

水轮发电机组调速系统的串级鲁棒控制研究

易晓东

新疆伊犁河流域开发建设管理局

DOI:10.32629/hwr.v4i5.2965

[摘要] 在水轮发电机组调速系统中,由于水压力的波动时间以及水启动时间这些系统参数具有一定的不确定性,对调速系统模型有一定程度的影响。为了改良调速系统模型,因此在设计时采用了自控领域鲁棒控制的两种方法来对其进行优化改进。本文在设计调速系统时,设计了两级系统结构,并且相应的设计了两个鲁棒控制器;将伺服电机作为系统的第一级,而在第一级系统中,结合混合灵敏方法设计了第一级的鲁棒控制器;而第二级系统在第一级系统的基础之上,还添加了发电机以及水轮机模型,并且结合 μ 综合的设计方法设计了第二级的鲁棒控制器。除此之外,本文也对设计的两级控制器的控制效果和抗干扰能力进行了测试验证,测试结果发现控制器不仅能很好的控制水轮机的转动速度,还具有相对不错的鲁棒性,并且在性能上明显优于PID控制系统以及PI控制系统。

[关键词] 鲁棒控制器; 调速系统模型; 串级控制器设计

引言

水轮发电机组从性质上看是发电机的一类,将水流冲击带动水轮机的工作,然后再带动发电机工作,从而将水能转换成电能,实现发电功能。而在水轮发电机组当中,调速系统也是重要的组成部分,但因为水轮机的非线性性和稳态常变的变负荷特点,因此水轮机控制系统的设计是一个非常专业也相对困难的课题^[1]。同时,因为巨型水轮发电机组的产生以及不断增长的发电需求,在水轮发电机组控制系统这一块必须要有更大的发展来适应当前的需求,从而提高发电的效率,实现水电厂的潜力。本文在水轮发电机组调速系统模型基础上,结合了混合灵敏度以及 μ 综合的设计方法来王城串级控制系统的设计,意在努力设计出在系统参数不确定以及受到外部干扰时仍然能够有不错的性能的鲁棒控制系统。

1 水轮发电机组调速系统现状

一开始设计水轮发电机组时,主要使用的是PID控制方法来设计调速系统,调速系统的设计相对来说方法简单并且没有特别复杂的控制结构,也是因此在工业应用地相对广泛。到后来,自动控制领域不断发展,研究人员在不断研究的过程当中,为了能让水轮发电机组有更好的性能,将遗传算法和粒子群算法等智能优化算法也应用到了自动控制领域,用来对控制结构进行优化以及优化控制器的调参工作,使控制器能有更好的性能,从而推动水轮机调速系统的发展。但与此同时,智能算法以及模型的应用也对水轮机建模提出了更高的精度要求。

与传统控制理论不同的是,现代控制理论在描述控制系统时使用状态方程的形式,从而就可以建立调速系统的状态模型,因此类似鲁棒控制以及自适应控制等控制方法也能得到应用。鲁棒控制其实是自控领域的一种精度要求低并且能够对系统的不确定性有一个很好的解决的控制办法^[2]。

研究人员在调速器的控制系统研究上不断有着新的发展,例如提出了采用混合灵敏度的方法来设计双回路控制系统,亦或是提出了 μ 综合的办法来设计PI控制系统,当然这些控制系统也有其优点和缺点,具体还是要看实际情况来进行设计。

2 水轮发电机组调速系统模型构建

2.1 调速系统结构介绍

水轮发电机具有非线性以及不平稳,并且参数不确定的特点。水轮发电机的非线性主要体现在发电机内部的不稳定以及容易受到外部干扰两个方面,而参数不确定主要体现在水压力的波动时间,水启动时间以及电机等参数都有不确定的特点。

水轮发电机组的调速系统是机组中控制水轮机速度的装置,主要由电机,继电器,调速器等设备组成。在调速系统当中,控制转速主要是通过通过对驱动调速器来控制水轮机输入的水量,从而来完成转速的控制^[3]。调速系统工作机制如下图所示。

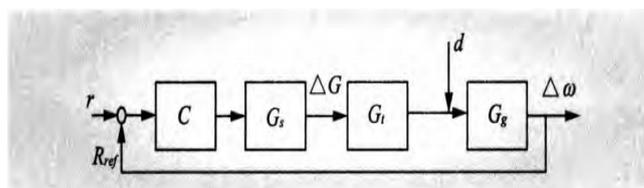


图1 调速系统工作机制图

在上图当中,输入的 r 代表的是理想的转速,而 $\Delta\omega$ 指的是经过调速系统转换的转速,而 R_{ref} 指的是输出转速对 r 的反馈。 C 指的是调速系统的控制器,控制器后续的 G_s , G_t 以及 G_g 分别指的是伺服系统,水轮机模型以及发电机模型。

2.2 水轮发电机组调速系统各大模型以及参数介绍

在水轮发电机组的调速系统控制当中,水头和流速之间有很大关系。在管道流速突变时,容易发生水锤效应,主要指的是在水门关闭时,由于惯性的存在水流对水门有很大的冲击,因为管道具有一定的弹性,导致在管道柱上压力波的传播^[4]。

$$\frac{\Delta H_t(s)}{\Delta V(s)} = -\Omega_p - 0.5 Z_p \tanh(T_c s)$$

上式是水头增量与水轮机当中的水流增速度之比, ΔH_t 为水头增量,而 ΔV 则是水流速度的增加量。

而设计的水轮机模型当中,水速度的增量与水轮机的机械功率增量之间的关系是:

$$\begin{aligned} \Delta V(s) &= 0.5 \Delta H_t(s) + \Delta G(s) \\ \Delta P_m(s) &= \Delta H_t(s) + \Delta G(s) \end{aligned}$$

在上式关系组当中, ΔV 代表的是水速度的增量,而 ΔP_m 代表的是水轮机的机械功率增量。除此之外,考虑到了水锤效应的存在以及摩擦引起的水头损失和非弹性管道对水轮机模型可能造成的影响,给出了水轮机的参数分布模型如下。

$$G_t(s) = \frac{1 - \Omega_p - Z_p \tanh(T_c s)}{1 + 0.5 \Omega_p + 0.5 \tanh(T_c s)}$$

同时,也相应的设计了水轮发电机的模型,如下图所示,其中H代表的是转动惯性的时间系数来对惯性造成的影响进行模型参数调整,D则代表的是水轮发电机的阻尼系数,即阻抗与实际功率下的实际阻抗的比。

$$G_g(s) = \Delta w(s) / \Delta P_m(s) = 1 / (Hs + D)$$

除此之外,也重新设计了液压系统模型,如下图所示,在模型公式当中, T_p 代表的是液压系统的时间常数, T_s 则代表的是伺服电机的时间常数,用两者结合起来设计液压系统模型。本文设计的水轮发电机组调速系统中的多个模型,在参数上都具有一定的不确定性,但是也能够分别规定了取值范围,在实际应用中,可以使用上述设计的各个系统模型构建完整的水轮发电机组的调速系统。

2.3 水轮发电机组调速系统串级控制结构模型设计

因为传统的调速系统具有不稳定性,以及系统参数不确定和易受外部干扰等特点,因此在设计时重新考量了控制结构,改为串级鲁棒控制结构。水门开度对机组发电量影响较大,为了保证转速的相对稳定,在设计串级系统时,水门开度就作为了一级系统的输出,在保证稳定的情况下提高性能。基于这个原理,在设计调速系统时将伺服系统作为第一级系统,然后设计了一级鲁棒控制器来对水门开度进行直接的控制。在第一级系统的基础上,结合了水轮机以及发电机来设计了第二级系统,并且还设计了二级鲁棒控制器来对调速工作进行控制。

根据原本的调速系统工作图结合改进的模型,得到新的调速系统的控制结构图。

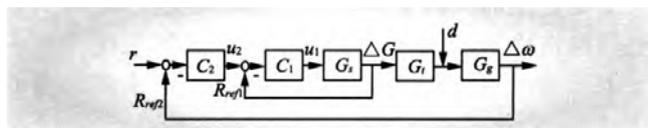


图2 水轮发电机组调速系统串级鲁棒控制结构图

在调速系统控制结构图当中, C_1 和 C_2 分别代表的是串级控制的第一级系统控制器以及第二级系统控制器。 μ_2 代表的是第二级系统的鲁棒控制器的输出信号, μ_1 代表的是第一级系统的鲁棒控制器的输出信号, R_{ref2} 代表的是对第二级系统的鲁棒控制器的反馈输入信号, R_{ref1} 代表的是对

第一级系统的鲁棒控制器的反馈输入信号。

在设计的时候,首先设计第一级系统的鲁棒控制器,从而完成第一级系统的设计;而后再将第一级系统与外部的 G_t 和 G_g 模型相连接成第二级系统,进而再设计第二级系统的鲁棒控制器,这样就完成了调速系统串级控制结构的设计^[5]。通过设计了串级鲁棒控制结构,来保证系统对外部干扰的抑制和控制能力。

在测试的过程中,在施加外部干扰时,串级控制结构的调速系统的整体稳定性也是优于PID控制器的调速系统和 μ 综合的调速系统的,因此设计的串级控制结构在解决系统不稳定性和参数不确定性的问题上是有一定的发挥空间的。

3 结束语

鲁棒控制是自控领域一个相对先进的控制方法,并且针对系统不稳定性和参数不确定性问题有比较好的控制效果。本文设计了水轮发电机组调速系统串级鲁棒控制系统,并且充分的考虑到了系统参数的不确定性以及外部干扰因素的存在,在设计时分为两级系统设计,并在每级系统中设计了鲁棒控制器,第一级采用混合灵敏度设计方法,第二级采用 μ 综合设计方法,结合文中提到的各系统模型,形成了完整的系统结构。在测试过程中,也反馈了设计的串级鲁棒控制系统的抗干扰效果,实际控制性能也是相对不错的。在水轮机系统中,鲁棒控制日后的研究和发展也会起到很大的作用。

[参考文献]

- [1]张黎明,夏毓常. 闸门水力特性原型模型成果对比分析[J]. 水利水电工程设计,2000,19(01):41-43.
- [2]刘翔,姜学智,李东海. 水轮发电机组调速系统的自抗扰控制[J]. 清华大学学报(自然科学版),2001,(10):69-73.
- [3]王汉超. 安谷水电站水轮机调速系统研究开发[D]. 河北工程大学,2014.
- [4]王斌,李正永,李飞,等. 水轮机调节系统的Terminal滑模控制[J]. 水力发电学报,2015,34(8):104-112.
- [5]卢强,梅生伟,孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 清华大学出版社,2008.