

· 852151

5812

8744

高等学校试用教材

水轮机调节

华中工学院 郑莉媛

编

清华大学 朱爱菁

GAO DENG XUE
XIAO CAI



机械工业出版社

12

44

高等学校试用教材

水 轮 机 调 节

华中工学院 郑莉媛
清华大学 朱爱普 编



机械工业出版社

本书内容包括水轮机调节的基本任务和特点、调速器自动调速元件及其数学模型、各类调速器、水轮机调节系统动态分析、调节保证计算以及调节设备的选择等。

本书是高等工业学校水力机械专业的任选教材，也可供从事水轮机调节方面工作的工程技术人员参考。

水 轮 机 调 节

华中工学院 郑莉媛 编
清华大学 朱爱菁

*
责任编辑：王存新 责任校对：李广孚
版式设计：乔 玲

*
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)
(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本 787×1092¹/₁₆·印张12¹/₂·插页3·字数337千字
1988年6月北京第一版·1988年6月北京第一次印刷
印数 0,001—1,400·定价：2.50元

*
ISBN 7-111-00181-8/TK·37(课)

前 言

本书是根据 1984 年 9 月高等工业学校流体机械教材分编审委员会制定的教学计划、教学大纲以及审定的编写大纲编写的。1985 年 9 月由分编审委员对《水轮机调节》教材的第一、四章试编稿进行了评审，并责成华中工学院郑莉媛讲师与清华大学朱爱菁副教授编写。

本书主要内容包括：水轮机调节基本知识、调速器自动调速元件及其数学模型、各类调速器、水轮机调节系统小瞬变工况及大瞬变工况分析、调节保证计算及调节设备的选择。

本书是高等工业学校水力机械专业本科的任选教材，也可供从事水轮机调节方面工作的工程技术人员参考。

本书在试编稿的基础上，由编者收集资料、调查研究、多次讨论后写成。第一、二、四章及第五章前四节由郑莉媛执笔；第三、六章及第五章的第五节由朱爱菁执笔。全书由甘肃工业大学王膺福副教授主审。主审在仔细审稿过程中提出了许多宝贵意见，在此表示衷心感谢。在编写过程中，编者还得到哈尔滨大电机研究所、天津电气传动研究所、天津水电控制设备厂、金城江水电设备厂等单位有关同志的热诚帮助和支持，在此一并表示感谢。

编者在编写过程中，虽力求体现水力机械专业的特色，尽量汲取国内外先进经验、科研成果以及兄弟院校的教学经验，但限于水平，错误和缺点在所难免。恳请读者予以批评指正，不胜感谢。

编者

1987年5月

目 录

第一章 水轮机调节系统概述	1
第一节 水轮机调节的基本任务和特点	1
第二节 水轮发电机组的频率调节	4
第三节 水轮机调速器的发展与分类	14
第二章 调速器的主要自动调速元件及其数学模型	16
第一节 概述	16
第二节 测速装置	21
第三节 综合、放大元件	37
第四节 校正装置	59
第三章 水轮机调速器	70
第一节 机械液压型调速器	70
第二节 电气液压型调速器	80
第三节 微处理机调速器简介	94
第四章 水轮机调节系统动态分析	104
第一节 调节对象的数学模型	104
第二节 调速系统动态特性	118
第三节 调速系统品质要求	131
第四节 水轮机调节系统稳定性分析	131
第五节 水轮机调节系统最佳参数的整定	143
第五章 调节保证计算	150
第一节 概述	150
第二节 水锤压力计算	152
第三节 转速变化计算	160
第四节 改善大波动过渡过程的措施	163
第五节 调节保证电算法	168
第六章 调节设备的选型计算	185
第一节 概述	185
第二节 调速器容量选择	186
第三节 油压装置及其选型计算	193
主要参考文献	195

第一章 水轮机调节系统概述

第一节 水轮机调节的基本任务和特点

水力发电厂是利用水能生产电能的工厂，它是电力系统的一个重要组成部分。图 1-1 是电力系统示意图，它是由若干个发电厂、变电所、输配电线路以及用户在电气上相互连接的一个整体。由若干个发电厂联合向用户供电，可以大大提高供电的可靠性、经济性和电能质量。电力系统的电压和频率是衡量电能质量的两个基本技术指标。按照有关标准[⊖]、[⊕]规定，我国电力供电系统的额定频率为 50Hz，其允许偏差值规定为 $\pm 1\%$ ，即系统频率的偏差值不得超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ ，容量较大的系统应努力使频率不超过 $\pm 0.2\text{Hz}$ 。有关标准对于额定电压及其偏差值也有相应的规定。电力系统的频率和电压超出允许偏差时，将直接影响到产品质量、用电设备的安全等，严重时甚至会危及电力系统的安全运行。

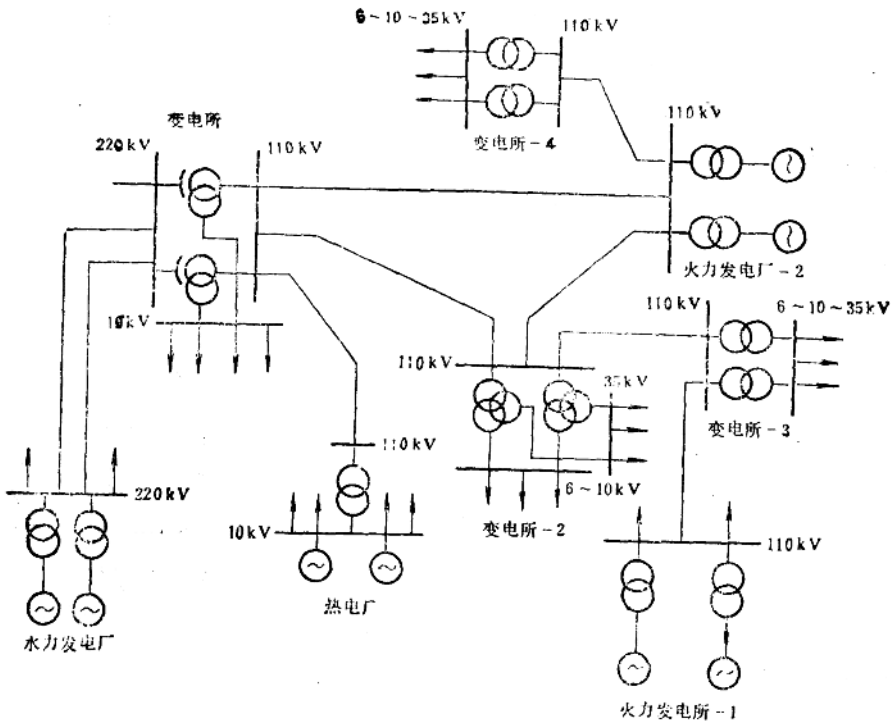


图1-1 电力系统示意图

⊖ 《电气设备额定频率 (GB1980—80)》，哈尔滨大电机研究所《大电机、水轮机标准汇编》，1983。
⊕ 《电力工业技术管理法规》，水利电力部，1980。

电力系统频率主要决定于系统内有功功率的平衡。系统内各类发电厂原动机输出的有功功率的总和，在任何时刻都必须同系统的有功功率负荷（包括各种用电设备所需的有功功率和网络的有功功率损耗）相平衡，否则频率就会出现偏移。然而，任何电力系统的负荷都在不停地波动，由于电能不能大量储存，负荷功率的变化立即引起频率的相应变化，这种变化是瞬时出现的，原动机输出功率由于调节系统的相应迟缓，无法适应发电机电磁功率的瞬时变化，因此严格地维持频率不变是不可能的，但必须把频率对于其额定值的偏移限制在一个相当小的范围内。

水力发电厂的生产过程示意图如图 1-2 所示。水轮发电机一般是三相交流同步电机，其频率 f 与转速 n 之间有着严格的关系式

$$f = \frac{Pn}{60}$$

式中 P 为发电机磁极对数， $[n]$ 为 r/min ， $[f]$ 为 Hz 。

水轮发电机组（简称机组）的转速由作用在机组转轴上的力矩（或功率）决定。其运动方程式可按刚体绕定轴转动的运动微分方程式写为：

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_t - M_g \quad (1-1)$$

式中 J 为机组转动部分的转动惯量， $[J]$ 为 $kg \cdot m^2$ ； $\omega = \frac{\pi n}{30}$ 为机组旋转角速度， $[\omega]$ 为 rad/s ； M_t 为水轮机水力矩， $[M_t]$ 为 $N \cdot m$ ； M_g 为发电机负荷阻力矩， $[M_g]$ 为 $N \cdot m$ ，其中包括发电机所有的机械和电气损失。

式(1-1)表明，只有在 $M_t = M_g$ 时，机组的转速才能稳定（ $\frac{d\omega}{dt} = 0$ ）。否则，机组角速度将发生变化，由此引起频率波动。

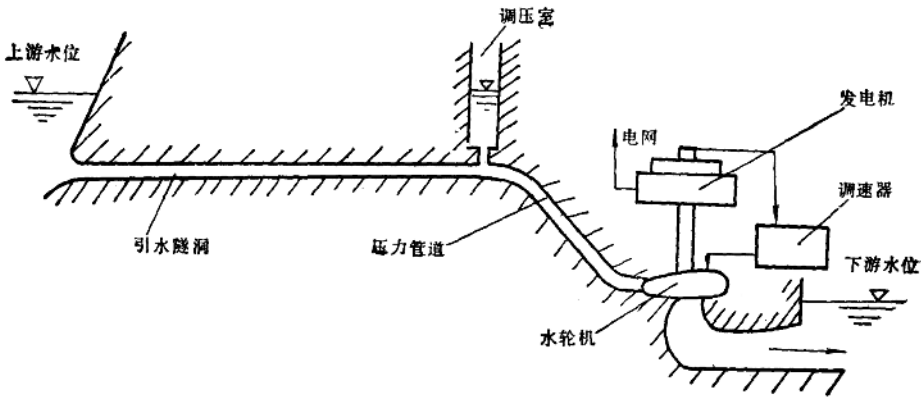


图1-2 水力发电厂生产过程示意图

由水轮机原理，水轮机水力矩的表达式为

$$M_t = \frac{\gamma Q H \eta_t}{\omega} \quad (1-2)$$

式中 γ 为水的重度， $[\gamma]$ 为 N/m^3 ； Q 为通过水轮机的流量， $[Q]$ 为 m^3/s ； H 为水轮机净水头， $[H]$ 为 m ； η_t 为水轮机效率。

分析式(1-2)可见,改变水轮机水力矩的最有效方法是通过调速器改变水轮机的流量。

因此,水轮机调节的基本任务是,当电力系统负荷发生变化、机组转速出现偏差时,通过调速器相应地改变水轮机流量,使改变后的水轮机水力矩与发电机负荷阻力矩达到新的平衡,以维持频率(机组转速)在规定的范围之内。

调速器除了调节机组频率这一主要任务以外,还要对机组进行各种控制,如机组启动、停机、工况转换、增减负荷等。调速器是由实现水轮机调速及相应控制作用的机构和指示仪表等组成的一个或几个装置的总称。按照国际电工委员会(IEC)《水轮机调速系统试验国际规程》^[1]的规定,把水轮机调速器中用来检测转速偏差、并将它按一定特性转换成主接力器位置偏差的一些装置和机构的组合体,称之为调速系统。调速系统一般由测速元件、放大元件、执行元件(主接力器)、校正元件等组成。主接力器是驱动水轮机控制机构的部件,水轮机控制机构包括由调速系统驱动的连杆装置以及控制能量输入的单个或组合部件,诸如导叶、转轮叶片、针杆(喷针)、折向器、调压阀等。

实践表明,水电厂生产的电能质量,不仅与机组本身的特性和参数有关,而且与压力引水系统、电压调节器、调速系统以及电力系统等的特性都有密切关系。从自动控制原理来看,压力引水系统(包括进、排水管道)、水轮机、装有电压调节器的发电机及其所并入的电力系统统称为被控制系统(调节对象);由水轮机调速系统和被控制系统组成的闭环自动控制系统,习惯上称之为“水轮机调节系统”。水轮机调节系统方块图如图1-3所示。

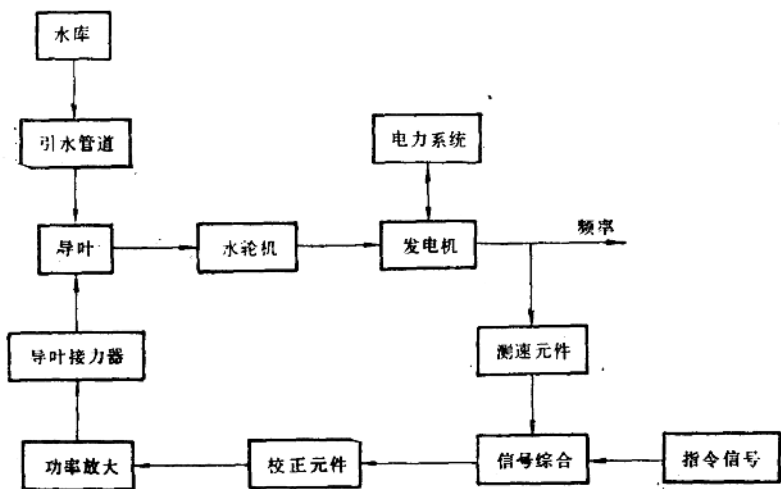


图1-3 水轮机调节系统方块图

水轮机调节系统与其它原动机调节系统相比较,具有以下特点:

1. 水轮机调节系统是一个水、机、电的综合控制系统,调节对象的特性十分复杂。压力引水系统有较大的水流惯性,它使得水轮机水力矩不能立即响应负荷力矩的变化;水轮机具有明显的非线性特性;水轮发电机组有较大的转动惯性,这些都对水轮机调节系统的稳定性和调节品质有很大的影响,也给调节系统的稳定性分析、过渡过程分析以及调速器参数的整定带来一定的困难。

2. 大、中型水轮机运转时通过的水流量比较大，为了驱动水轮机控制机构，调速器常需设置多级液压放大元件，而液压放大元件的非线性特性有可能引起调速器自身的不稳定、恶化水轮机调节系统的调节品质。

3. 水轮机类型不同，它对调速器的结构形式也有不同的要求，从而增加了调速器的复杂性。例如，混流式、轴流定桨式水轮机采用单调节调速器；轴流转桨式、斜流式、冲击式水轮机需采用双调节调速器。

4. 调速器还可以与其它自动装置配合，实现成组调节、按水位调节等进一步的综合自动控制等。随着电力系统的扩大和自动化程度的提高，水轮机调速器将是水电厂中一个综合自动控制装置。

水轮机调节系统的研究、设计和计算，通常包含以下几个方面的内容：

1. 研究新型调速器。
2. 根据调节对象的参数和调节系统的品质指标，确定调速器及其它附属设备的规格型号。
3. 建立水轮机调节系统的数学模型，进行调节系统小瞬变工况的稳定性分析、调节过程计算和最佳参数的选择。
4. 建立水轮机调节系统的数学模型，进行调节系统大瞬变工况的调节保证计算和调节过程计算等。
5. 探求更臻完善的调节系统的理论研究和试验分析方法，提高数学模型的准确性，等等。

水轮机调节系统的工作状态一般可分为：稳态、小瞬变（小波动）工况以及大瞬变（大波动）工况等。所谓稳态是水轮机调节系统的所有变量均处于相对平衡的状态，机组在恒定的负荷、指令信号和水头下运行；小瞬变工况是水轮机调节系统经受很小的指令信号或负荷变化，调速系统各元件均未达到极限的运行工况；大瞬变工况是水轮机调节系统经受相当大的指令信号或负荷变化，使调速系统内的任一部件达到了出现非线性或饱和状态的极限的运行工况。本书前四章重点讨论水轮机调节系统小瞬变工况的动态特性以及调速器结构特点，第五章讨论大瞬变工况的调节保证计算，第六章为调节设备选择。

第二节 水轮发电机组的频率调节

水轮发电机组的主要运行方式是发电运行方式，这时机组是电力系统有功功率和无功功率的主要电源。严格地说，电力系统的频率和电压与电力系统的有功功率及无功功率的平衡都有关系。但是，当电力系统在额定参数（频率和电压）附近运行时，电压变化对有功功率平衡的影响是次要的，因此有可能单独讨论电力系统的频率调节问题。本节从静态的角度出发讨论机组孤立运行和并列运行中，频率的一次调节和二次调节。为此，首先介绍电力系统的频率静态特性。

一、电力系统的频率静态特性

电力系统的频率静态特性包括电力系统有功功率负荷与频率的静态特性以及机组输出功率与频率的静态特性。

（一）电力系统有功功率负荷与频率的静态特性

当电力系统有功负荷变化时,系统频率将发生变化;但是,当频率变化时,电力系统的有功负荷也将发生变化。电力系统处于不同工况稳定运行时,有功负荷随频率变化的特性称为有功功率负荷与频率的静态特性,简称为负荷静态特性。

根据有功负荷与频率的主要关系,可将负荷分为以下几种:1)与频率变化基本无关的负荷,如照明负荷、电弧炉、电阻炉等;2)与频率的一次方成正比的负荷,负荷的阻力矩等于常数,如切削机床、往复式水泵、压缩机等;3)与频率的二次方成正比的负荷,如变压器中的涡流损耗等;4)与频率的三次方成正比的负荷,如通风机、静水头阻力不大的循环水泵等;5)与频率更高次方成正比的负荷,如静水头阻力很大的给水泵等。

电力系统有功负荷与频率的关系可表示为

$$P_g = A_0 P_1 + A_1 P_1 \left(\frac{f}{f_r}\right) + A_2 P_1 \left(\frac{f}{f_r}\right)^2 + A_3 P_1 \left(\frac{f}{f_r}\right)^3 + \dots \quad (1-3)$$

式中 P_g 为频率等于 f 时整个系统的有功负荷, $[P_g]$ 为 kW, 它在任何时刻都同全系统发电机输出的有功功率之和相等; P_1 为频率等于额定值 f_r 时整个系统的有功负荷, $[P_1]$ 为 kW; $A_i (i = 0, 1, 2, \dots)$ 为与频率的 i 次方成正比的有功负荷在 P_1 中所占的百分数, 显然有 $A_0 + A_1 + A_2 + A_3 + \dots = 1$ 。

式(1-3)是电力系统稳定运行时有功负荷与频率的数学关系式。 P_g 是频率 f 的非线性函数, 以绝对值为坐标表示的负荷静态特性如图 1-4 a 所示。

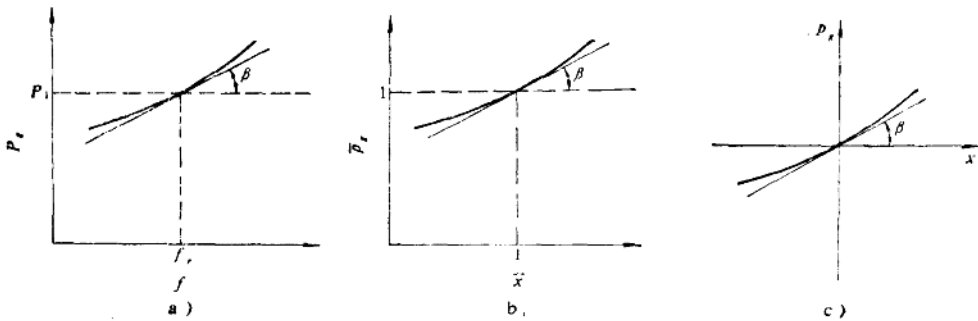


图1-4 电力系统有功功率负荷与频率的静态特性

a) 以绝对值表示 b) 以相对值表示 c) 以偏差相对值表示

如果频率偏离额定值不大时,可以根据小偏差原理对非线性函数进行线性化处理。将式(1-3)在额定频率 f_r 展开为泰勒级数

$$P_g = P_1 + \left(\frac{dP_g}{df}\right)_{f=f_r} (f - f_r) + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2 P_g}{df^2}\right)_{f=f_r} (f - f_r)^2 + \frac{1}{3!} \left(\frac{d^3 P_g}{df^3}\right)_{f=f_r} (f - f_r)^3 + \dots \quad (1-3a)$$

由于 $f - f_r$ 很小,可以忽略它的高阶项,得到用偏差值表示的负荷静态特性线性方程

$$\Delta P_g = K_g \Delta f$$

式中 $\Delta P_g = P_g - P_1$ 为负荷偏差值, $K_g = \left(\frac{dP_g}{df}\right)_{f=f_r}$ 为负荷的频率调节效应系数,简称为负荷调节效应系数或负荷自调节系数; $\Delta f = f - f_r$ 为频率偏差值。由式(1-3),在额定

频率附近, 频率调节效应系数为:

$$K_g = A_1 P_1 \frac{1}{f_r} + 2 A_2 P_2 \frac{1}{f_r} + 3 A_3 P_3 \frac{1}{f_r} + \dots$$

由图 1-4 a, K_g 是负荷静态特性曲线 $f = f_r$ 点的斜率

$$K_g = \frac{dP_g}{df} \approx \frac{\Delta P_g}{\Delta f} = \operatorname{tg} \beta \quad (1-4)$$

也就是说, 在额定频率 f_r 附近, 当频率略有下降时, 负荷功率自动按比例减少; 反之亦然。这种效应, 称为负荷的频率调节效应。

为便于计算和比较, 水轮机调节系统中各物理变量常用无量纲相对值表示。我们称瞬时值与计算基准值之比为相对值, 称偏差值与计算基准值之比为偏差相对值, 以示区别。计算基准值一般可以任意选择, 但选择时应力求简化计算公式, 并使计算公式中各参数的含义符合有关标准或技术要求的规定, 参考文献[1]、[2]中有关标准规定水轮机调节系统中选用额定参数(如额定频率 f_r 、额定频率时的负荷功率 P_1 等) 作为相应物理量的计算基准值。

用相对值表示时, 负荷静态特性曲线如图 1-4 b 所示, 负荷自调节系数为 k_g , 则有

$$k_g = \frac{d\bar{p}_g}{d\bar{x}} \quad (1-5)$$

式中 $\bar{p}_g = \frac{P_g}{P_1}$ 为负荷相对值; $\bar{x} = \frac{f}{f_r}$ 为频率相对值。

如果进一步选择初始稳定工况点为坐标原点, 如图 1-4 c 所示, 则可得到以偏差相对值表示的负荷静态特性, 且

$$k_g = \frac{d p_g}{d x}$$

式中 $p_g = \frac{\Delta P_g}{P_1}$ 为负荷偏差相对值; $x = \frac{\Delta f}{f_r}$ 为频率偏差相对值。

由图 1-4 可见, 选用不同的坐标值对曲线本身的形状并无影响, 且有

$$k_g = \frac{d\bar{p}_g}{d\bar{x}} = \frac{d p_g}{d x}$$

k_g (或 K_g) 取决于全系统各类负荷的比重, 不同的系统或同一系统的不同工况点, k_g (或 K_g) 值都可能不同, 它是不能整定的, 通常由试验或统计计算方法求得。据有关部门的统计资料, 一般的电力系统, $k_g = 1 \sim 3$, 它表示系统频率变化 1% 时, 负荷有功功率相应变化 (1~3)%。

(二) 水轮发电机组输出有功功率与频率的静态特性

机组输出有功功率与频率的静态特性通常称为水轮机调节系统静态特性, 或简称为机组静态特性, 它与调速器的静态特性有关。

粗略分析如图 1-5 所示的水轮机调速器的工作原理。假定机组处于额定转速稳定运行时调速器各部件的位置如图所示。重锤 1 用来测量机组的实际转速, 它所产生的离心力与弹簧 2 的恢复力相平衡。当负荷减少使得机组转速升高时, 重锤的离心力增加, 重锤向外张开同时拉伸弹簧直到离心力的增量与弹簧恢复力的增量相平衡为止, 这时转动套 3 随之向上移动 Δl , 杠杆 AOB 绕 O 点顺时针旋转, 主配压阀 4 的活塞下行, 来自压力油源的压力油液进入主接力器 5 的右腔, 推动主接力器活塞并带动水轮机导水机构向关小导叶开度的方向移动, 从而减少进入水轮机的流量而减小水轮机水力矩, 机组转速不再继续上升。主接力器活塞向

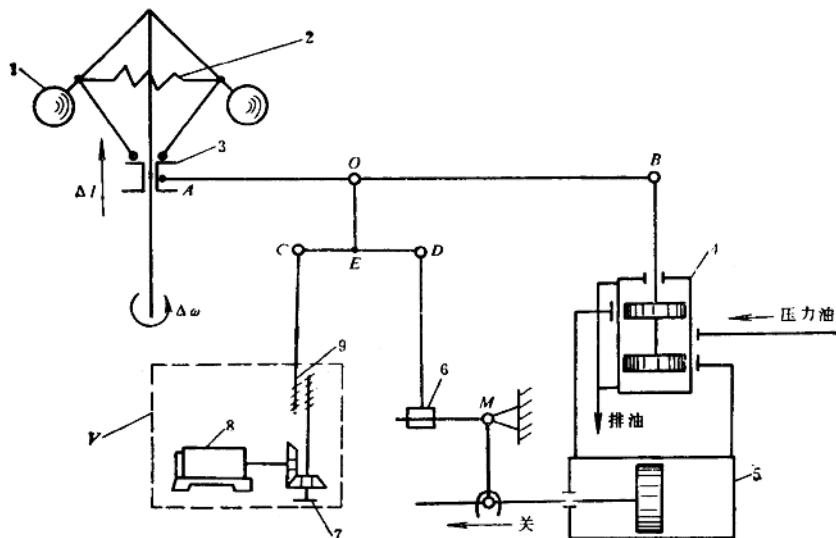


图1-5 水轮机调速器示意图

- 1—重锤 2—弹簧 3—转动套 4—主配压阀 5—主接力器 6—调节螺帽 7—手轮
8—电动机 9—传动机构

左移动的同时，通过连杆组的传递，杠杆 AOB 以 A 点为支点逆时针旋转，使主配压阀活塞上移，直到活塞截断通往主接力器的压力油时，主接力器活塞停止运动。当调节过程结束，机组处于新的稳定运行状态时，杠杆 AOB 的 B 点必须回复到初始位置，然而 O 点稳定在比调节前稍高的位置，故机组转速也稳定在比调节前稍高的数值。由于主接力器活塞的位置与机组输出功率有确定的对应关系，故可作出如图 1-6 a 所示的以机组输出功率 P 为横坐标、频率 f 为纵坐标的机组输出功率与频率的静态特性，称为水轮机调节系统静态特性。用相对值表示的水轮机调节系统静态特性如图 1-6 b 所示，图中以输出功率相对值 $\bar{P} = \frac{P}{P_r}$ 为横坐标， P_r 为发电机额定功率。同样，水轮机调节系统静态特性亦可用偏差相对值作坐标，并令 $\bar{P} = \frac{\Delta P}{P_r}$ 为输出功率偏差相对值，此处不再作出。

将水轮机调节系统静态特性图上某一规定运行点斜率的负数，定义为水轮机调节系统静态调差率 e_p 。用相对值表示，

$$e_p = - \frac{d\bar{x}}{d\bar{P}}$$

或用偏差相对值表示，

$$e_p = - \frac{d\bar{x}}{d\bar{P}} \quad (1-6)$$

式中负号是由于习惯上调差率 e_p 取正值，而实际上频率变化量与功率变化量的符号相反。

在规定的指令信号下，从水轮机调节系统静态特性图上得出的对应于零功率（空载运行点）和额定功率的相对转速之差称为最大功率调差率 e_p 。如果机组静态特性接近于线性关系，则近似有 $e_p = e_p$ 。 e_p 是可以整定的，可通过图 1-5 中的调节螺帽 6 整定 e_p 的大小，当

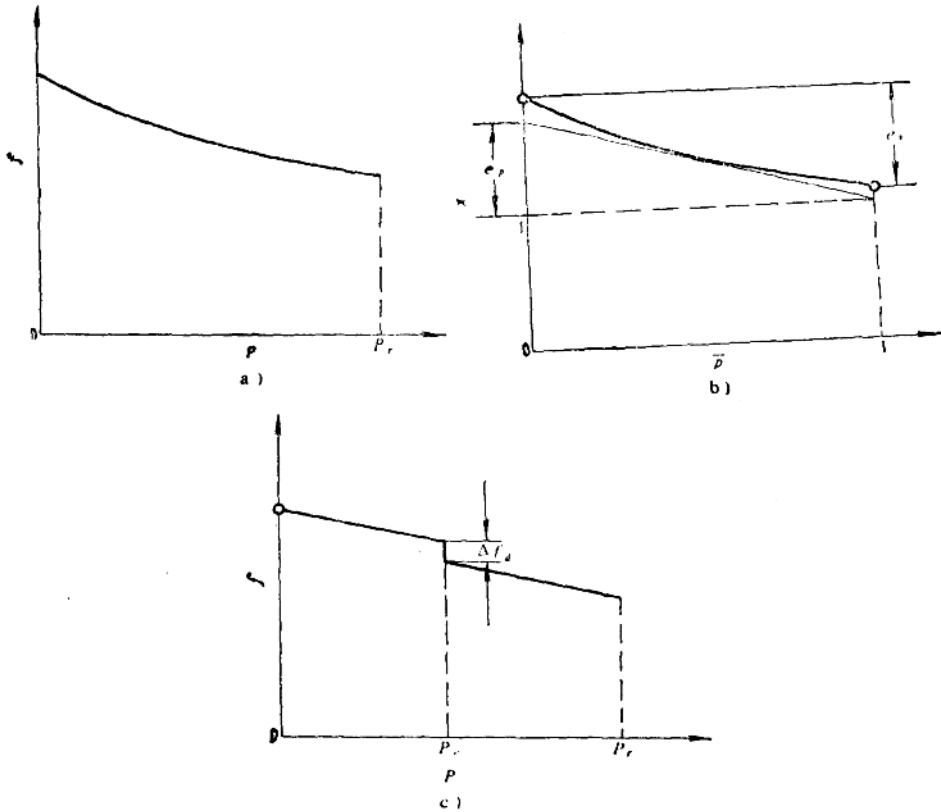


图1-6 水轮机调节系统静态特性

a) 以绝对值表示 b) 以相对值表示 c) 有人工频率失灵区的静态特性

螺帽远离铰支点 M 时, 由主接力器移动给予 D 点的反馈位移量增加, 调差率随之增加。例如, 整定 $e_p = 3\%$, 表明机组输出功率改变 $\pm 1\%$ 时频率将偏移 $\pm 0.03\%$ 。

调差率 e_p 的倒数, 称为机组单位调节功率 k_p ,

$$k_p = \frac{1}{e_p} \quad (1-7)$$

机组单位调节功率用偏差值表示时,

$$K_p = \frac{\Delta P}{\Delta f} \quad (1-8)$$

二、频率的一次调节

(一) 机组孤立运行(又称单机运行)时频率的一次调节

电力系统仅由单一机组供电时, 系统负荷即为该台机组之负荷。

要确定由于系统负荷变化所引起的频率波动, 需同时考虑负荷以及机组的调节效应。为此, 把负荷和机组的静态特性曲线画在同一张图上, 如图1-7 a所示。假定在初始稳定工况时负荷的静态特性曲线为 $P_L(f)$, 它同机组的静态特性曲线 $P(f)$ 的交点 A 确定了初始频率 f_0 、机组输出功率 P 以及负荷功率 P_L 。即在初始频率 f_0 时, 机组输出功率与负荷功率相平衡。

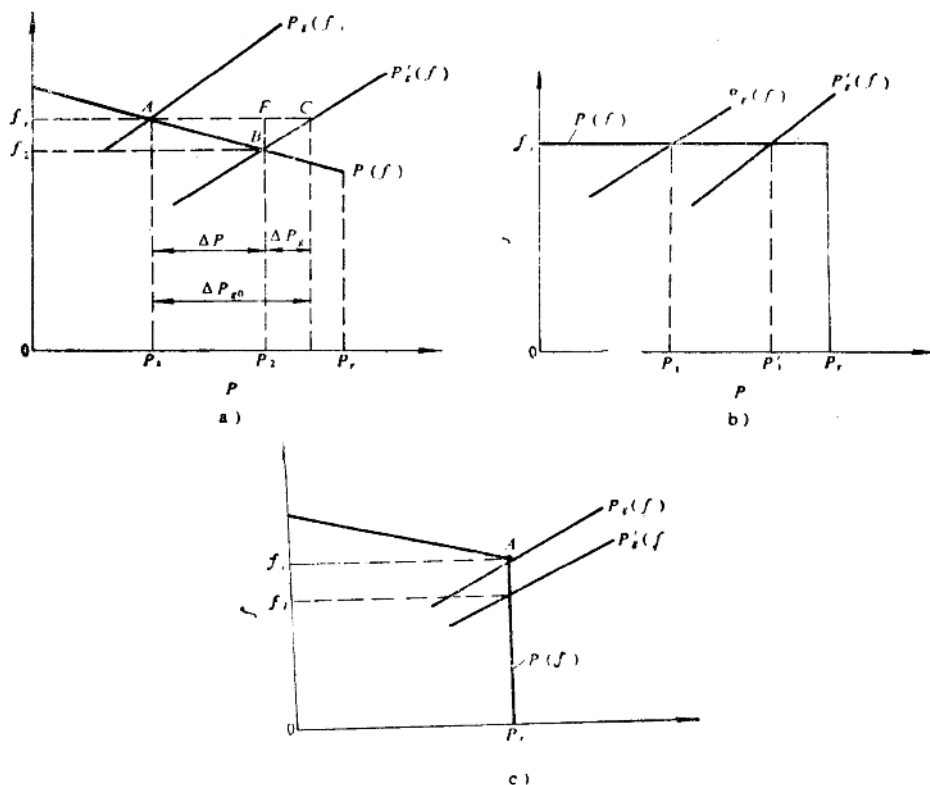


图1-7 孤立运行机组频率一次调节示意图

a) $\epsilon_p \neq 0$ 时频率的一次调节 b) $\epsilon_p = 0$ 时频率的一次调节 c) 机组满载时频率的一次调节

假定负荷增加了 ΔP_{g0} , 调节动态过程结束后, 机组静态特性不变, 而由于负荷的调节效应使得负荷静态特性曲线变为 $P'_g(f)$ 。新的稳定运行点将是 $P(f)$ 和 $P'_g(f)$ 的交点 B , 系统频率为 f_2 。由图可见, 频率变化了 Δf , 且

$$\Delta f = f_2 - f_1 < 0$$

机组输出功率的增量 ΔP

$$\Delta P = -K_p \Delta f$$

由于负荷调节效应所引起的负荷变化量为

$$\Delta P_g = K_g \Delta f$$

当频率下降时, ΔP_g 是负的, 故负荷功率的实际增量为

$$\Delta P_{g0} + \Delta P_g = \Delta P_{g0} + K_g \Delta f$$

负荷功率的实际增量应同机组输出功率增量相平衡, 即

$$\Delta P_{g0} + \Delta P_g = \Delta P$$

或

$$\Delta P_{g0} = \Delta P - \Delta P_g = -(K_p + K_g) \Delta f \quad (1-9)$$

上式说明, 负荷增加时频率有所下降, 一方面机组按有差调节特性增加输出功率, 另一方面负荷实际取用的功率也因频率下降而有所减少。

令

$$K = K_p + K_g$$

或

$$K = - \frac{\Delta P_{g0}}{\Delta f} \quad (1-10)$$

式中 K 称为电力系统的单位调节功率系数。

系统的单位调节功率系数表示在计及机组的静态特性和负荷的调节效应时,引起频率单位变化的负荷功率变化量。 K 的数值越大,增减相同的负荷引起的频率变化量就越小,频率就越接近初始值。

负荷变化时,由机组和负荷的调节效应,使频率和机组输出功率得到调节,这种调节称为频率的一次调节。 $e_p \neq 0$ 时,一次调节终了频率不能回到初始值; $e_p = 0$ 时,只要系统最大负荷不超过机组容量,经过一次调节,频率可以维持不变,如图 1-7 b 所示。

如果在初始工况下机组已满载运行,例如图 1-7 c 中的 A 点,如果系统的负荷再增加,由于机组已没有可调节的容量,不能再增加输出功率了,只有靠频率下降后负荷本身调节效应的作用来取得新的功率平衡。这时机组静态特性曲线在 A 点由原来的斜线转折成一条与纵轴平行的直线, K_p 值也在 A 点由 $K_p \neq 0$ 变为 $K_p = 0$ 。则 $K = K_g$, 而 K_g 的数值很小,所以负荷增加引起的频率降低就相当严重了。由此可见,系统中有功功率电源的容量不仅应满足在额定频率下系统对有功功率的需求,为了适应负荷的增长,电力系统还应有一定的备用容量。

(二) 并列运行机组频率的一次调节

设电力系统有 n 台机并列运行,当负荷变化时,配置了调速器的机组只要还有可调节的容量,均按其静态特性参加频率的一次调节。

如能求得 n 台机组的等值单位调节功率系数 K_g^* (或 k_g^*) 或等值调差率 e_p^* , 就可以把 n 台机当作一台机来分析频率的一次调节。

设负荷变化 ΔP_{g0} 、频率变动 Δf 时,第 i 台机组输出功率增量为

$$\Delta P_i = -K_{p_i} \Delta f \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1-11)$$

n 台机组输出功率总增量为

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n \Delta P_i = - \sum_{i=1}^n K_{p_i} \Delta f$$

n 台机组的等值单位调节功率系数为

$$K_g^* = \sum_{i=1}^n K_{p_i}$$

并列运行时,电力系统的单位调节功率系数

$$K = K_g^* + K_g = - \frac{\Delta P_{g0}}{\Delta f} \quad (1-12)$$

当并列运行机组台数较多时,机组等值单位调节功率系数远大于一台机组的单位调节功率系数,在负荷功率变动值相同时,多台机并列运行的频率变化比单机孤立运行时要小得多。若已知电力系统的单位调节功率系数 K 之值,则负荷变化 ΔP_{g0} 时所引起的频率偏差 Δf 可由式 (1-12) 确定,然后用式 (1-11) 计算各台机组所承担的输出功率增量 ΔP_i

$$\Delta P_i = -K_{p_i} \Delta f = - \frac{P_{r_i}}{e_{p_i} f_r} \Delta f$$

或

$$\frac{\Delta P_i}{P_i} = -\frac{x}{e_i} \quad (1-13)$$

由式(1-13)可见, 频率偏移相同时调差率 e_i 越小的机组所增加(或减少)的输出功率相对值越大。所以, 应该把不担任调频任务机组的调差率 e_i 整定得大一些。或令其机组静态特性曲线有如图 1-6 c 所示的形状, 在给定功率点 P 形成人工频率失灵区 Δf_s , 频率在 Δf_s 范围内波动时, 该机组输出功率不变。

如果负荷变化使频率变化超出允许值时, 需要进行频率的二次调节。

三、频率的二次调节

频率的二次调节是通过调速器的转速调整机构平移机组静态特性曲线来实现的。图 1-5 中的转速调整机构 V 由手轮 7、电动机 8、传动机构 9 等组成。通过手轮或电动机可改变杠杆 CD 的 C 点上下位置, 从而平移机组静态特性曲线。例如 C 点向上偏移时, 主配压阀活塞上行、主接力器活塞向开启方向移动。调节过程结束时, 如果维持机组转速(频率)不变, 则机组输出功率将增加, 机组静态特性曲线相应地由图 1-8 中的 I 平移至 II。同理, 当 C 点向下偏移时, 机组静态特性曲线由 I 平移至曲线 III。

(一) 机组孤立运行时频率的二次调节

如图 1-9 所示, 设机组孤立运行起始工况点为机组静态特性曲线 $P(f)$ 和负荷静态特性曲线 $P_g(f)$ 的交点 A, 频率为 f_1 。假定负荷增加 ΔP_{g0} 后, 经过频率一次调节, 运行点移到 B 点, 频率下降到 f_2 。

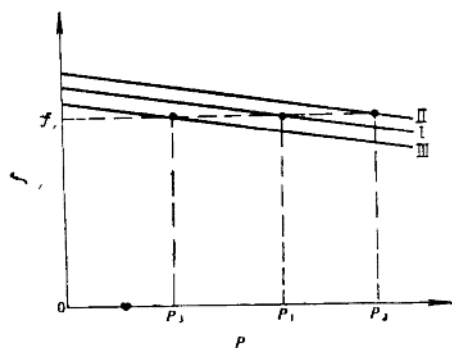


图1-8 机组静态特性的平移

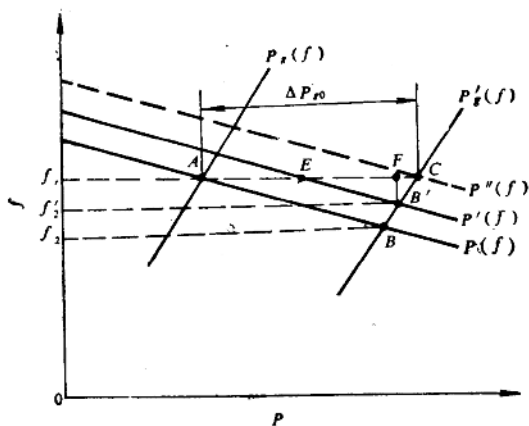


图1-9 孤立运行机组频率二次调节示意图

如果在调速器转速调整机构的调整下, 使机组静态特性曲线平移至 $P'(f)$, 则频率上升到 f_2 , 频率偏移值为

$$\Delta f = f_2 - f_1 < 0$$

由图可见, 机组负荷的初始增量 ΔP_{g0} 可视为由三部分组成

$$\Delta P_{g0} = \Delta P' - K_p \Delta f - K_g \Delta f$$

或

$$\Delta P_{g0} - \Delta P' = -K \Delta f$$

式中, 令 $\Delta P'$ 为由频率二次调节而得到的机组输出功率增量(图中 \overline{AE}); $-K_p \Delta f$ 为由一次调节得到的机组输出功率增量(图中 \overline{EF}); $-K_g \Delta f$ 为由负荷本身调节效应而引起的功率增量(图中 \overline{FC})。

如果二次调节得到的机组输出功率增量完全能够抵偿负荷的初始增量时，机组静态特性曲线如图 1-9 中虚线 $P''(f)$ 所示，这时

$$\Delta P_{g0} - \Delta P' = 0$$

则

$$\Delta f = 0$$

频率维持不变，而当二次调节所得到的机组输出功率增量不能满足负荷变化的需要，不足的部分需由负荷的调节效应来抵偿，频率就不能恢复到初始的数值。

通过调速器的转速调整机构平移机组静态特性曲线来调节频率和分配机组的有功功率输出，这就是频率的二次调节。

(二) 并列运行机组频率的二次调节

如前所述，在有多台机组并列运行的电力系统，当负荷变化时，配置了调速器的机组只要还有可调节容量，都将参与频率的一次调节，而频率的二次调节一般只由少数机组（或电厂）承担，这些机组（或电厂）称为主调频机组（或主调频电厂）。

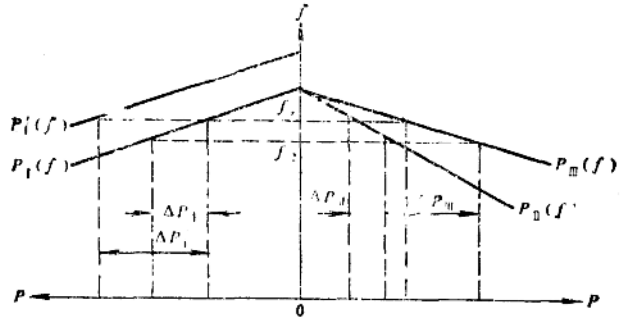


图1-10 主调频机组进行二次调频过程示意图

假定电力系统有三台机组并列运行，其中 I 号机组为主调频机组，频率二次调节的原理如图 1-10。当负荷增加 ΔP_{g0} 时，首先三台机组都参加频率一次调节，系统频率由 f_1 下降到 f_2 ，这时功率平衡关系为

$$\begin{aligned} \Delta P_{g0} &= \Delta P_I + \Delta P_{II} + \Delta P_{III} + \Delta P_g = -(K_{P_1} + K_{P_2} + K_{P_3})\Delta f - K_g \Delta f \\ &= -(K_p^* + K_g)\Delta f \end{aligned}$$

式中 ΔP_I 、 ΔP_{II} 、 ΔP_{III} 分别为 I 号、II 号、III 号机组由一次调节得到的输出功率增量； ΔP_g 为由于负荷调节效应引起的功率增量。如果用 I 号机组调速器的转速调整机构使其机组静态特性曲线平移至 $P_I'(f)$ ，I 号机组输出功率增加 $\Delta P_I'$ ，

$$\Delta P_{g0} - \Delta P_I' = -(K_p^* + K_g)\Delta f$$

若 I 号机组的调节容量足够，使 $\Delta P_I'$ 等于 ΔP_{g0} ，频率就能恢复到初值 f_1 。

上述分析说明，频率二次调节时负荷的增量基本上由主调频机组（或主调频厂）承担。如一台主调频机组（或主调频厂）不足以承担系统负荷变化时，必须增选一些机组（或电厂）参加二次调节。如系统中参与二次调节的所有机组（或电厂）仍不足以承担系统负荷变化时，所出现的功率缺额将根据一次调节原理，部分由配置了调速器的机组按其静态特性承担；另一部分由负荷的调节效应补偿。为了适应系统负荷的变动，保证频率质量，在较大的电力系统中通常需要多台机组参加调频。这时，既要求调频机组能参加调频，还要求能确定地分配它们之间的输出功率，以期达到经济运行的目的。由于手动调频反应速度较慢，在多台机组同时调频时容易产生功率分配的混乱，而且难以满足经济运行的要求。近代电力系统中多采用自动调频装置来满足上述要求。

按照是否参与频率二次调节，可将电厂划分为主调频厂、辅助调频厂和非调频厂三类。主调频厂承担频率的二次调节，辅助调频厂在系统频率超过某一规定范围时参加二次调节，