

# 不同工况下水轮机调节系统动态特性分析

姜 红 芳

(三峡水利枢纽梯级调度通信中心,湖北 宜昌 443133)

**摘要:**为了更加全面地了解和掌握水轮机调速系统的组成结构和不同工况下的特性,在大量研究理想条件下水轮机调节系统建模与仿真结果的基础上,对水轮机调节系统进行线性和非线性建模,并运用 matlab/simulink 对水轮机调节系统的线性和非线性动态特性进行仿真研究,从而得到了线性条件下空载频率波动和功率扰动波动响应曲线以及非线性环节的系统响应,并对这 2 种条件下的转速和接力器行程曲线进行了对比分析。分析结果表明,在小波动情况下适合运用线性模型,在大波动情况下适合运用非线性模型,而且这 2 种情况下得到的结果相差无几,均能反映同一系统的动态过程。该结论将有助于水轮机调节系统在不同工况下的控制。

**关键词:**线性建模;非线性建模;水轮机调节系统

中图法分类号:TV734.1

文献标志码:A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.21.019

## 1 研究背景

水电站水轮发电机组主要依靠水轮机的调速器来实现稳定运行,而且其发电频率是电能质量的重要指标。水轮机调节系统是通过输出负反馈的调节作用,以使输出的转速在误差范围以内,从而产生符合要求的、稳定的电能。近些年来,桂林电子科技大学的唐良宝等利用一阶微分方程组作为简化数学模型,对水轮机调节系统进行了仿真研究,得到了不同数值的  $T_w, e_n$  的响应曲线;华中科技大学的魏守平把水轮机调节系统分为 4 个部分,建立水电机组仿真系统结构图进行仿真研究;三峡大学黄莉等做了基于 SIMULINK 的湖北清江流域隔河岩水电站水轮机调节系统建模仿真研究;河海大学袁欣建等对水轮机调节系统的 PI 控制器进行了研究。本文着重对水轮机调节系统在线性和非线性 2 种情况下的模型展开了对比研究,并对相应模型动态特性进行了仿真研究<sup>[1-4]</sup>。

## 2 水轮机调节系统的线性传递函数模型

如图 1 所示,微机调速器、机械液压系统、引水系

统、水轮机以及发电机等共同组成了水轮机的调节系统。其中,微机调速器主要是用于控制,而其他几个部分则是被控制的对象,而且被控制的部分就是将水能转化和机械传动变成电能的一个复杂系统,该系统会随着给定参数的改变而变化,是一个典型的非线性系统。但是在小瞬变状态,还是可以采用线性化的方法,为了研究、分析这种系统的动态性能而建立的数学模型,只能是在所关心的重点性能方面,在一定的工况下近似地描述调节对象的线性动态特性,从而期望得到定性和有比较意义的参考结论,以便为参数调节的优化选择提供决策支持。

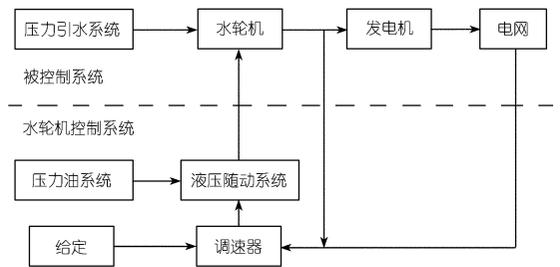


图 1 水轮机调节系统

### 2.1 机械液压系统模块

机械液压系统模块主要由电液伺服阀、主配压阀和主接力器组成。该系统的线性代数部分常常采用下列传递函数

$$\frac{y(S)}{yPID(S)} = \frac{1}{T_y S + 1} \quad (1)$$

式中,  $T_y$  是接力器的响应时间常数, 一般情况下  $T_y = 0.05 \sim 0.25$  s。

### 2.2 引水系统模块

为了便于研究和建模, 在理想条件下, 亦即在线性范围内用刚性水击模型来研究压力引水管道。可以利用刚性水击理论来描述压力引水系统的动态特性。

在理想条件下, 引水系统传递函数为

$$G_Y(s) = -T_w S \quad (2)$$

式中,  $T_w$  为水流惯性时间常数, 一般情况下  $T_w = 0.5 \sim 4$  s。

### 2.3 水轮机模块

水轮机具有比较复杂的非线性、时变性等特性, 其对应的调节系统也是非线性的。然而, 本文是把水轮机当做一种理想的模型(线性)来处理, 理想的水轮机传递系数  $e_y = 1, e_h = 1.5, e_{qy} = 1.0, e_{qh} = 0.5, e_{qx} = 0$ 。经综合考虑, 确定引水系统和水轮机模块传递函数为

$$G_S(s) = \frac{-T_w S + 1}{0.5 T_w S + 1} \quad (3)$$

### 2.4 发电机模块

在小瞬变工况(线性)下, 水轮发电机组运行时的传递函数为

$$G_F(s) = \frac{1}{T_a S + e_n} \quad (4)$$

式中,  $e_n$  为水轮发电机组的综合自调节系数, 一般情况下  $e_n = 0.5 \sim 2.0$ ;  $T_a$  为机组的惯性时间常数, 一般情况下  $T_a = 3 \sim 12$  s。

### 2.5 调节系统线性模型仿真与分析

将上述几个部分组合起来, 在此基础上建立的仿真模型即是本文研究的水轮机调节系统, 如图 2 所示。

#### 2.5.1 空载频率波动仿真

空载频率波动仿真即为仿真情况 1。将表示频率给定的阶跃扰动信源“输入”(图 2 左边)的 3 个参数分别设置为 1, 0 和 1, 将表示功率扰动的阶跃扰动信源“扰动”(图 2 右边)的各项参数分别设置为 0 和 0。

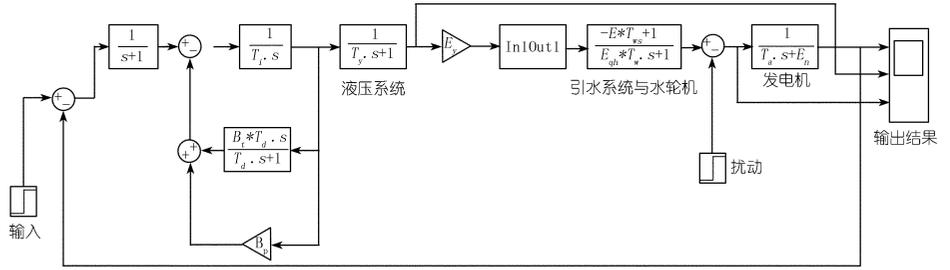


图 2 水轮机调节系统仿真模型

其中,  $B_t = 0.8; T_d = 3.36; B_p = 0; T_i = 0.05; T_y = 0.2$  s;  $T_w = 1.0$  s;  $T_a = 5$  s;  $E_n = 1.0; E = (E_{qy} E_h / E_y) - E_{qh}$ 。仿真结果如图 3 所示。

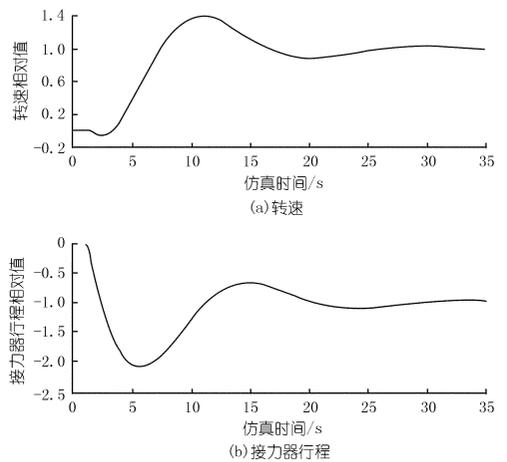


图 3 频率给定扰动阶跃响应

当给定输入即开机启动以后, 调速器按照适当的运行水头规律将导叶开启。随着导叶开度的不断变化, 发电机也有一个过渡过程; 当导叶开度逐步趋于稳定时, 发电机也会稳定运行, 此时, 处于发电状态。

#### 2.5.2 功率扰动波动仿真

功率扰动波动仿真即为仿真情况 2。将表示功率扰动的阶跃扰动信源“扰动”(图 2 右边)的 3 个参数分别设置为 1, 0 和 1, 将表示频率给定的阶跃扰动信源“输入”(图 2 左边)的各项参数分别设置为 0 和 0。其中,  $B_t = 0.8; T_d = 3.36; B_p = 0; T_i = 0.05; T_y = 0.2$  s;  $T_w = 1.0$  s;  $T_a = 5$  s;  $E_n = 1.0; E = (E_{qy} * E_h / E_y) - E_{qh}$ 。仿真结果如图 4 所示。

当施加扰动时, 很明显, 发电机在启动过程中有一个比较大的波动过程, 这种反应也符合实际情况。随着对系统实施逐步调节, 发电机转速会维持在某一个额定值, 且输出稳定。

经过对图 3 和图 4 进行对比分析, 不难看出, 施加扰动给系统带来的波动还是比较大的。随着负荷的改变, 相应的变化会使导水机构的开度发生改变, 不过, 最终会使发电机组的转速趋于稳定。

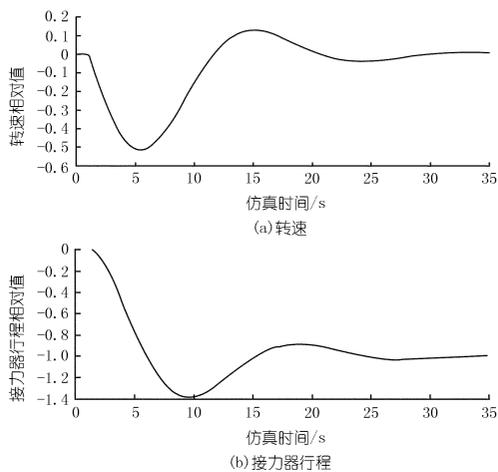


图 4 功率扰动阶跃响应

### 3 水轮机调节系统的非线性传递函数模型

由于水轮机除了具有比较复杂的非线性、时变等特性以外,还具有机械液压环节的非线性,这样就使水轮机调速系统成为一个典型的非线性系统,很难建立比较合理和准确的数学函数表达式。在这种情况下,如果采用物理模型开展分析研究,则成本大,而且难以准确地模拟原系统的各个环境条件,基本上无法得到可靠的研究结果。有鉴于此,在上述建立水轮发电机组线性化数学模型的基础上,建立了水轮发电机组动态过渡过程非线性仿真模型,且利用该模型开展了仿真研究和分析<sup>[5]</sup>。

水轮机调节系统中包含很多非线性因素,主要有水轮机自身的非线性和随动系统中的机械液压元件所引起的执行机构非线性。

本文在线性模型基础上,根据系统的工作原理,引入了相应的非线性环节;非线性环节的随动系统和水轮机的非线性。

对于随动系统部分,为了比较线性系统和非线性系统对系统的影响,该系统中线性部分结构和参数保

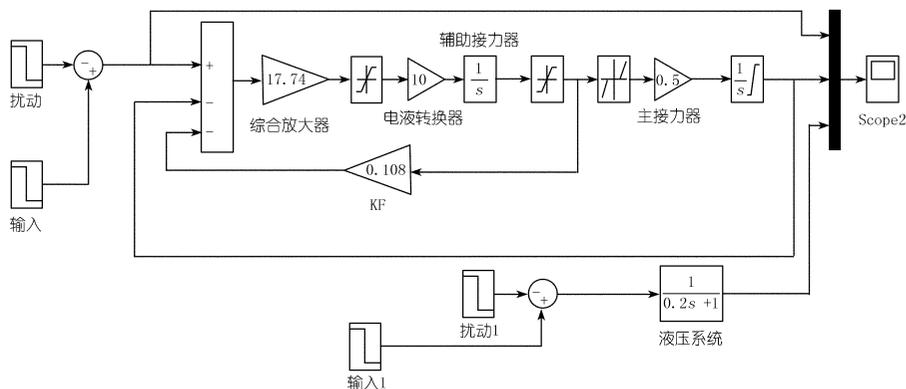


图 5 带非线性的随动系统模型

持与上述线性系统模型相同,在综合放大器和电液转换器之间插入饱和非线性环节,在辅助接力器的输出端引入饱和非线性环节,在主接力器输入端加入死区非线性环节。非线性模型如图 5 所示,仿真结果如图 6 所示。

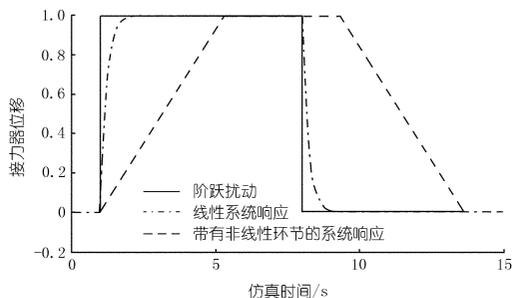


图 6 带非线性的随动系统阶跃响应

在相同条件下对比发现,有非线性环节的系统响应会缓慢一些,但是最终都趋于稳定。

再将该带非线性环节的随动系统用于替换上述机械液压系统的模块,并仍采用上述仿真参数,即  $B_t = 0.8$ ;  $T_d = 3.36$ ;  $B_p = 0$ ;  $T_i = 0.05$ ;  $T_y = 0.2$  s;  $T_w = 1.0$  s;  $T_a = 5$  s;  $E_n = 1.0$ ;  $E = (E_{qy}E_h/E_y) - E_{qh}$ , 来进行仿真,仿真结果示于图 7 中。

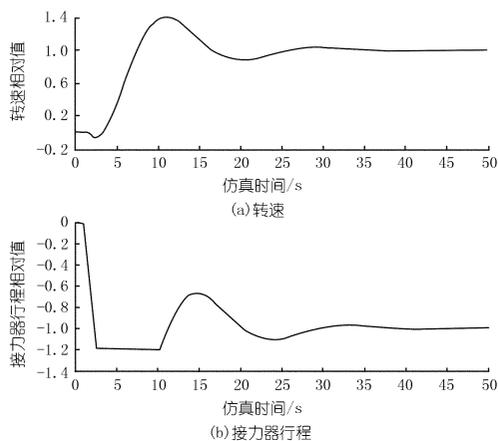


图 7 带非线性环节的调节系统仿真结果

当引入非线性环节以后,由于主配压阀的行程受到了限制,即依据实际情况对相关量作了相应设置,从而导致接力器运动的速度受到限制(从图 7 中的接力器行程曲线可以看出)。因此,受其影响,水轮机调节系统过渡过程时间有所延长,振荡程度有所增加,而且过渡过程的品质也有所下降。这种情况也正好与实际现象相符合。

#### 4 两种模型水轮机调节系统动态特性<sup>[6-7]</sup>

对线性和非线性仿真结果进行了对比分析。从图 3 和图 7 可以看出,带有非线性环节的调节系统波动过程稍微要长一些,即调节的时间要长一些,但还是趋于稳定的;带非线性环节的系统过渡过程时间和振荡次数略有增加,该结果与实际中的大波动情况下的调节过程十分相似。

综合以上 2 种模型的仿真结果,可以得出以下结论。

(1) 本文很简单直观地展示了水轮机调节系统的动态特性,说明线性模型有利于分析各参数对系统的影响,能够在参数调整和特性分析方面提供帮助。

(2) 利用线性和非线性模型都能够得到相似的动态特性,只是在大波动条件下,系统会发生明显的变化,得到的结果明显不符合实际情况,所以线性模型无法仿真实际情况,而非线性模型则能准确地描述系统本质的动态特性,可以得到更加切合实际的非线性特性。

(3) 线性模型针对的是小波动,非线性模型针对的是大波动,但是大小波动过渡过程实质上是同一系统的动态过程(本文在研究时就是设定统一模型,相

同参数),而 2 种模型的仿真结果比较相近,说明大波动过渡过程即非线性模型在本质上完全适用于小波动过程。

#### 5 结语

本文对水轮机调节系统开展了线性和非线性动态特性仿真研究。通过仿真研究,获得了线性条件下空载频率波动和功率扰动波动响应曲线以及非线性环节的系统响应。然而,本文并未具体寻找合适的调节参数来实现最佳控制,因此,有必要开展深入的专题研究,以便更加有效、准确地找到合适的参数,即最优解。

#### 参考文献:

- [1] 魏守平. 水轮机调节系统的 MATLAB 仿真模型[J]. 水电自动化与大坝监测, 2009, 33(4): 7-11.
- [2] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [3] 赵林明. 水轮机数学模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [4] 沈祖谟. 水轮机调节系统分析[M]. 北京: 水利电力出版社, 1996.
- [5] 刘琪. 水轮机调节系统实时仿真试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [6] 廖忠. 小波网络及其在水轮机调节系统中的应用研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [7] 魏守平. 水轮机调节系统的动态过程特性[J]. 水电自动化与大坝监测, 2012, 36(1): 30-34.

(编辑: 赵秋云)

### Analysis of dynamic characteristics of hydro – turbine governing system in different working conditions

JIANG Hongfang<sup>1,2</sup>

(Three Gorges Cascade Dispatch & Communication Center, Yichang 443133, China)

**Abstract:** For a more comprehensive understanding and mastering of the structure and features of hydro – turbine governing system under different working conditions, the same parameters were compared and studied on the basis of the modeling and simulation results of hydro – turbine governing system mostly obtained in ideal research conditions. Through linear and nonlinear modeling of hydro – turbine governing system, simulation study on linear and nonlinear dynamic characteristics of hydro – turbine governing system was conducted by matlab/simulink. Idle frequency fluctuations and power disturbance response curves under linear condition and the nonlinear system response are obtained from the simulation, and the rotational speed and servomotor stroke curves under linear and nonlinear conditions were compared and analyzed. The analysis shows that linear modeling is suitable for small fluctuation while nonlinear modeling is suitable for large fluctuation. The results of these two cases are similar and able to reflect the dynamic process of the same governing system. The conclusion can provide some help for the control of hydro – turbine governing system in different working conditions.

**Key words:** linear modeling; nonlinear modeling; comparative study; hydro – turbine governing system