控制等。
- (4) 具有阀门管理功能。
- (5) 具有按热应力升速和加载的功能。

(6) 软件的模块化和硬件的积木式结构使系统的组态具有极高的灵活性;事故追忆打印功能有利于对事故的实时分析。

1.1.2 汽轮机控制的内容

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应包括以下功能系统。

一、监视系统

监视系统是保证汽轮机安全运行的必不可少的设备,它能够连续监测汽轮机运行中各参数的变化。属于机械量的有:汽轮机转速、轴振动、轴承振动、转子轴位移,转子与汽缸的相对胀差,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、控制油压、轴承温度等。汽轮机的参数监视通常由数据采集系统 (DAS) 实现,测量结果同时送往控制系统作限制条件,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、保护系统

保护系统的作用是,当电网或汽轮机本身出现故障时,保护装置根据实际情况迅速动作,使汽轮机退出工作,或者采取一定措施进行保护,以防止事故扩大或造成设备损坏。

大容量汽轮机的保护内容有:超速保护、低油压保护、位移保护、胀差保护、低真空保护、振动保护等。

三、控制系统

汽轮机的闭环自动控制系统包括转速控制系统、功率控制系统、压力控制系统 (如机前

压力控制和再热汽压力控制), 等等。闭环控制是汽轮机控制系统的主要功能, 控制品质的优劣将直接影响机组的供电参数和质量, 并且对单元机组的安全运行也有直接影响。

四、热应力在线监视系统

汽轮机是在高温高压蒸汽作用下的旋转机械, 汽轮机运行工况的改变必然引起转子和汽缸热应力的变化。由于转子在高速旋转下已经承受了比较大的机械应力, 因此热应力的变化对转子的影响更大, 运行中监视转子热应力不超过允许应力显得尤为重要。热应力无法直接测量, 通常是用建立模型的方法通过测取汽轮机某些特定点的温度值来间接计算热应力的。热应力计算结果除用于监视外, 还可以对汽轮机升速率和变负荷率进行校正。

五、汽轮机自启停控制系统

汽轮机自启停控制 (Automatic Turbine Control, 简称 ATC) 系统是牵涉面很大的一个系统, 其功能随设计的不同而有很大差别。原则上讲, 汽轮机自启停控制系统应能完成从启动准备直至带满负荷或者从正常运行到停机的全部过程, 即完成盘车、抽真空、升速并网、带负荷、带满负荷以及甩负荷和停机的全部过程。可见, 实现汽轮机自启停的前提条件是各个必要的控制系统应配备齐全, 并且可以正常投运。这些系统为自动控制系统、监视系统、热应力计算系统以及旁路控制系统等。

六、液压伺服系统

液压伺服系统包括汽轮机供油系统和液压执行机构两部分。供油系统向液压执行机构提供压力油。液压执行机构由电液转换器、油动机、位置传感器等部件组成, 其功能是根据电液控制系统的指令去操作相应阀门的动作。

由上述汽轮机控制所涉及的内容可以看出, 现代大型单元机组的汽轮机控制系统涉及面很广, 系统复杂, 技术要求高, 既包括了模拟量的反馈控制, 又包括开关量的逻辑控制, 是集过程控制、顺序控制、自动保护、自动检测于一体的复杂控制系统。

1.1.3 汽轮机自动控制的基本原理

一、概述

电力生产对发电用的汽轮机控制系统提出了两个基本要求: 一是保证能够随时满足用户对电能的需要; 二是使机组能维持一定的转速, 保证供电的频率和机组本身的安全。

汽轮发电机组的电功率与汽轮机的进汽参数、排汽压力、进汽量有关。如果汽轮机的进汽参数和排汽压力均保持不变, 那么机组发出的电功率基本上与汽轮机的进汽量成正比, 当电力用户的用电量 (即外界电负荷) 增大时, 汽轮机的进汽量应增大, 反之亦然。如果外界电负荷增加 (或减少) 时, 汽轮机进汽量不做相应增大 (或减小), 那么, 汽轮机的转速将会减小 (或增大)。为使汽轮发电机发出的电功率与外界电负荷相适应, 机组将在另一转速下运行, 这就是汽轮机的自调整性能。

若仅依靠自调整性能, 汽轮机转速则会产生很大的变化。因为外界电负荷的变化是很大的, 仅依靠汽轮机的自调整性能, 不但不能保证电能质量 (电频率、电压), 发电机组并列亦困难, 因此必须在汽轮机上安装自动控制系统, 利用汽轮机转速变化的信号对汽轮机进行控制。汽轮机控制系统总体上可划分为无差控制系统和有差控制系统两种。

(一) 无差控制系统

一台汽轮发电机组单独向用户供电时,即构成孤立运行机组。根据自动控制原理,汽轮机控制系统可以采用无差控制系统。假设在某初始状态下,汽轮机的功率与负荷相等,则其转速为额定值。由于某种原因,例如用户的耗电量增加,则发电机的反转矩加大,转子的转矩平衡遭到破坏,转速将要下降,这时汽轮机的控制系统将会动作,开大调节汽阀,增大进汽量,以改变汽轮机的功率,建立起新的转矩平衡关系,使转速基本保持不变。

采用无差控制系统的汽轮发电机组不利于并网运行,因此并网运行的汽轮发电机组几乎都采用有差控制系统。无差控制常被应用于供热汽轮机的调压系统中,使供热压力维持不变。

(二) 有差控制系统

对于发电用的汽轮发电机组,其转速控制系统一般为有差控制系统。

1. 直接控制

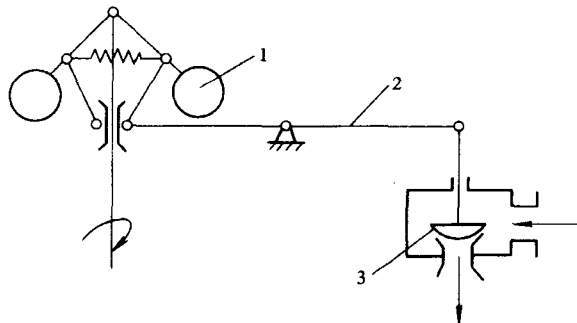


图 1-3 直接控制系统示意

1—重锤; 2—杠杆; 3—调节汽阀

图 1-3 是汽轮机转速直接控制系统示意。当汽轮机负荷减小而导致转速升高时,离心调速器的重锤 1 向外张开,通过杠杆 2 关小调节汽阀 3,使汽轮机的功率相应减小,建立起新的平衡。当负荷增加时,转速降低,重锤向内移动,开大调节汽阀,增大汽轮机的功率。由此可见,调速器不仅能使转速维持在一定的范围之内,而且还能自动保证功率的平衡。

该系统是利用调速器重锤的位移直接带动调节汽阀的,所以称为直接控制系统。由于调速器的能量有限,一般难以直接带动调节汽阀,所以应将调速器滑环的位移在能量上加以放大,从而构成间接控制系统。

2. 间接控制

图 1-4 是最简单的一级放大间接控制系统示意。在间接控制系统中,调速器所带动的不是调节汽阀,而是错油门滑阀。转速升高时,调速器 1 的滑环 A 向上移动,通过杠杆 2 带动错油门滑阀 5 向上移动,这时错油门滑阀套筒上的油口 m 和压力油管连通,而下部的油口 n 则和排油口相通。压力油经过油口 m 流入油动机 3 活塞的上腔,油动机活塞在上、下油压力之差作用力的推动下,向下移动,关小调节汽阀 4。转速降低时,调速器滑环向下移动,带动错油门滑阀向下,这时油动机活塞下腔通过油口 n 和压力油路相通,而上腔则通过油口 m 和排油口相通,活塞上下的压力差推动活塞向上移动,开大调节汽阀。

从以上分析可知,一个闭环的汽轮机自动控制系统由下列四个部分组成:

(1) 转速感受机构。用来感受转速的变化,并将转速变化转变为其他物理量的变化。图 1-4 系统中的离心飞锤调速器就是转速感受机构的一种形式,它接受转速变化信号,输出滑环位移的变化。

(2) 传动放大机构。它是处于转速感受机构之后、配汽机构之前的，起着信号传递和放大作用的控制机构。图1-4系统中的滑阀、油动机以及杠杆都属于传动放大机构，它感受调速器的信号（滑环位移），并经滑阀和油动机放大，然后以油动机的位移传递给配汽机构。

(3) 配汽机构。接受由转速感受机构通过传动放大机构传来的信号，并能依此来改变汽轮机的进汽量。图1-4系统中的控制汽阀以及与油动机活塞连接的杠杆就属于配汽机构。

(4) 控制对象。对汽轮机控制来说，控制对象就是汽轮发电机组。当汽轮机进汽量改变时，汽轮发电机组发出的功率也相应发生变化。

图1-5为汽轮机自动控制系统构成框图。从图中可以很清楚地看出汽轮机控制系统中各组成环节之间的关系。

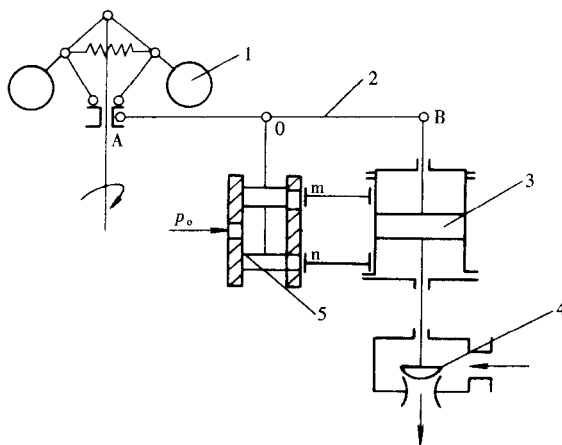


图1-4 间接控制系统示意

1—调速器；2—杠杆；3—油动机；

4—调节汽阀；5—错油门

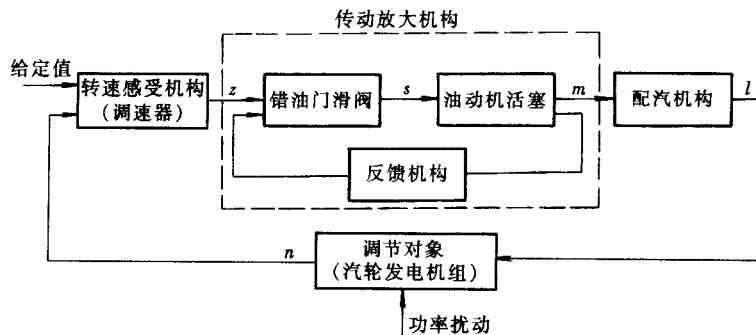


图1-5 汽轮机控制系统框图

z —调速器滑环位移； s —油动机滑阀位移；

m —油动机活塞位移； l —调节汽阀行程； n —汽轮机转速

二、汽轮机液压控制系统的静态特性

由直接和间接控制的工作原理可以看出，汽轮机负荷变化时，其转速也会相应地发生变化。在稳定状态下，汽轮机的功率与转速之间的关系，称为汽轮机控制系统的静态特性。

1. 转速不等率和迟缓率

控制系统的静态特性曲线是一条连续倾斜的曲线，其倾斜程度可用控制系统的转速不等

率 δ 表示。

$$\delta = \frac{\Delta n}{n_0} \times 100\% = \frac{n_{\max} - n_{\min}}{n_0} \times 100\%$$

式中 $n_{\max}$ 、 $n_{\min}$ ——空负荷和满负荷时对应的转速, r/min;

n_0 ——额定转速, r/min。

δ 是控制系统最重要的指标, 从自动控制原理的角度讲, 它相当于控制系统的比例带, 既反映了一次调频能力的强弱, 又表明了稳定性的好坏。如果特性曲线平坦, 即 δ 较小, 则一次调频能力较强。一次调频是指在电网负荷变化后, 电网频率的变化将使电网中各台机组的功率相应地增大或减小, 即机组按其静态特性改变自己的实发功率, 以减小电网频率波动的幅度, 从而达到新的功率平衡, 并且将电网频率的变化限制在一定的限度以内。从调频能力看, 似乎 δ 越小越好, 但 δ 过小, 易引起控制系统不稳定, 甚至引起系统强烈振荡; 相反, δ 过大, 虽可使控制系统稳定, 但不能保证供电频率在规定的范围内。可见, δ 的大小对供电质量和控制系统的稳定性有十分重要的影响。

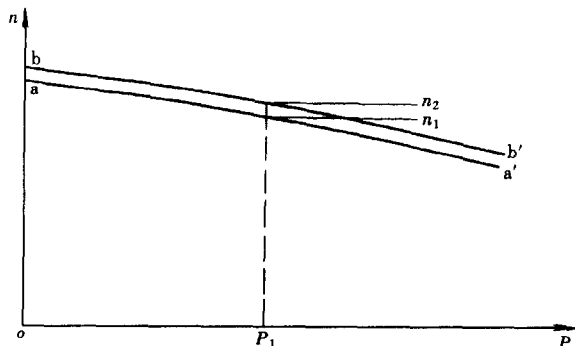


图 1-6 静态特性曲线上的不灵敏区

一般 δ 的范围为 3% ~ 6%, 常用的为 4.5% ~ 5.5%, 带基本负荷的汽轮机转速不等率应比带尖峰负荷的取得大些, 但是所谓基本负荷和尖峰负荷也是相对的, 它是随单机功率增大而变化的。因此, 一般希望将转速不等率设计成连续可调的, 即可按运行情况调整。

由于控制系统各部套间的连续部分存在着间隙、摩擦力以及错油门重叠度等, 机组在加负荷以及减负荷的过程中, 其静态特性曲线不重合, 中间存在着带状宽度的不灵敏区, 如图 1-6 所示, 不灵敏区的转速差和额定转速 n_0 之比称为控制系统的迟缓率 ϵ , 也称为控制系统的不灵敏度, 其关系式为

$$\epsilon = \frac{n_2 - n_1}{n_0} \times 100\%$$

式中 n_2 ——减负荷时, 功率 P_1 所对应的转速;

n_1 ——加负荷时, 功率 P_1 所对应的转速。

由于加负荷与减负荷过程中, 两条静态特性曲线不一定互相平行, 即不灵敏区的宽度是不一样的。其中转速最大差值 $\Delta n_{\max}$ 与额定转速 n_0 之比称为最大迟缓率, 其关系式为

$$\epsilon = \frac{\Delta n_{\max}}{n_0} \times 100\%$$

控制系统迟缓率是一个重要的质量指标, 一般要求越小越好。过大的迟缓率会引起机组

的转速或负荷摆动,甚至引起控制系统不稳定。

2. 静态特性曲线的平移和同步器

汽轮发电机组有两种基本运行方式:一种是单机运行,即在电网中只有一台机组向用户供电;另一种是并网运行,此时在电网中同时有两台或两台以上机组向用户供电。

单机运行时,机组的负荷就是用户的耗电量。根据控制系统的静态特性,负荷变化时机组的转速将要变化,因为交流电的频率与发电机的转速成正比,所以在负荷增加时,电网的频率将按照静态特性而略有降低;负荷减少时,频率将略有上升,如图1-7所示,若功率由 P_1 增加到 P_2 ,则转速(频率)将由 n_1 下降到 n_2 。频率的变化显然是不希望的,为了补偿频率的变化,在控制系统中附加了一种频率(即转速)调整设备,称为同步器。它的作用是使静态特性曲线

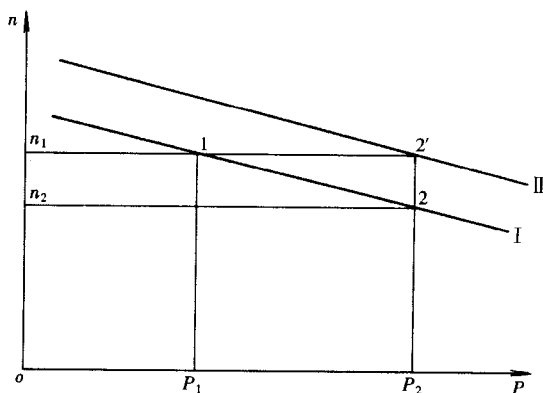


图1-7 单机运行时平移静态特性曲线的作用

做平行的上下移动。从自动控制原理角度讲,操作同步器就相当于改变控制系统的给定值。当功率由 P_1 增加到 P_2 时,工作点由1移至2,转速由 n_1 下降到 n_2 。如果此时把静态特性曲线由I平移至II,则工作点将由2移至2',此时汽轮机的功率仍为 P_2 ,而转速则由 n_2 上升到 n_1 。可见,在单机运行时,平移静态特性曲线的结果是改变汽轮机的转速。汽轮机的功率则取决于外界的负荷,不受平移静态特性曲线的影响。

对于电液控制系统,静态特性曲线的平移是通过附加给定信号来实现的。附加给定信号作用在测速元件上,它的作用是平移测速元件的静态特性曲线,称为转速给定;附加给定信号作用在测速元件后的综合放大器上时,它的作用就是平移放大机构的静态特性曲线,称为功率给定。转速给定的作用是改变汽轮机的转速,而功率给定的作用则是改变汽轮机的功率。

3. 并网运行时的分配特性和二次调频

许多汽轮发电机联成一个电网是近代大规模供电方式。由于各台发电机有共同的转速,就好像机械地连接在一起。在这种情况下,各机组控制系统的作用将受到互相牵制。每一台机组的转速都取决于电网的频率,而电网的频率又由所有机组的控制系统综合工作所决定。因此,分配给电网中每台机组的负荷取决于各台机组控制系统的静态特性。

假设在电网中只有两台机组,它们的静态特性如图1-8所示。设电网的频率是 f_1 ,与 f_1 相应的转速是 n_1 ,根据两台机组的静态特性,I号机和II号机的功率分别是 P'_I 和 P'_{II} ,两台机组所发出功率的总和($P'_I + P'_{II}$)应等于用户所消耗的功率 P'_L 。设电网的负荷增加了 ΔP_L ,则电网的频率从 f_1 下降到 f_2 ,机组的转速从 n_1 下降到 n_2 ,由静态特性曲线可知,I号机和II号机的功率分别增大到 P''_I 和 P''_{II} ,而且必然有 $\Delta P_L = \Delta P_I + \Delta P_{II}$ 的关系,这里I号机的功率变化(ΔP_I)比较大,而II号机的功率变化(ΔP_{II})比较小,可见,静态特性

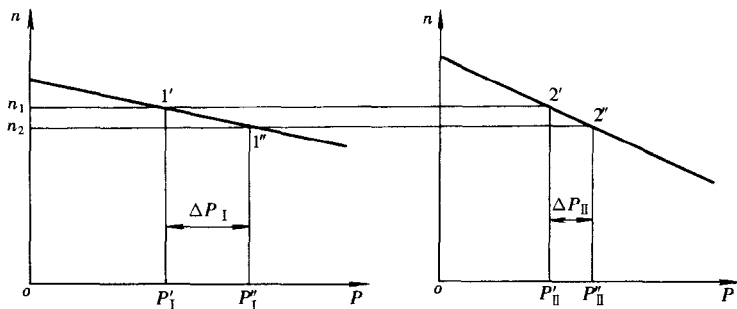


图 1-8 并网运行时的负荷分配

曲线平坦的机组比静态特性曲线较陡的机组承担的功率变化大。也就是说，转速不等率越大，则电网频率变化时，功率变化越小；而转速不等率越小，则电网频率变化时，功率变化越大。

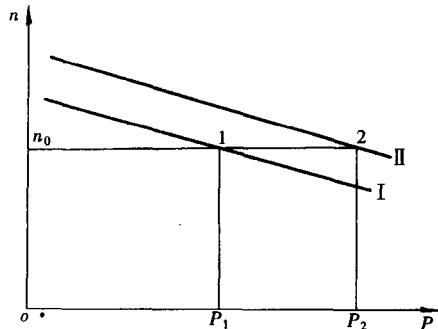


图 1-9 并网运行时平移静态特性曲线的作用

并网运行时，也可以利用同步器平移某一台机组的静态特性曲线。但是它的作用将不是改变它的转速，而是改变它的功率。因为在一个电网里一般都有很多台发电机组同时向用户供电，每一台机组功率的变化对电网频率的影响可以认为是很微小的，所以可以近似地把电网频率看成是固定不变的常数。如图 1-9 所示，当把某一台机组的静态特性由 I 平移到 II 时，机组功率升高，电网的频率将略有升高，其他机组的功率略有减少。这一台机组的功率增加恰好为其他机组功率的减少所抵消。因为

电网中机组的台数很多，所以频率的变化和单机运行时相比要小很多。电网的调度人员正是利用这种办法来调整电网的频率，使之保持在额定值的允许变化范围内。这种调整频率的作用称为二次调频。

4. 静态特性曲线的平移范围

同步器的行程，即静态特性曲线的平移范围，应该能够满足汽轮机运行的要求。

在并网运行时，同步器的功能是改变汽轮发电机组的功率。所以，在电网频率不变，而且蒸汽的初温、初压和背压都是额定值时，同步器的行程至少应使汽轮机的功率能够在零到额定功率之间做任意的变动。如图 1-10 所示，同步器的行程至少应该使控制系统静态特性曲线的变动范围等于它的转速不等率 δ 。但实际上电网频率是变化的，它可能高于额定值，也可能低于额定值，另外，蒸汽的初温、初压和背压都可能偏离额定值。为了使机组在电网频率低时仍能减负荷到零或者仍能并入电网，要求同步器的行程能够使静态特性曲线在转速降低的方向再向下移动 3% ~ 5%。另外，为了使机组在初温、初压降低，背压升高，同时在电网频率升高时也能带上满负荷，要求同步器的行程能够在转速升高的方向再增加 1% ~

2%。

同步器在转速降低方向扩大行程是没有害处的,实际上,在某些控制系统中,由于调速器几乎从零转速开始就有信号输出,所以同步器只要在低转速下有足够的行程范围,就可以使机组在低转速时能够受到转速控制系统的控制,如使汽轮机升速并带上负荷。但是,同步器在使汽轮机升速方向上有过大的富裕行程是不适宜的,因为在操作不当时,它可能使控制系统在甩负荷时的性能恶化。

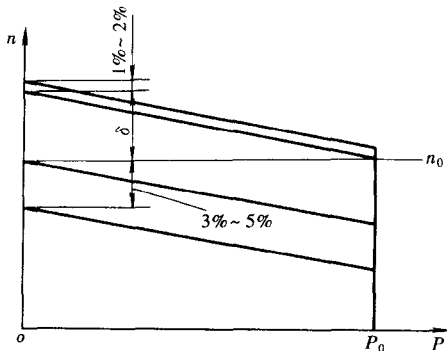


图 1-10 同步器的移动范围

5. 静态特性的合理形状

在汽轮机运行时,必须保持发电机频率恒定,但是当机组负荷变化时,汽轮机转速将按静态特性曲线变化。实践表明,静态特性曲线的形状如果不符合要求,将有可能引起控制系统不稳定等不正常现象的发生。

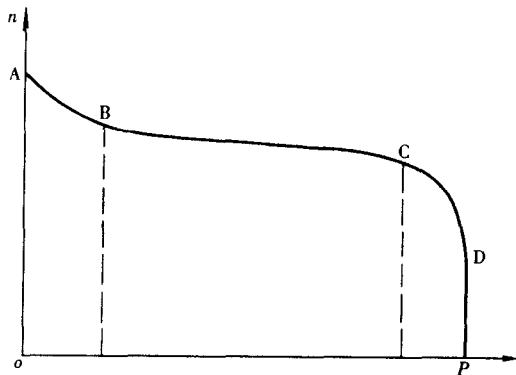


图 1-11 合理的静态特性曲线

合理的静态特性曲线的形状一般应为如图 1-11 所示:

- (1) 曲线的初始段 AB 段,要求斜率大一些。
- (2) 额定功率附近 CD 段,斜率也应大一些。
- (3) 中间段 BC 段,应该平滑地过渡,不允许出现斜率过小、甚至为零或者为负的现象,以避免出现局部不稳定。

三、液压控制系统的动态特性

控制系统的静态特性描述的是稳定状态下功率与转速的对应规律,它与各稳定状态之间的过渡过程无关。控制系统的动态特性描述的则是控制系统受到扰动后,被调量随时间的动态变化规律。其研究目的是:判别控制系统是否稳定,评价控制系统品质以及分析影响动态特性的主要因素,以便提出改善控制系统动态品质的措施。

(一) 动态特性指标

对液压控制系统来说,转速是被调量,过高的转速会威胁设备运行安全;另外,控制系统可能受到的最恶劣扰动是机组甩全负荷,它是一个幅度最大的阶跃扰动信号,通常期望控制系统在此扰动下具有良好的控制性能。所以,研究甩全负荷时机组转速变化的动态特性指标,具有典型的代表意义。

1. 稳定性

图 1-12 为汽轮机甩全负荷时,转速的几种变化过程。图 1-12 (a) 上的三条过程曲线,都随时间 t 的增加而最终趋于由静态特性决定的空负荷转速。这样的过程被称为稳定过