

魏守平 编著

水轮机调节

*Hydraulic Turbine
Regulation*

华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

图书在版编目(CIP)数据

水轮机调节/魏守平 编著. —武汉:华中科技大学出版社,2009年7月
ISBN 978-7-5609-5376-2

I. 水… II. 魏… III. 水轮机-调节系统 IV. TK730.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 084129 号

水轮机调节

魏守平 编著

责任编辑:谢燕群

封面设计:刘 卉

责任校对:朱 霞

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:787 mm×1092 mm 1/16

印张:18

字数:430 000

版次:2009年7月第1版

印次:2009年7月第1次印刷

定价:35.80元

ISBN 978-7-5609-5376-2/TK·49

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书对水轮机调节系统的基本理论、工作原理、动态仿真和实际应用进行了系统、全面的分析和研究,详细地推导和论证了水轮机调节系统、水轮机控制系统和被控制系统的静态及动态特性,针对水轮机微机调速器微机控制器的结构体系、硬件构成、软件设计和机械液压系统的组成及原理,进行了理论联系实际的分析,提供了大量可供工程应用的资料,详细地介绍了基于 MATLAB 的水轮机调节系统的仿真模型建立、空载工况动态仿真、甩负荷动态过程仿真、电网一次调频动态仿真和单机带负荷动态仿真的研究成果,本书还简要介绍了具有代表性的 YT 系列机械液压调速器的技术要点。

本书可作为水利水电工程等专业的本科生及研究生的教学用书,也可供从事水轮机调节技术的研究、开发、教学、设计、生产、运行和试验工作的工程技术人员阅读和参考。

前 言

本书是作者近 50 年来从事水轮机调节系统的研究、开发、设计、生产、教学和标准化工作的一个回顾与小结,特别是包含了近 30 年的理论研究和生产实践成果。

本书力求遵循并贯彻 GB/T9652.1—2007《水轮机控制系统技术条件》、GB/T9652.2—2007《水轮机控制系统试验规程》等国家标准。

本书注意理论与实践的密切结合,对水轮机调节系统的基本理论、工作原理、动态仿真和实际应用进行了全面的分析和研究;详细地推导和论证了水轮机调节系统、水轮机控制系统和被控制系统的静态及动态特性;针对水轮机微机调速器微机控制器的结构体系、硬件构成、软件设计和机械液压系统的组成及原理进行了理论联系实际的分析,提供了大量可供工程应用的资料;详细地介绍了基于 MATLAB 的水轮机调节系统的仿真模型建立、空载工况动态仿真、甩负荷动态过程仿真、电网一次调频动态仿真和单机带负荷动态仿真的研究成果;简要介绍了具有代表性的 YT 系列机械液压调速器的技术要点。书中每章都给出了思考题。

本书共分 7 章。第 1 章介绍了水轮机调节系统、水轮机控制系统和被控制系统的基本概念,水轮机调节系统结构图;分析了水轮机调节系统的任务和特点,介绍了水轮机控制系统的发展及类型,简述了机械液压调速器、电气液压调速器和微机调速器的基本概念;研究了微机调速器的典型结构图和传递函数方块图,典型的微机调速器原理结构图;分析了水轮机调节系统现状及发展趋势。

第 2 章分析了水轮机调节系统、水轮机控制系统和被控制系统的静态特性,讨论了永态差值系数 b_0 和转速死区 i_x 的定义及物理意义,人工频率死区和人工开度/功率死区的特性及作用;针对水轮机调节系统的三种基本调节模式(频率调节、开度调节和功率调节),研究了 PID 调节的积分输入变量表达式和频率给定、开度给定和功率给定的物理意义及使用条件;分析了适用于双调整水轮机的微机调速器的协联特性;讨论了水轮机调速器在电网一次调频和二次调频中的作用和水轮机调节系统的电网一次调频静特性。

第 3 章分析了水轮机调节系统、水轮机控制系统和被控制系统的动态(瞬变状态)、小波动态和大波动态的定义和物理概念;引用了 GB/T 9652.1—2007《水轮机控制系统技术条件》对水轮机调节系统和水轮机控制系统的动态特性的主要要求和工程实际对水轮机调节系统动态特性的主要要求;研究了水轮机控制系统、被控制系统和水轮机调节系统的动态特性,重点研究了微机调速器 PID 调节规律、PID 调节的离散算法和 PID 参数选择;研究了水轮机调节系统的稳定性和相对稳定性。

第 4 章介绍了微机调节器中微机控制器的原理框图及微机控制器的选型,分析了微机控制器的主要组成模块的工作原理及特性;分析了水轮机微机调速器对频率测量环节的要求、测周法频率测量的基本原理、基于静态频差和动态频差的频率测量方法和齿盘测频的基本原理;

研究了双微机控制器冗余和双微机控制器交叉冗余原理;给出了微机调速器程序总体框图及调节模式和工作状态程序框图和输入/输出处理、微机调速器的PID调节、检错、故障诊断等程序框图。

第5章绘出了水轮机大型和中小型微机调速器(数字式电液调速器)机械液压系统典型框图;讨论了电液调速器的电液转换器的工作原理及特性、位移控制型和液压控制型主配压阀的工作原理及特性、分段关闭阀和事故配压阀的工作原理及特性;分析了当代有代表意义的机械液压系统的工作原理及特点;介绍了水轮机调速器油压装置的工作原理及特性。

第6章介绍了基于MATLAB的水轮机调节系统仿真模型的建立和研究的基本方法,给出了实用的水轮机调节系统仿真模型;进行了空载频率波动和空载扰动过程、机组甩100%额定负荷过程、接力器不动时间的仿真、水轮机调节系统一次调频特性和孤立电网运行特性的仿真等研究和分析。

考虑到我国自行设计的YT系列机械液压调速器至今仍有一定数量的产品在水电站运行,为了便于有关人员了解YT系列机械液压调速器的主要技术资料,本书的附录简要地介绍了YT系列机械液压调速器的机械液压系统图、结构框图和YT系列机械液压调速器的部件组成;分析了YT系列机械液压调速器的飞摆、引导阀和缓冲器的工作原理和特性;讨论了YT系列机械液压调速器的自动调节工作原理和YT系列机械液压调速器的静态和动态特性。

感谢作者曾经工作过或合作过的高等院校、科研设计及电力试验院所和水轮机调速器生产厂家:华中科技大学、天津电气传动设计研究所、南宁发电设备总厂、长江三峡能事达电气股份有限公司、武汉三联水电控制有限公司、武汉星联控制系统工程有限责任公司、长沙华能自动化控制有限公司、长沙星特自控设备实业有限公司;感谢福建电力有限公司调度通信中心、广西电力试验研究院有限公司、三峡水电站、二滩水电站、乐滩水电站、白山水电站、铜街子水电站、彭水水电站、小峡水电站、田湾河水电站、洪江水电站、大化水电站、新安江水电站、乌江渡水电站、三板溪水电站、棉花滩水电站、水口水电站、天堂水电站等;感谢和作者一起从事水轮机调节系统的研究、开发、设计、生产、教学和标准化工作的专家、教授、高级工程师、工程技术人员、博士研究生、硕士研究生的合作及支持,特别感谢李晃、孔昭年、周秦经、吴应文、饶培棠、葛鸿康等教授级高级工程师多年来在科研、设计、标准化等工作中的支持与合作。

本书主要反映了作者的一些科学研究、技术开发、产品设计、生产实践、教学活动和标准化工作的成果和观点,难免有片面甚至错漏之处,欢迎批评指正。

魏守平

于武汉华中科技大学水电与数字化工程学院

2009年2月5日

联系方式:spwei@263.net

目 录

第 1 章 水轮机调节系统	(1)
1.1 水轮机调节系统的组成	(1)
1.1.1 水轮机调节系统的结构框图	(1)
1.1.2 被控制系统	(2)
1.1.3 水轮机控制系统	(3)
1.2 水轮机调节系统的任务和特点	(6)
1.2.1 水轮机调节系统的任务	(6)
1.2.2 水轮机调节的实质	(8)
1.2.3 水轮机调节系统的特点	(8)
1.2.4 手动水轮机调节	(10)
1.3 水轮机控制系统的发展历程	(11)
1.3.1 水轮机机械液压调速器	(11)
1.3.2 水轮机电气液压调速器	(13)
1.3.3 水轮机微机调速器	(16)
1.3.4 基于现场总线的全数字式微机调速器	(27)
1.4 水轮机调节技术的现状及发展趋势	(29)
1.4.1 我国水轮机调节技术现状	(29)
1.4.2 我国水轮机调节技术发展趋势	(30)
思考题	(31)
第 2 章 水轮机调节系统的静态特性和控制功能	(32)
2.1 水轮机微机调速器的静态特性	(34)
2.1.1 微机调速器静态特性的主要技术参数	(34)
2.1.2 微机调节器的主要输入、输出参量	(36)
2.1.3 微机调速器的永态差值环节及人工开度和功率死区环节	(38)
2.1.4 微机调速器的积分环节输入量	(38)
2.1.5 微机调速器的调节模式	(40)
2.1.6 单调整水轮机微机调速器的静态特性分析	(42)
2.1.7 双调整水轮机微机调速器的协联特性分析	(49)
2.2 被控制系统静态特性	(51)
2.3 水轮机调节系统静态特性	(55)

2.3.1	水轮机调节系统的静态特性	(55)
2.3.2	空载工况下调整频率给定和开度给定的定性分析	(57)
2.3.3	水轮机调节系统的功率调节	(58)
2.4	电网负荷频率控制与水轮机调速器	(61)
2.5	水轮机调节系统控制功能	(65)
2.5.1	水轮机调节系统的工作状态及其转换过程	(65)
2.5.2	水轮机调节系统的运行方式	(69)
2.5.3	水轮机调节系统的故障诊断	(70)
2.5.4	冲击式水轮机喷针的控制	(70)
2.5.5	抽水蓄能水轮机的控制	(71)
2.6	水轮机调节系统试验数据的回归分析	(73)
2.6.1	一元线性回归分析方法	(73)
2.6.2	水轮机调节系统静态特性试验的一元线性回归分析	(75)
	思考题	(76)

第3章 水轮机调节系统的动态特性 (77)

3.1	被控制系统的动态特性	(79)
3.1.1	被控制系统的参数	(79)
3.1.2	水轮机的传递系数结构图	(82)
3.1.3	引水系统的动态特性	(83)
3.1.4	发电机及负荷动态特性	(84)
3.1.5	刚性水锤下被控制系统的动态结构图	(84)
3.1.6	刚性水锤下调节对象的动态特性仿真曲线	(85)
3.2	水轮机微机调速器的动态特性	(87)
3.2.1	水轮机微机调速器的调节规律	(87)
3.2.2	加速度-缓冲型微机调速器的动态特性	(87)
3.2.3	PID型微机调速器的动态特性	(94)
3.2.4	速动时间常数	(99)
3.2.5	PID调节的离散算法	(100)
3.2.6	功率(开度)前向通道开环增量环节的作用	(104)
3.3	水轮机调节系统的动态特性	(106)
3.3.1	机组空载转速摆动特性	(106)
3.3.2	甩100%额定负荷特性	(106)
3.3.3	接力器不动时间	(107)
3.4	水轮机调速器与电网一次调频	(109)
3.4.1	电网的调频	(109)
3.4.2	电网一次调频工况机组功率增量 Δp 与电网频率偏差 Δf 之间的特性	(110)
3.4.3	水轮机调节系统一次调频试验	(112)

3.5	水轮机调节系统状态空间方程和稳定性分析	(113)
3.5.1	水轮机调节系统的状态空间方程	(113)
3.5.2	缓冲型(PID)调速器的水轮机调节系统的状态方程	(115)
3.5.3	采用加速度-缓冲型微机调速器的水轮机调节系统的状态方程	(117)
3.5.4	采用PID型微机调速器的水轮机调节系统状态方程	(118)
3.5.5	调节系统的稳定性和相对稳定性	(120)
3.6	水轮机调节系统PID参数的整定和适应式变参数调节	(124)
3.6.1	空载工况 b_1 、 T_d 、 T_n 的推荐初始参数	(124)
3.6.2	空载工况 K_F 、 K_I 、 K_D 的推荐初始参数	(126)
3.6.3	其他工况下推荐的PID参数	(128)
3.6.4	水轮机调节系统的适应式变参数调节	(129)
	思考题	(132)
第4章	微机调节器	(133)
4.1	微机调节器概述	(133)
4.1.1	微机调节器结构	(133)
4.1.2	选择微机控制器的原则	(134)
4.1.3	微机调节器的频率测量	(137)
4.1.4	微机调节器的单机/双机配置	(137)
4.1.5	人机交互界面	(137)
4.1.6	通信接口	(138)
4.1.7	用户软件	(138)
4.1.8	主要控制器简介	(138)
4.2	微机控制器的单元和模块	(139)
4.2.1	典型的微机控制器	(139)
4.2.2	数字量输入模块	(140)
4.2.3	数字量输出模块	(142)
4.2.4	模拟量I/O模块	(144)
4.2.5	功能模块	(146)
4.3	水轮机微机调速器的频率测量	(149)
4.3.1	频率测量的基本原理	(149)
4.3.2	基于微机控制器高速计数模块的频率测量	(152)
4.3.3	基于静态频差和动态频差的微机控制器频率测量	(155)
4.3.4	齿盘测频	(157)
4.4	微机调节器的双机交叉冗余容错原理	(159)
4.4.1	独立的双微机控制器冗余控制结构	(159)
4.4.2	双微机控制器交叉冗余控制结构	(160)
4.5	微机调节器的程序编制	(162)

4.5.1	微机调速器的程序总体框图	(163)
4.5.2	调节模式和工作状态程序框图	(164)
4.5.3	微机调速器的 PID 调节程序	(167)
4.5.4	编制微机调速器程序注意事项	(168)
思考题		(169)
第 5 章 微机调速器机械液压系统		(170)
5.1	微机调速器机械液压系统原理	(170)
5.1.1	微机调速器的机械液压系统	(170)
5.1.2	大型微机调速器的机械液压系统原理	(171)
5.1.3	中、小型微机调速器的机械液压系统原理	(171)
5.2	微机调速器的电液转换器	(172)
5.2.1	电机驱动机械位移输出型电液转换器	(173)
5.2.2	方向及流量输出型电液转换器	(175)
5.2.3	数字阀	(178)
5.3	微机调速器的主配压阀	(182)
5.3.1	主配压阀的主要技术要求	(182)
5.3.2	液压控制型主配压阀	(184)
5.3.3	机械位移控制型主配压阀	(186)
5.3.4	主配压阀容量估算及选择	(188)
5.4	微机调速器的机械开度限制机构	(190)
5.5	微机调速器的紧急停机阀	(194)
5.6	微机调速器的导叶分段关闭装置	(195)
5.7	微机调速器的事故配压阀	(197)
5.8	微机调速器典型机械液压系统	(198)
5.9	水轮机调速器的油压装置	(208)
思考题		(218)
第 6 章 水轮机调节系统建模及仿真		(219)
6.1	基于 MATLAB 的水轮机调节系统的仿真模型	(219)
6.1.1	水轮机调节系统的 MATLAB 基本仿真模块	(219)
6.1.2	水轮机调节系统的仿真模型	(223)
6.1.3	M-File 程序实例	(224)
6.2	空载频率波动和空载扰动过程仿真	(226)
6.2.1	空载频率波动过程仿真	(226)
6.2.2	空载扰动过程仿真	(230)
6.3	机组甩 100% 额定负荷过程仿真	(237)
6.3.1	PID 参数对甩 100% 额定负荷动态过程影响的仿真	(237)

6.3.2 机组及引水系统参数对甩 100% 额定负荷动态过程影响的仿真	(239)
6.4 继电器不动时间的仿真	(240)
6.5 水轮机调节系统一次调频仿真	(243)
6.5.1 一次调频仿真原理	(243)
6.5.2 积分增益 K_I 取值对于电网一次调频的动态过程影响的仿真	(245)
6.5.3 比例增益 K_P 取值对于电网一次调频的动态过程影响的仿真	(246)
6.5.4 继电器最短开机和关机时间 T_i 取值对于电网一次调频的动态过程影响的仿真	(247)
6.5.5 机组和电网惯性时间常数 T_a 取值对于电网一次调频的动态过程影响的仿真	(247)
6.6 孤立电网运行特性仿真	(249)
思考题	(255)
附录 YT 系列机械液压调速器	(256)
F.1 YT 系列机械液压调速器的结构	(256)
F.2 YT 系列机械液压调速器的组成	(257)
F.3 YT 系列机械液压调速器的主要特点和组成部分	(260)
F.4 调速器各机构动作原理说明	(267)
F.5 YT 系列机械液压调速器的静态和动态特性	(274)
思考题	(276)
参考文献	(277)

第 1 章 水轮机调节系统

水轮机是靠自然水能进行工作的动力机械,与其他动力机械相比,它具有效率高、成本低、能源可再生、不污染环境和便于综合利用等优点。绝大多数水轮机都用来带动交流发电机,构成水轮发电机组。这里所讨论的“水轮机调节”是指对构成水轮发电机组的水轮机的调节。

1.1 水轮机调节系统的组成

1.1.1 水轮机调节系统的结构框图

水轮机调节系统(Hydraulic turbine regulating system)的结构如图 1-1 所示。

水轮机调节系统是由水轮机控制系统(Hydraulic turbine control system)和被控制系统(Controlled system)组成的闭环系统(Closed loop system)。水轮机控制系统是由用于检测被控参量(转速、功率、水位、流量等)与给定参量的偏差,并将它们按一定特性转换成主接力器(Main servomotor)行程偏差的一些设备所组成的系统,也可以称为调节器。水轮机调速器(Hydraulic turbines governor)则是由实现水轮机调节及相应控制的机构和指示仪表等组成的一个或几个装置的总称。从一般意义上讲,水轮机控制系统就是包含油压装置在内的水轮机调速器。被控制系统是由水轮机控制系统控制的系统,它包括水轮机、引水和泄水系统、装有电压调节器的发电机及其所并入的电网及负荷,也可以称为调节对象。

水轮机调节系统的工作过程:水轮机控制系统的测量元件把被控制系统的发电机组的频率 f (与其成比例的被控制机组的转速 n)、机组有功功率 P_g 、机组运行水头 H 、水轮机流量 Q 等参量测量出来,将水轮机控制系统的频率给定、功率给定、接力器开度给定等给定信号和接力器实际开度等反馈信号进行综合,由放大校正元件处理后经接力器驱动水轮机导叶机构及轮叶机构,改变被控制的水轮发电机组的功率及频率。

众所周知,如果系统的输出量对系统的输入控制作用没有影响,则这个系统是开环系统(Open loop system)。因此,一个输入控制量,便有一个相应固定的输出量与之对应,系统的控制精度取决于系统参数的校准。当系统出现扰动或参数变化时,原来相应固定的输出量就会变化,所以,采用开环控制系统是不可能构成精确的控制系统的。

从图 1-1 可以看出,水轮机调节系统的输出参数(包括机组(电网)频率、机组功率等)对系统的控制作用有着直接的影响,一般称为反馈作用(Feedback effect)。水轮机调节系统是一个闭环系统,水轮机控制系统(调速器)自身也是一个闭环系统。输入信号与反馈信号之差称为误差。误差信号施加在控制器的输入可以减少系统的误差,并使系统的输出量趋于给定值。闭环系统就是利用反馈来减小系统的误差的。当然,对于一个闭环调节系统来说,系统的稳定

性(Stability)始终是一个重要问题。闭环控制(调节)系统的动态过程及动态品质(性能)比开环系统的复杂得多,因为,即使闭环调节系统达到动态稳定状态,也还有可能会出现动态过程中超调(Overcontrol)或衰减振荡(Damply oscillation)的现象。

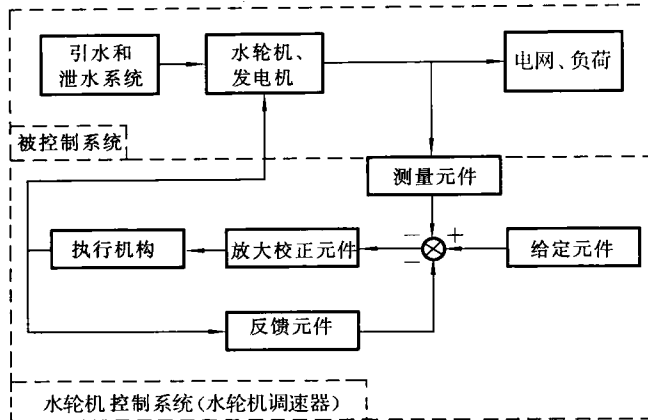


图 1-1 水轮机调节系统的结构框图

1. 1. 2 被控制系统

水轮机调节系统的被控制系统是由水轮机调速器调节的系统,包括引水和泄水系统、水轮机、装有电压调节器的发电机及其所并入的电网和负荷。从调节的意义出发,也可以称为调节对象或被调节对象。

被控制系统的主要状态参数如下。

1. 水轮机

1) 水轮机流量 Q (Hydraulic turbine discharge)

① 流量偏差 (Discharge deviation): 水轮机流量 Q 与某一基准流量 Q_0 之差, $\Delta Q = Q - Q_0$, 单位 m^3/s 。

② 流量相对偏差 (Relative deviation of discharge): 水轮机流量偏差 ΔQ 与额定流量 Q_r 之比, $q = \Delta Q / Q_r$ 。

2) 水头 H (Head)

① 水头偏差 (Head deviation): 水头 H 与某一基准水头 H_0 之差, $\Delta H = H - H_0$, 单位 m 。

② 水头相对偏差 (Relative deviation of head): 水头偏差 ΔH 与水轮机额定水头 H_r 之比, $h = \Delta H / H_r$ 。

2. 发电机

1) 输出功率 (Power output)

① 发电机输出功率 (Power output of the generator): 发电机输出的瞬时电功率 P_G , 单位 kW 。

② 相对(输出)功率 (Relative output power): 输出功率 P_G 与额定功率 P_{Gr} 之比, $p =$

P_G/P_{Gr} 。

③ 输出功率偏差 (Power output deviation): 输出功率 P_G 相对于某一基准(给定)输出功率 P_{G0} 之差, $\Delta P_G = P_G - P_{G0}$, 单位 MW。

④ 输出功率相对偏差 (Relative deviation of power output): 输出功率偏差 ΔP_G 与额定功率 P_{Gr} 之比, $x_p = \Delta P_G / P_{Gr}$ 。

2) 转矩 (Torque)

① 转矩偏差 (Torque deviation): 输出功率偏差除以瞬时角速度, ΔM , 单位 kW/rad · s⁻¹。

② 转矩相对偏差 (Relative deviation of torque): 转矩偏差 ΔM 与额定转矩 M_r 之比, $m = \Delta M / M_r$ 。

3) 水轮发电机组转速和发电机及电网频率

① 水轮发电机组转速 (Speed): 水轮机的旋转速度 n , 单位 r/min。

② 水轮发电机组额定转速 (Rated speed): 设计时选定的水轮机稳态转速 n_r , 单位 r/min。

③ 水轮发电机组相对转速 (Relative speed): 水轮机转速 n 与额定转速 n_r 之比 n_r 。

④ 水轮发电机组转速偏差 (Speed deviation): 取瞬间实际转速 n 与基准转速 n_0 之差, $\Delta n = n - n_0$, 单位 r/min。

⑤ 水轮发电机组转速相对偏差 (Relative deviation of speed): 转速偏差 Δn 与额定转速 n_r 的比值, $x_n = \Delta n / n_r$ 。

⑥ 频率 (Frequency): 发电机或电网电压的每秒钟周期数, 用符号 f 表示, 单位 Hz。在水轮发电机组采用同步发电机时, $f = pn/60$, p 为发电机极对数, 水轮发电机组的频率 f 与转速 n 正比于发电机的极对数 p ; 当被控制的水轮发电机组并入电网时, 水轮发电机组的转速 n 正比于电网频率 f_0 ; 水轮发电机组的额定转速 n_r 随发电机极对数不同而不同。在我国, 水轮发电机组和电网的电压额定频率为 50 Hz, 即 $f_r = 50$ Hz; 而美国和加拿大等国, 水轮发电机组和电网的电压额定频率则为 60 Hz。以相对值表示, 水轮发电机组相对转速和水轮发电机组转速的相对偏差, 就等于水轮发电机组相对频率和水轮发电机组频率的相对偏差。所以, 在本书的叙述和分析中, 将以水轮发电机组的频率作为主要变量, 有时为了习惯用法或便于叙述, 也采用水轮发电机组转速的概念。

1.1.3 水轮机控制系统

水轮机控制系统是用来检测被控参量(转速、功率、水位、流量等)与给定参量的偏差, 并将它们按一定特性转换成主接力器行程偏差的一些设备所组成的系统。水轮机调速器是水轮机控制系统的主体, 水轮机调速器是由实现水轮机调节及相应控制的机构和指示仪表等组成的一个或几个装置的总称。

水轮机调速器可以按照调速器的结构特点、调速器的被控制系统、调速器使用的油源、调速器的容量等原则分类。

1. 按照调速器的结构特点分类

1) 机械液压调速器 (Mechanical hydraulic governor)

测速、稳定及反馈信号用机械方法产生, 经机械综合后通过液压放大部分实现驱动水轮机

接力器的调速器称为机械液压调速器。

2) 电液调速器 (Electric-hydraulic governor)

电液调速器又称为电气液压调速器。电液调速器是指用电气原理实现检测被控参量、稳定环节及反馈信号,通过电液转换和液压放大系统实现驱动水轮机接力器的调速器。

3) 微机调速器 (Micro-computer based governor)

微机调速器是以微机为核心进行信号测量、变换与处理的电液调速器。

① 电磁换向阀式调速器 (Governor with solenoid direction valve): 在微机调速器中,用脉冲宽度调制方法将 PID 调节器的输出信号通过电磁换向阀来控制油进出接力器开启、关闭腔的流量和方向的调速器称为电磁换向阀式调速器。

② 电动机式调速器 (Governor with motor driven gate operator): 用电动机经减速装置来控制水轮机导水机构的调速器。

③ 电子负荷调节器 (Electronic load controller): 利用电子电路组成的能耗式调速器。

④ 操作器 (Position operator 或 Gate operator): 不对机组施加自动调节作用,仅能实现机组启动、停机,并网后能使机组带上预定负荷,以及接受事故信号后能使机组自动停机的装置。

2. 按照调速器的被控系统分类

1) 单调整调速器 (Single regulating governor)

单调整调速器是能实现混流式、轴流定桨式等水轮机导叶调整的调速器。

2) 双调整调速器 (Double regulating governor)

能实现转桨式和冲击式水轮机导叶或喷针和转轮叶片或折向器/偏流器双重调整的调速器称为双调整调速器。

3) 水泵水轮机调速器 (Governor for pump-turbine)

用于水泵水轮机控制和调节的调速器称为水泵水轮机调速器。

3. 按照调速器使用的油源分类

1) 通流式调速器 (Governor without pressure tank 或 Through flow type governor)

由油泵直接向水轮机控制系统供油、没有压力罐的调速器是通流式调速器。

2) 蓄能器式调速器 (Governor with accumulator)

蓄能器式调速器是由蓄能器向水轮机控制系统供油的调速器。其中,压力罐式调速器 (Governor with pressure tank) 则是由压力罐 (非隔离式蓄能器) 向水轮机控制系统供油的调速器。

4. 按照调速器的容量分类

调速器按照容量系列可以分为大型、中型、小型和特小型调速器。其中,大型调速器自身不包括接力器,可以按照调速器主配压阀的直径分类;中型、小型和特小型调速器则按照其控制的接力器容量分类;水轮机调速器的油压装置按压力罐容积和额定油压分类。按照调速器容量系列分类的情况如表 1-1 所示,额定油压等级可分为 2.5 MPa、40 MPa 和 6.3 MPa。

对于中型、小型和特小型调速器,按照接力器容量分类的情况如表 1-2 所示。接力器容量系指在所需的最低操作油压下的容量。

表 1-1 调速器总体系列分类

类别	不带压力罐及接力器的调速器(a)	带压力罐及接力器的调速器	通流式调速器	液压操作器	电动操作器	电子负荷调节器
系列	接力器容量/ $N \cdot m$					配套机组功率/ kW
大型	>50 000					
中型	>10 000 ~50 000(b)	>10 000 ~50 000		>10 000 ~50 000	>10 000 ~50 000	
小型	>3 000 ~10 000(b)	>1 500 ~10 000		>3 000 ~10 000	>3 000 ~10 000	40,75,100
特小型	170~3 000(b)	170~1 500	170~3 000	170~3 000	350~3 000	3,8,18

(a) 系指调速器能配置的接力器容量；

(b) 系指单喷嘴冲击式水轮机调速器。

表 1-2 带压力罐及接力器的调速器及通流式调速器接力器容量及最短关闭时间

类 型		接力器容量/ $N \cdot m$	接力器最短关闭时间/s
带压力罐及接力器的调速器	等压接力器	50 000	3
		30 000	
		18 000	
		10 000	
		6 000	
		3 000	
	差压接力器	3 000	2.5
		1 500	
		750	
		350	
通流式调速器	3 000	2.5	
	1 500		
	750		
	350		

对于大型调速器,按照主配压阀直径分类的情况如表 1-3 所示。

容量选择时应遵循下列原则:与调速器相配的外部管道,设计流速一般不超过 5 m/s ;计算调速器容量的油压时,应按正常工作油压的下限考虑;主配压阀及连接管道的最大压力降应不超过额定油压的 $20\% \sim 30\%$;接力器最短关闭时间应满足机组提出的要求。

表 1-3 主配压阀的压力降等于 1.0 MPa 时主配压阀输油流量

主配压阀直径 d/mm	输油流量 $Q/(\text{L/s})$
10 (a)	0.2~0.5
16 (a)	0.5~1.25
25	1.25~2.5
35	2.5~5
50	5~12
80	12~25
100	25~50
150	50~100
200	100~150

注：(a) 一级放大系统用引导阀直径表示。

5. 油压装置的容量系列

水轮机调速器的油压装置容量系列如表 1-4 所示。

表 1-4 油压装置容量系列

类 型	分 离 式	组 合 式
容量系列/ m^3	1	0.3
	1.6	0.6
	2.5	1
	4	1.6
	6	2.5
	8	4
	10	6
	12.5	
	16(或 16/2)	
	20(或 20/2)	
	25(或 25/2)	
	32/2	
	40/2	

1.2 水轮机调节系统的任务和特点

1.2.1 水轮机调节系统的任务

水轮发电机组把水能转变为电能供工业、农业、商业及人民生活等用户使用。用户在用电过程中除要求供电安全、可靠外，对电网电能质量也有十分严格的要求。按我国电力部门规定，电网的额定频率为 50 Hz，大电网允许的频率偏差为 ± 0.2 Hz。对我国的中小电网来说，系统负荷波动有时甚至会达到其总容量的 5%~10%，即使是大的电力系统，其负荷波动也往往会

达到其总容量的2%~3%。电力系统负荷的不断变化,导致了系统频率的波动。因此,不断地调节水轮发电机组的输出功率,维持机组的转速(频率)在额定转速的规定范围内,是水轮机调节的基本任务。

早期的机械液压调速器和电液调速器的主要作用是根据偏离额定值的机组频率偏差,调节水轮机导叶和轮叶机构,维持机组水力功率与电力功率平衡,从而使机组频率保持在额定频率的允许范围之内,这时的水轮机调速器主要是一个机组频率调节器(Frequency regulator)。

现代水电厂和电力系统的发展,对水轮机调速器的性能及功能提出了新的和更严格的要求。在微机调速器发展、完善和广泛应用的同时,水电厂自动发电控制(AGC)系统、电网能量管理系统(EMS)也已日趋成熟并进入了实用化的阶段;现代电力系统中,区域电网容量迅速加大,区域电网间联网并要求进行交换功率控制;大、中型和多数小型水轮发电机组的主要运行方式是并入大的区域电网运行,在这种运行方式下,电网的负荷频率控制(LFC)是通过电网AGC系统和电厂AGC系统控制水电机组的水轮机调速器及火电机组的调速系统来实现的。

当机组并入大电网运行时,水轮机调速器主要起到电网一次调频的频率调节器和电网二次调频及电网负荷频率控制的功率控制器的作用。所以,原来所说的水轮机调节系统的功能有了增加和扩展:在完成水轮机频率调节任务的同时,还与电网AGC系统和电厂AGC系统相接口,具有一些与电网控制有关的附加功能。因此,水轮机调节系统的范围除包含原来的机组频率调节的内容之外,还要完成电网AGC系统和电厂AGC系统下达的一次调频、二次调频和区域电网间交换功率控制等任务。

水轮机调速器是水电站水轮发电机组的重要辅助设备,它还与电站二次回路或计算机监控系统相配合,完成水轮发电机组的开机、停机、增减负荷、紧急停机等任务。

综上所述,水轮机调速器的主要任务如下。

1. 作为水轮发电机组或其并入电网的频率调节器

① 在被控制的水轮发电机组处于空载工作状态时,水轮机调速器作为机组的频率调节器,调节并维持机组频率在额定频率附近,跟踪电网频率,使被控机组能尽快同期、并入电网运行。

② 在被控制的水轮发电机组并入电网运行时,水轮机调速器作为电网的频率调节器:a. 被控制的水轮发电机组并入大电网运行时,水轮机调速器根据电网规定完成电网一次调频的任务;b. 被控制的水轮发电机组单机带负荷或在小电网中运行时,水轮机调速器的任务是调节被控机组或小电网的频率在额定频率附近,尽量减小负荷突变时的动态频率升高或降低,并加快不正常频率向额定频率恢复的速度;c. 被控制的水轮发电机组甩负荷时,水轮机调速器调节被控制机组到空载状态运行。

2. 作为被控机组的功率调节器

在被控制的水轮发电机组并入电网运行时,水轮机调速器接收并执行电网调度通过电网AGC系统和电厂AGC系统下达的机组给定功率的指令,调节水轮机组有功功率,满足电网二次调频的要求。

3. 作为被控制机组的工况控制器

在水电站微机监控系统等的统一控制下,协调完成被控制机组的开机、停机、增加或减小负荷、甩负荷、调相和紧急停机等工作状态及过程,包括抽水蓄能机组的抽水工况和发电工况