

# 水轮机调速器的技术发展(一)

温 励 强

(东方电机厂)

**提 要** 推动水轮机调速器技术发展的主要动力,是力求获得最佳的调速性能。电液转换器的研制成功,使机调过渡到电调。电子技术领域的迅速发展促进了电调技术的发展。调节规律由PI发展为PID;系统结构由并联反馈式单闭环结构演变为双闭环串联结构。引入水压、功率信号实现前馈——反馈控制策略是提高性能的重大措施。

微机的应用为实现高级控制策略和扩展功能提供了强有力的手段。但近十年来在实现高级控制策略方面尚未取得预期的最佳效果。却在扩展功能方面获得巨大进展。使调速器的概念从经典意义上显著扩展。预计一种多功能综合控制器将取代单一调速作用的调速器。

大容量电力系统的频率基本保持不变。并网运行机组的调速器多数变成了一个开环控制系统。因此,根据不同电站运行的特点配置调速器是合理的。一种功能单一,简单可靠的导叶位置器也是值得注意的发展趋势之一。目前,机调仍比电调可靠。电调仍处于发展成熟阶段。电力生产的安全性十分重要。因此,调速器的技术进步是在提高可靠性的基础上才得以实现的。

**关键词** 水轮机调速器 调节对象 调节规律 技术发展 微机

## 一、前 言

自19世纪末第一台水轮机调速器投入运行以来,已经过了一百多年。从结构形式看,由机械液压调速器发展为电气液压调速器(简称机调、电调)。电调又随电子元器件的更新换代而由电子管型发展到晶体管分立元件型以及集成电路型。调节规律从PI(比例、积分)发展为PID(比例、积分、微分)。特别是随现代控制理论的发展和微机的应用,使调速器技术发展到一个新阶段。

另一方面,调节对象的情况也有极大变化。由最初的单机带负荷运行到多机成组控制运行。进而联成巨大的电网。因此,对调速器的功能和性能有了多样性的要求。

回顾过去,展望未来,提高可靠性、改善性能、扩展功能、根据各自电站的特点合理地配置调速器,加速新技术的研究应用和推广是我们今天面临的课题。本文仅对调速器技术发展谈谈个人认识。限于阅历、水平、难免不确切,挂一漏万,抛砖引玉而已。

## 二、水轮机调节系统简述

由水轮机调速器和被调节对象组成的闭环系称为水轮机调节系统,如图1所示。

测量元件和调节器组成调速器。被调节对象包括水轮机、水力系统(引水和泄水管道)、装有电压调节器的发电机及其所并入的电力系统。水轮发电机组是水力系统和电力系统的连结点。水轮机带动发电机将水能变为电能供用户使用。用户除要求供电安全可靠外,还要求电

能的频率及电压保持在额定值附近某一范围内。

水轮发电机组转动部分是一个围绕固定轴线作旋转运动的刚性,它的运动可由下述方程式描述。

$$Jd\omega/dt = M_t - M_g \quad (1)$$

式中  $J$  —— 机组转动部分惯性力矩;

$\omega$  —— 角速度,  $\omega = n\pi/30$  ( $n$  为机组转速);

$M_t$  —— 水轮机动力矩;

$M_g$  —— 发电机阻力矩。

当  $M_t - M_g = 0$  时,  $d\omega/dt = 0$ , 机组转速与电能频率不变。但  $M_g$  是随时在变化, 只有使  $M_t$  随时保持和  $M_g$  相等才能维持转速不变。

改变进入水轮机的流量  $Q$ , 是改变水轮机动力矩  $M_t$  的最简单有效的途径。

根据负荷 ( $M_g$ ) 的变化, 不断地调节水轮发电机组的有功功率 ( $M_t$ ) 输出, 以维持机组频率 (转速) 在规定的范围内, 这就是水轮机调节的基本任务。具体的要求是, 当动力矩和阻力矩不相等, 转速 (频率) 出现偏差后, 通过调节作用使偏差快、稳、准地消除, 使机组在新的平衡状态下稳定运行。这就是构成经典调速器的基本思路。

快是指出现偏差到消除偏差这一过渡过程要快。一般是用超调量、波动次数、调节时间三项指标来衡量。稳是指在调节过程中不能出现转速等幅的或扩散性的波动。准是指过渡过程终止后, 转速准确地回到给定值。

采用什么办法, 或者说按照什么规律来调节才能达到上述的要求呢? 调节规律不同, 调节效果也不相同。调节规律是指调节器的输入量和输出量的因果关系。称为动特性。调速器的输入量是转速偏差, 一般用偏差相对值  $x$  表示。输出量是主接力器位移偏差, 用偏差相对值  $y$  表示。调速器的调节规律即是  $y$  和  $x$  的因果关系。选择什么样的调节规律要根据生产的要求和调节对象的特点。这些要求和特点大体上可归纳为如下几点:

1. 对频率偏差的要求很严格。一般允许  $\pm 0.4\%$ ;

2. 惯性很大。包括机组机械惯性及水流惯性, 负载的惯性等。表征机组机械惯性的时间常数  $T_m$ 。在几秒到十几秒范围内。水流惯性时间常数  $T_w$ 。也是秒的数量级, 它对水轮机调节品质的影响特别大。在水轮机调节过程中, 本应迅速改变导叶开度, 但由于水轮机与质量巨大的引水系统相连接, 因而水流惯性也很大。水流惯性阻止水流变化, 当导叶开度增大时, 在流量改变前的起始瞬间, 流入水轮机的水流速度却下降。因而水轮机出力在增大前的起始瞬间反而减小。这就是由于导叶开度的变化, 引起流速变化, 在引水系统中产生水锤。这种水锤效应与调节作用是相反的。即当需要增加水轮机功率时, 水锤作用却使功率减少; 反之, 亦然。由于存在这种水锤效应, 水轮机作为调节对象的性质有了复杂的变化, 限制了调节的速度, 这始终是水轮机调节的难点。

3. 破坏调节系统平衡状态的外来干扰因素很多。例如负荷的随时变化, 上、下游水位的波动等。

4. 开、关导叶 (包括浆叶) 需要巨大的操作功。对大、中型机组一般都要用液压系统经多级放大来获得所需的能量。

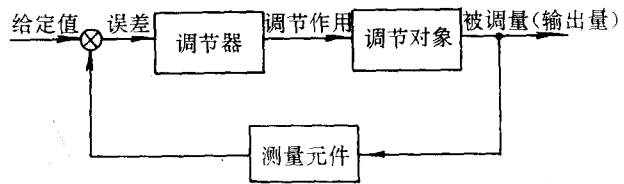


图1 水轮机调节系统示意图

5. 水轮机的型号很多。因此,调速器的结构也相应复杂和多样。

在以往讨论水轮机调节系统性能时绝大多数是突出调速器本身,不提或少提调节对象,如此得不到正确结论和妥善解决问题。

不断深入研究调节对象的特点及其对转速调节的影响。采用合适的调节规律来加以校正,以获良好的调节性能,始终是推动水轮机调速器技术发展的主要动力。

下面对调速器发展过程各阶段的特点作一简单的回顾。

### 三、机械液压调速器

机械液压调速器以其具有简单、可靠和基本满足调速要求等优点。在19世纪末期出现了第一台水轮机机械液压调速器。这有两方面的原因:其一,水轮机调节的特点之一,是操作功很大,用液压放大办法获得所需的操作功是最合理的选择;其二,用离心飞摆作为测速元件,在当时已经是很成熟的技术。

在飞摆和导水机构之间,采用杠杆传递信号,并进行液压放大获得操作功,这就构成了机械液压调速器。这种调速器可用图2方框表示:

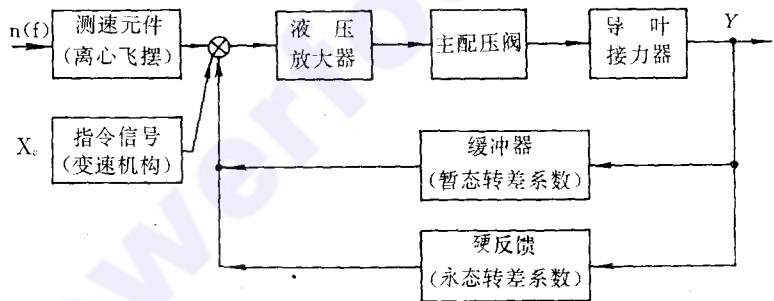


图2 机械液压调速器方框图

机械液压调速器的作用原理简述如下:当由于外扰作用使系统能量失去平衡,导致机组转速发生变化时,离心飞摆就测量出这种变化,输出一机械位移并与指令信号(机械位移量)比较,得出偏差值。此偏差值经液压放大器变成液压流量被输出。再经主配压阀进行液压流量放大,推动导叶接力器按减小转速偏差的方向移动。液压放大器和主配压阀可近似看作比例环节,而导叶接力器为积分环节。因此,只要有偏差,导叶接力器就不会停止移动。另外,导叶接力器移动的快慢只与转速偏差的大小有关,而没有考虑到偏差变化的趋势,而水轮发电机组是有较大惯性的对象,因此,这种导叶接力器仅按转速偏差动作,就会使导叶接力器移动过量,而引起调节过程反复振荡。这是实际运行所不允许的。因此,引入一个微分负反馈(缓冲)包围前向通道的积分环节,减小过量调节,而最终又使转速偏差完全消失。即接力器是按转速偏差的比例加积分来动作。这就是PI型调节规律的调速器。

图2中硬反馈(永态转差系数  $b_p$ ) 是为机组并列运行所需要的,本文不作详细解释。图2用传递函数表达的框图如图3

图中  $T_{yB}$  为辅助接力器时间常数;  $b_\lambda$  为局部反馈系数;  $T_Y$  为接力器反应时间;  $b_i$  缓冲强度,(暂态转差系数);  $T_d$  为缓冲时间常数;  $b_p$  永态转差系数。图3所示的调速器的传

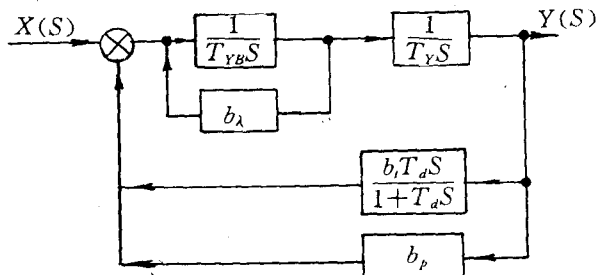


图3 用传递函数表达的机械液压调速器

递函数:

$$\frac{Y(S)}{X(S)} = \frac{1+T_d S}{\frac{T_{yB} T_y T_d}{b_i} S^3 + (\frac{T_{yB}}{b_i} + T_d) T_y S^2 + [T_y + (b_p + b_i) T_d] S + b_p} \quad (2)$$

当将  $T_{yB}$  视为0,这是十分接近实际情况;  $T_y$  也视为0,有一定误差;  $b_p$  设置为0时,则为

$$Y(S)/X(S) = (1-T_d S)/b_i T_d S = 1/b_i + 1/b_i T_d (1/S) \quad (3)$$

即:

$$Y(S) = [1/b_i + 1/b_i T_d \cdot (1/S)] X(S) \quad (4)$$

这就是PI(比例加积分)的调节规律。(应注意所作的简化条件)。

比例作用可以克服输出输入的不平衡,使系统重新稳定下来,但导叶接力器位移和转速偏差有一一对应的关系。所以机组是在新的转速下能稳定下来,即存在静态误差。

而积分作用的特点是:只要有偏差,导叶接力器就不会停止动作,只有偏差等于零时,接力器才不再移动,调节过程才能结束。所以积分作用可以实现无差控制。这就是机调能基本满足水轮机调速要求的主要原因。

我国电站使用的机调品种很多。较著名的有 ASEA 公司的 S-38型、WOODWARD 公司的 W-900型。50年代后逐渐由我国仿制的 W-900、CT-40、T-100、ST-100和自行设计的 XT(YT)型所代替。W-900型工艺要求很高,我国仿制的产品基本上达不到要求,在电站运行中,多数不能自动进行。逐渐为 XT 型系列产品所代替,并广泛用于中、小型电站。CT-40、T-100、ST-100型等仿苏产品,工艺要求比较适合我国的制造水平。仿制产品广泛用于大、中型电站,其性能较好。作者1958年在新安江电站首次进行调频试验时,用 T-100型机调自动调节,能保持当时华东电网频率偏差小于  $\pm 0.15\text{Hz}$ 。这些仿制产品投入电站运行初期,也出现一些具体问题。例如:主配压阀在充油时剧烈振动;飞摆电机温升偏高;飞摆转动套上、下串动,喷油、导致主配压周期跳动;不动时间偏长;油缓冲器性能不稳定,不易调整,并网后增、减负荷缓慢等等。但都很快找到了原因和处理办法加以完善。

到目前为止,在各类调速器中,机调的事故率还是最低的。根据许多电站运行表明,机调还是一种较完善的装置,它结构简单,易于维修,可靠性高。美国大古力电站(单机容量为600MW,装有机调和电调两种调速器)的运行主任工程师曾对作者说过:“就我本人来说,比较喜欢机调。因为他几乎没有故障,一旦出现故障,一天内也可恢复,而电调则不行,有时长达一星期。”这些话从一个侧面反映机调经过半个多世纪的使用和改进,在结构上确实达到较完美的程度。

#### 四、机械液压调速器过渡到电气液压调速器的突破点

##### ——电液转换器

既然机调的结构比较完美,可靠性高,又能基本满足许多电站水轮机调速的要求,那么,又是什么原因使机调发展为电调呢?

首先,从调节性能来看,机调是不尽人意的。例如:调节的过渡过程较长;超调量较大;不动时间长;指令信号的执行时间较长;稳定域较窄,特别是对  $T_w/T$  比值较大的对象难以获得较满意的调节效果。其次,用电气方法来测量转速的偏差,并将此偏差放大,按一定关系运算和传

递,比用机械办法要方便、灵活得多。

当然,要推动水轮机的流量调节机构需要很大的功率。且随着调节机构位置不同(导叶开度、浆叶转角)所需的操作力也是变化的。所以,为了推动调节机构,并维持其精确位置,不仅需要很大的力,还需要很大的刚度。用液压的办法获得这种需要,自然是最佳选择。所以电调实质上是一种机、电、液一体化的装置。

问题是,电气和机械液压之间要有一个结合和转换点。即需要一种电气——液压的组零件。以便将电气信号转变为液压(流量、压强)的变化。并以此为根据,进行液压部分的传递、放大,以获得所需的操作功。

机调过渡到电调的突破点在于创造出一个可靠的电气——液压转换器。ASEA 公司为军用的目的首先研制成功这种转换器,因而有了第一台商业用的电液调速器,并于1944年正式在瑞典的 RYDBOHOLM 电站投入运行。

目前,电液转换器有多种型号。结构上都是将一个线圈安置在一个永久磁钢中,线圈与小滑套(或挡板)弹簧相连接、滑套控制一个较大的活塞,作为电液转换器的输出(兼起功率放大作用)。其作用原理是:当电气部分来的信号使线圈的电流发生变化时,作用到线圈的电磁力就发生变化,带动滑套移动,电磁力为弹簧力所平衡。滑套的移动使大活塞两腔液压平衡受到破坏而随之移动,它就是电液转换器的输出信号,并作为一级液压放大器的输入信号。这样就完成了电气到液压的转换过程。

严格地说,电液转换器应看成一个二阶环节。但应用于水轮机调速器时。因其输入信号的频率很低,一般不超过0.4Hz,可以作为比例环节来处理,而不会引起问题。

目前电液转换器的共同缺点是抗油污能力较差,故障率高。一旦出现故障,电调就只能手动方式运行,调速系统就变成一个开环控制系统。因此,研制出高度可靠的电液转换器是促进调速器技术进步的关键技术之一。另外,运行中要经常注意保持油的清洁,使不含水份和杂质,是运行管理上至关重要的事情。

环喷式结构的电液转换器主要特点是滑套不仅可以上、下移动,自身还可以不断的旋转,具有一定的自排污能力。在相同的油质条件下,故障率较低,因此,受到用户的欢迎。(待续)

---

### 太平驿电站提前17天胜利截流

太平驿水电站首部枢纽施工截流于1992年11月8日胜利完成,比补充协定所定的阶段目标提前17天,较施工总进度计划提前7天。由于1992年夏严重的自然灾害,影响了导流工程完工时间,建设者们通过顽强拼搏,于10月上旬完成了导流工程。为了确保截流成功,成勘院设代和监理人员密切配合施工单位,在施工组织,料物储备和机械配置等方面都作了较为充分的准备。

11月8日上午10h,截流拉开战幕,采用单戽堤从右岸进占。一辆辆满载料物的卡车不断向龙口挺进。经过8h的奋战,41m宽的龙口顺利合龙。截流时流量为 $255\text{m}^3/\text{s}$ ,龙口最大落差超过3.5m。太平驿水电站一次截流成功,为闸基基坑的全面开挖创造了有利条件,为1994年第一台机组发电奠定了坚实基础。

(摘自1992年11月15日成勘院报)