

Simulation

of Hydraulic Turbine Regulating System

水轮机调节系统 仿真

魏守平 著

 华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

Simulation

of Hydraulic Turbine Regulating System

水轮机调节系统 仿真

魏守平 著

常州大学图书馆
藏书章



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 提 要

本书对水轮机调节系统的基本理论、工作原理和动态仿真进行了系统、深入、全面的分析和研究,详细地分析、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;建立了基于 MATLAB 的水轮机调节系统的仿真模型;提出并成功实现了“1 仿真目标-3 数值仿真”的仿真策略,运用水轮机调节仿真决策支持系统对水轮机调节系统的机组开机、机组空载频率波动、机组空载频率扰动、接力器不动时间、机组甩负荷、电网一次调频和孤立电网等运行状态及动态过程进行了详细的仿真和深入的分析,取得了一些新的成果。

本书可作为水利水电工程类专业的本科生及研究生的参考教材,可供从事水轮机调节理论研究、技术开发和设计、电站设计、设备制造、电站运行和维护检修、高等院校教师等专业人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

水轮机调节系统仿真/魏守平 著. —武汉:华中科技大学出版社,2011.9
ISBN 978-7-5609-7148-3

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

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 102586 号

水轮机调节系统仿真

魏守平 著

责任编辑:谢燕群 叶见欣

封面设计:潘 群

责任校对:朱 霞

责任监印:张正林

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:710mm×1000mm 1/16

印 张:29.25

字 数:670 千字

版 次:2011 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:80.00 元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

前 言

《水轮机调节系统仿真》是作者继《现代水轮机调节技术》、《水轮机控制工程》和《水轮机调节》等3本著作以后的又一专著。本书是作者从事水轮机调节系统理论研究和工程应用工作的一个回顾与总结,主要包括了作者近30年来在水轮机调节领域的研究成果。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。本书可作为水利水电工程等专业的本科生及研究生的参考教材,可供从事水轮机调节系统的理论研究、技术开发和设计、电站设计、设备制造、电站运行和维护检修的技术人员、高等院校教师等专业人员阅读和参考。

基于作者在水轮机调节系统的研究、开发、设计、生产、仿真、教学和标准化工作中的成果和经验,本书以水轮机调节系统基本理论、工作原理和动态仿真为中心,介绍了下列重点与难点问题,以期对读者能有实质性的、形象化的帮助。

1. 深入浅出地说明了水轮机调节系统的基本原理和工作特点

本书以水轮机调节系统仿真及分析为中心,对水轮机调节系统的基本理论、工作原理和动态仿真进行了系统、深入、全面的分析和研究,详细地分析、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,建立了较为系统和全面的水轮机调节系统理论体系;本书基于水力发电生产过程理论和技术、自动控制系统理论和技术、微型计算机控制理论和技术、机械液压控制系统理论和技术,建立了水轮机调节系统的仿真模型,成功开发了水轮机调节仿真决策支持系统,把典型的水轮机调节系统动态过程直观而形象地展示给读者。本书有助于深入掌握水轮机调节系统的基本理论和工作原理。

2. 深入浅出地分析了被控制系统参数和调速器参数对水轮机调节系统动态特性的影响

基于对众多水轮机调节系统的现场试验资料和仿真结果的整理和分析,本书将水轮机调节系统的空载频率扰动、机组甩100%额定负荷和孤立电网运行的动态过程特性,划分为迟缓型(S型)、优良型(B型)和振荡型(O型)等3个有代表性的典型动态过程,分析了典型动态特性与水轮机调节系统参数之间的关系,以便于进一步研究水轮机调节系统扰动型动态过程的机理和寻求改善其动态过程性能的方法。鉴于机组水流时间常数 T_w 和机组惯性时间常数 T_a 的数值及其比值对水轮机调节系统动态特性的重要影响,作者引入了“机组惯性比率 $R_I = T_w/T_a$ ”的概念,重点研究了机组惯性比率 R_I 对于水轮机调节系统动态特性的影响。

在对水轮机调节系统进行仿真时,本书提出并成功实现了“1 仿真目标-3 数值仿真”的仿真策略。众所周知,在系统其他参数相同的条件下,针对 1 个(组)仿真目标参数数值的仿真,只能得到一个孤立的仿真动态过程;针对 2 个(组)仿真目标参数数值的仿真,可以得到对应的互为比较的 2 个仿真动态过程;而针对 3 个(组)仿真目标参数数值的仿真,则可以得到对应的互为比较的 3 个仿真动态过程。“1 仿真目标-3 数值仿真”的仿真策略,为进行参数变化对动态过程影响分析提供了更为形象直观的结果。通过该策略,除了能清晰地观察和分析单个动态过程的动态品质之外,还能对 3 组仿真目标参数对应的仿真波形进行比较和分析,得出这个(组)仿真目标参数数值增大或减小时,被仿真系统动态特性品质的变化趋势,从而做出较为全面的判断和结论,加深对仿真目标参数的作用机理及其与其他参数关系的认识和理解,为我们解决工程实际问题提供直观、清晰和快速的决策支持。

本书运用水轮机调节仿真决策支持系统,对水轮机调节系统的机组开机、机组空载频率波动、机组空载频率扰动、接力器不动时间、机组甩负荷、电网一次调频和孤立电网等运行状态及动态过程,进行了详细的仿真和深入的分析,得到了一些新的成果。

3. 根据水电站现场试验得到的存在问题的水轮机调节系统动态特性,在水轮机调节仿真决策支持系统中,恰当地整定调速器的 PID 参数,从而得到相应的优化后的水轮机调节系统动态特性

利用水轮机调节仿真决策支持系统,可以对水轮机调节系统建立包括非线性环节在内的数学模型并进行仿真,可以对它的动态特性进行经济、方便、直观、迅速的研究。如机组甩 100% 额定负荷和接力器不动时间等许多在现场无法进行或不宜多次重复进行的试验,都可以利用水轮机调节仿真决策支持系统对特定的动态过程进行仿真和分析。

以机组甩负荷动态过程为例,其参数调整过程如下:特性分析,根据电站试验得到存在问题的机组甩负荷特性来判断其动态过程类型;特性拟合,按照电站及机组的实际参数(T_s 、 T_w)和水轮机微机调速器的实际参数设定仿真基本参数值,调整水流修正系数 K_V 、机组自调节系数 e_n 和机组甩负荷数值,拟合实测的机组甩负荷特性和仿真的机组甩负荷特性,使二者具有尽量相近的甩负荷动态波形;参数优化,在水轮机调节仿真决策支持系统中改变 PID 参数进行仿真,消除和改善原甩负荷动态波形过程存在的问题,求得与改善后甩负荷动态波形对应的 PID 参数;试验验证,按照仿真得到的 PID 参数整定微机调速器参数,在电站进行甩负荷试验以验证修改 PID 参数后的实际机组甩负荷动态性能。

本书主要反映了作者的一些科学研究、仿真分析、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

2011 年 7 月 5 日

目 录

第 1 章 水轮机调节系统概述	(1)
1.1 水轮机调节系统的组成	(1)
1.2 水轮机调节系统的任务和特点	(7)
1.3 水轮机控制系统的发展历程	(12)
1.4 水轮机调节技术的现状及发展趋势	(31)
第 2 章 水轮机调节系统的静态特性和控制功能	(34)
2.1 水轮机微机调速器的静态特性	(36)
2.2 被控制系统静态特性	(55)
2.3 水轮机调节系统静态特性	(58)
2.4 电网负荷频率控制与水轮机调速器	(65)
2.5 水轮机调节系统控制功能	(70)
2.6 水轮机调节系统试验数据的回归分析	(78)
第 3 章 水轮机调节系统的动态特性	(82)
3.1 被控制系统的动态特性	(84)
3.2 水轮机微机调速器的动态特性	(93)
3.3 水轮机调节系统的动态特性	(114)
3.4 水轮机调速器与电网一次调频	(117)
3.5 水轮机调节系统状态空间方程和稳定性分析	(121)
3.6 水轮机调节系统 PID 参数的整定和适应式变参数调节	(134)
第 4 章 水轮机调节动态特性仿真与决策支持	(143)
4.1 水轮机调节系统仿真与决策支持概述	(143)
4.2 水轮机调节系统的 MATLAB 基本仿真模块	(147)
4.3 M 文件程序实例	(156)
4.4 水流修正系数 K_V 、机组自调节系数 e_n 和机组惯性比率 R_i	(157)
4.5 水轮机调节系统受到扰动后的典型动态过程	(163)
4.6 水轮机控制系统的静态及动态特性指标适用工作条件	(170)

第 5 章 水轮机调节系统机组开机特性仿真及分析	(172)
5.1 水轮发电机组开机特性	(172)
5.2 水轮发电机组 2 段接力器开度开机特性仿真	(174)
5.3 水轮发电机组闭环开机特性仿真	(189)
5.4 水轮发电机组 3 段等加速度闭环开机特性仿真	(195)
第 6 章 水轮机调节系统空载频率波动特性仿真及分析	(205)
6.1 水轮发电机组空载频率波动特性	(205)
6.2 水轮机导水机构滞环对水轮发电机组空载频率波动特性影响仿真	(207)
6.3 调速器电液随动系统死区对水轮发电机组空载频率波动特性影响仿真	(209)
6.4 调速器比例增益对水轮发电机组空载频率波动特性影响仿真	(211)
6.5 调速器积分增益对水轮发电机组空载频率波动特性影响仿真	(214)
6.6 调速器微分增益对水轮发电机组空载频率波动特性影响仿真	(218)
6.7 调速器 PID 参数对水轮发电机组空载频率波动特性影响仿真	(220)
6.8 接力器响应数间常数对水轮发电机组空载频率波动特性影响仿真	(222)
6.9 水轮发电机组参数对水轮发电机组空载频率波动特性影响仿真	(224)
6.10 水轮发电机组空载频率波动特性综合分析	(228)
第 7 章 水轮机调节系统空载频率扰动特性仿真及分析	(230)
7.1 水轮机调节系统空载频率扰动特性	(230)
7.2 调速器比例增益对机组空载频率扰动特性影响仿真	(233)
7.3 积分增益对机组空载频率扰动特性影响仿真	(242)
7.4 微分增益对机组空载频率扰动特性影响仿真	(250)
7.5 PID 参数对机组空载频率扰动特性影响仿真	(256)
7.6 水流修正系数对机组空载频率扰动特性影响仿真	(258)
7.7 接力器响应时间常数对机组空载频率扰动特性影响仿真	(262)
7.8 PID 参数对机组空载频率向上/向下扰动特性影响仿真	(264)
7.9 接力器关闭时间、开启时间对机组空载频率向上/向下扰动特性影响仿真	(268)
7.10 机组自调节系数对机组空载频率扰动特性影响仿真	(272)
7.11 机组惯性时间常数对机组空载频率扰动特性影响仿真	(275)
7.12 水轮发电机组空载频率扰动特性综合分析	(279)

第 8 章 水轮机调节系统接力器不动时间特性仿真及分析	(283)
8.1 水轮机调节系统接力器不动时间	(283)
8.2 频率测量周期对接力器不动时间影响的仿真	(286)
8.3 微机控制器计算周期对接力器不动时间影响的仿真	(295)
8.4 调速器电液随动系统死区对接力器不动时间影响的仿真	(299)
8.5 调速器 PID 参数对接力器不动时间影响的仿真	(305)
8.6 接力器响应时间常数对接力器不动时间影响的仿真	(310)
8.7 机组惯性时间常数对接力器不动时间影响的仿真	(313)
8.8 机组甩不同负荷值对接力器不动时间影响的仿真	(315)
8.9 接力器不动时间仿真综合分析	(319)
第 9 章 水轮机调节系统机组甩负荷特性仿真与分析	(326)
9.1 水轮机调节系统机组甩负荷特性	(326)
9.2 比例增益对机组接力器 1 段关闭甩负荷特性影响仿真	(329)
9.3 调速器积分增益对机组接力器 1 段关闭甩负荷特性影响仿真	(336)
9.4 调速器微分增益对机组接力器 1 段关闭甩负荷特性影响仿真	(342)
9.5 PID 参数对机组接力器 1 段关闭甩负荷特性影响仿真	(345)
9.6 水流修正系数对机组接力器 1 段关闭甩负荷特性影响仿真	(350)
9.7 接力器关闭时间对接力器 1 段关闭机组甩负荷特性影响仿真	(354)
9.8 机组自调节系数对机组接力器 1 段关闭甩负荷特性影响仿真	(357)
9.9 机组惯性时间常数对机组接力器 1 段关闭甩负荷特性影响仿真	(360)
9.10 第 1 段关闭时间对机组接力器 2 段关闭甩负荷特性影响仿真	(363)
9.11 第 2 段关闭时间对机组接力器 2 段关闭甩负荷特性影响仿真	(366)
9.12 2 段关闭拐点对机组接力器 2 段关闭甩负荷特性影响仿真	(369)
9.13 接力器关闭特性对机组接力器 2 段关闭甩负荷特性影响仿真	(373)
9.14 水轮发电机组甩负荷特性综合分析	(378)
第 10 章 水轮机调节系统一次调频特性仿真及分析	(382)
10.1 水轮机调节系统机组一次调频特性	(382)
10.2 调速器比例增益对电网一次调频特性影响仿真	(387)
10.3 调速器积分增益对电网一次调频特性影响仿真	(393)
10.4 调速器微分增益对电网一次调频特性影响仿真	(399)
10.5 调节对象参数对电网一次调频特性影响仿真	(402)
10.6 电网频率偏差上扰和下扰 PID 参数对电网一次调频特性影响仿真 ..	(406)
10.7 电网一次调频特性综合分析	(408)

第 11 章	水轮机调节系统机组孤立电网运行特性仿真及分析	 (411)
11.1	水轮机调节系统机组孤立电网运行特性	 (411)
11.2	调速器比例增益对孤立电网运行特性影响仿真	 (415)
11.3	调速器积分增益对孤立电网运行特性影响仿真	 (426)
11.4	调速器微分增益对孤立电网运行特性影响仿真	 (433)
11.5	PID 参数对孤立电网运行特性影响仿真	 (435)
11.6	被控制系统参数对孤立电网运行特性影响仿真	 (441)
11.7	机组突加不同负荷对孤立电网运行特性影响仿真	 (448)
11.8	孤立电网运行特性仿真结果综合分析	 (453)
参考文献		 (456)

第 1 章 水轮机调节系统概述

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

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

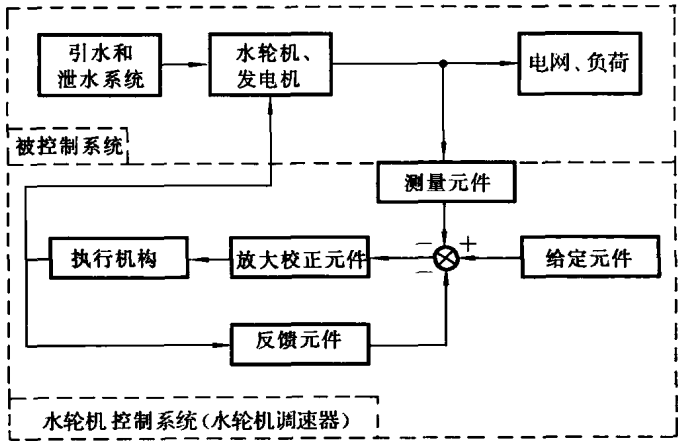


图 1-1 水轮机调节系统的结构框图

水轮机调节系统是由水轮机控制系统(Hydraulic turbine control system)和被控系统(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,有一个输入控制量,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端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。

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

(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, $p_G = P_G / P_{Gr}$ 。

(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

(1) 转矩偏差 (Torque deviation): 输出功率偏差除以瞬时角速度, 用 ΔM 表示, 单位 $\text{kW/rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(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 为发电机的极对数, 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_n ; 水轮发电机组的额定转速 n_r 随发电机的极对数不同而不同。在我国, 水轮发电机组和电网的电压额定频率为 50 Hz, 即 $f_r = 50 \text{ Hz}$; 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, 本书在叙述和分析中, 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 水轮机控制系统调速器的类型

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、调速器的容量等分类。

1. 按照调速器的结构特点分类

1) 机械液压调速器

调速、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(Mechanical hydraulic governor)。

2) 电液调速器

电液调速器(Electric-hydraulic governor)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

微机调速器(Micro-computer based governor)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. 按照调速器的被控制系统分类

1) 单调整调速器

单调整调速器(Single regulating governor)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

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(Double regulating governor)。

3) 水泵水轮机调速器

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(Governor for pump-turbine)。

3. 按照调速器使用的油源分类

1) 通流式调速器

由油泵直接向水轮机控制系统供油、没有压力罐的调速器称为通流式调速器 (Governor without pressure tank 或 Through flow type governor)。

2) 蓄能器式调速器

蓄能器式调速器 (Governor with accumulator) 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等四类。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、4.0 MPa 和 6.3 MPa。

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/ $\text{N} \cdot \text{m}$					配套机组功率/ kW
大型	$>50\,000$					
中型	$>10\,000$ $\sim 50\,000$ (b)	$>10\,000$ $\sim 50\,000$		$>10\,000$ $\sim 50\,000$	$>10\,000$ $\sim 50\,000$	
小型	$>3\,000$ $\sim 10\,000$ (b)	$>1\,500$ $\sim 10\,000$		$>3\,000$ $\sim 10\,000$	$>3\,000$ $\sim 10\,000$	40, 75, 100
特小型	$170 \sim 3\,000$ (b)	$170 \sim 1\,500$	$170 \sim 3\,000$	$170 \sim 3\,000$	$350 \sim 3\,000$	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。

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。

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%~30%；接力器最短关闭时间应满足机组提出的要求。

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/ $\text{N} \cdot \text{m}$	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	2.5
		6 000	
		3 000	
	差压接力器	3 000	
		1 500	
		750	
		350	
通流式调速器		3 000	2.5
		1 500	
		750	
		350	

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,维持机组的频率(转速)在额定频率(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,即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,水轮机调节系统的任务除原来的机组频率调节之外,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运行的频率调节器

(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:①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;②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;③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之间的转换的控制任务。

1.2.2 水轮机调节的实质

水轮发电机组转动部分的运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_1 - M_2 \quad (1-1)$$

式中: J ——机组转动部分的惯性矩($\text{kg} \cdot \text{m}^2$);

$\omega = \frac{\pi n}{30}$ ——机组转动角速度(rad/s);