

# 电力系统稳定计算用国产 700 MW 水轮机 调节系统建模及参数测试

王官宏, 濮钧, 陶向宇, 刘增煌

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Modeling and Parameter Testing of Governing System for Domestic-Manufactured 700 MW Hydraulic Turbine Suitable to Power System Stability Calculation

WANG Guan-hong, PU Jun, TAO Xiang-yu, LIU Zeng-huang

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** By means of on-site measurement of model parameters of a certain governing system for domestic-manufactured 700 MW hydraulic turbine, a governing system model of hydraulic turbine suitable to power system stability calculation is built. Simulation of the built model are performed by power system analysis software package (PSASP) developed by China Electric Power Research Institute (CEPRI); through the examination of the measured model parameters of both prime mover governing system are modified; finally accurate model parameters of the built governing system model for hydraulic turbine suitable to power system stability calculation are given. The built governing system is incorporated into PSD-BPA (GM card) and put into practical application. Application results show that the built governing system model can correctly reflect response characteristics of practical 700MW hydraulic turbines.

**KEY WORDS:** 700 MW hydraulic turbine; turbine governing system; model parameters; stability calculation; power system

**摘要:** 通过现场实测某 700 MW 水轮机调节系统模型参数, 建立了适用于电力系统稳定计算用的水轮机调节系统模型。用电力系统分析综合程序对该模型进行了仿真, 对实测的原动机及调节系统模型参数进行了校核, 最终给出了电力系统稳定计算用水轮机调节系统模型准确参数。此模型已经编入电力系统稳定计算程序(PSD-BPA)并投入使用。结果表明, 该模型能反映实际现场设备响应特性。

**关键词:** 700 MW 水轮机; 水轮机调节系统; 模型参数; 稳定计算; 电力系统

## 0 引言

电网基础参数关系到电力系统稳定分析的准确性。随着电网规模的不断扩大, 分析工作使用的模型、参数对计算结果的影响越来越大。模型的完

整和参数的精确是进一步提高电网安全稳定分析准确度的必要条件<sup>[1]</sup>。为使数字仿真更加真实地再现实际系统的响应过程, 需要以现场采集数据为基础, 对模型进行参数辨识<sup>[2]</sup>。因此必须在系统“4大参数”的统计、调查、研究和建模的基础上, 建立统一的互联电网设备参数数据库, 保证电力系统计算数据来源的唯一性和可靠性, 为全国互联电网的计算分析提供准确的基础数据<sup>[3]</sup>。在电网中, 大型水轮机组调速系统的动态特性不仅影响机组自身的安全性和经济性, 还影响整个电网的供电质量(电压和频率)。在电网的动态过程中, 调节系统的影响应深入研究<sup>[4-8]</sup>。水轮机调节系统的响应速度和调节品质已得到极大的提高, 为更好地开展大区域互联电网稳定性分析的研究, 研究原动机调节系统对电力系统动态稳定的影响十分必要<sup>[9-16]</sup>。

## 1 调节系统模型参数实测

### 1.1 水轮机及调节系统构成

被试机组为巨型混流式水轮发电机组<sup>[10-16]</sup>, 额定功率为 700 MW, 最大功率为 777.7 MW。

该机组水轮机调节系统为典型的数字式电液调节系统, 由数字控制和液压执行机构等环节组成。该控制环节采用并联 PID 控制, 具备按频率给定调节、按功率给定调节、导叶开度限制、网频跟踪控制、故障处理和常规开停机等功能。调节系统机械部分液压主要有比例阀、配压阀、接力器、油泵、压力油罐、回油箱、调速器电气柜、油压装置柜及测量用传感器等, 另外还有 1 套机械过速开关。

## 1.2 模型参数实测

### 1.2.1 控制回路 PID 及死区测试

根据水轮机调节系统厂家提供的模型框图及实际物理构成，采用基于物理组成的分环节建模及测量方法。调节系统的模型主要分为数字控制部分模型和液压执行机构模型 2 大部分。在水轮机调节系统调试合格后分别对这 2 部分进行建模测试。

并联 PID 控制规律的一般表达式可以描述为

$$Y(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{K_d s}{1 + T_F s} \quad (1)$$

其中： $K_p$  为比例放大倍数； $K_i$  为积分系数； $K_d$  为微分系数； $T_F$  为微分时间常数。对于经典的并联 PID 环节，其结构清晰，物理概念明确，可以对比例、积分及微分及其组合特性分环节测量。测量可以采用时域法，也可以采用频域法。

待校核某环节 PID 设为定值，在 PID 环节的输入端施加阶跃扰动信号，可单独对比例放大环节进行校核。图 1 为  $K_p=10$  的试验录波曲线。

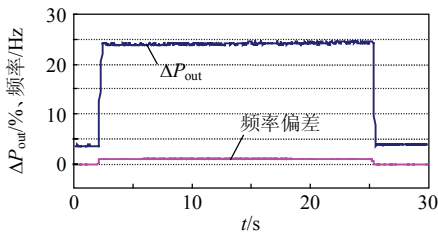


图 1  $K_p=10$  的校核试验录波曲线

Fig. 1 Testing and verifying curve when  $K_p=10$

PID 环节输出变化量为  $\Delta P_{OUT}=20.1\%$ ，输入频率变化量  $\Delta F=2\%$ ，则  $K_p=20.1\%/2\%=10.05$ ，与  $K_p$  设定值 10 基本吻合。图 2 为比例、积分环节校核试验录波曲线。

选取 PID 积分区域内某区间段作为积分校核。

由  $K_i = \frac{\Delta P_{OUT}/\Delta T}{\Delta F}$  得积分实测  $K_i=1.039$ 。图 3 为比例、微分环节校核试验录波曲线。

本系统中微分环节并非一单纯的微分。实际的传递函数应该为  $\frac{K_d s}{1 + T_F s}$ ，根据提供的资料， $T_F=0.05$  s。

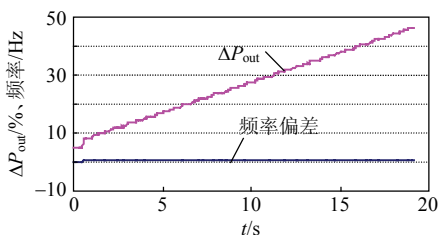


图 2  $K_p=1$  和  $K_i=1$  时的校核试验曲线

Fig. 2 Testing and verifying curve when  $K_p=1$  and  $K_i=1$

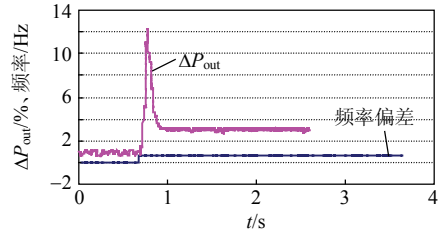


图 3  $K_p=1$  和  $K_d=0.4$  时的校核试验曲线

Fig. 3 Testing and verifying curve when  $K_p=1$  and  $K_d=0.4$

计算知  $T_F=0.058$  s，与厂家提供的  $T_F=0.05$  s 相吻合。图 4 为积分校核中实际录波曲线与计算曲线对比。

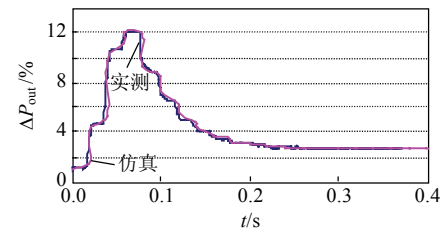


图 4  $\Delta P_{OUT}$  实际录波与计算曲线

Fig. 4 The actual curve and calculation curve of wave curves of  $\Delta P_{OUT}$

图 4 中， $\Delta P_{OUT}$  的实际录波曲线与计算得到的曲线吻合良好。投入人工死区，置人工死区不同整定值，据此试验结果绘制曲线，求出实测人工频率死区。设置频率死区为 0.3 Hz，图 5 为死区测试结果。由图 5 知，频率死区设置值与试验结果相吻合。

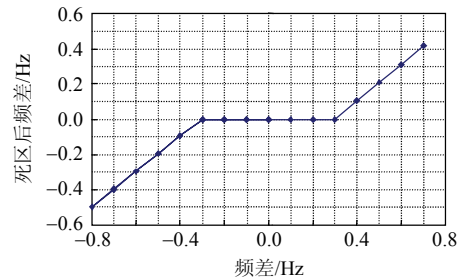


图 5 频率死区测试结果

Fig. 5 Results of frequency deadband testing

### 1.2.2 静态特性测试

将  $b_p$  设置为 6%，用稳定的频率信号源输入额定频率信号，以开度给定将导叶接力器调整到 50% 行程附近。然后升高或降低频率使接力器全关或全开，调整频率信号值，使之按一个方向逐次升高和降低，在导叶接力器每次变化稳定后，记录该次信号频率值及相应的接力器行程，分别绘制频率升高和降低的调速器静态特性曲线，如图 6 所示。

校核得到  $b_p=6.03\%$ ，与设定值  $b_p=6\%$  基本吻合。据此还可以得到水轮机调节系统转速死区及非线性度。

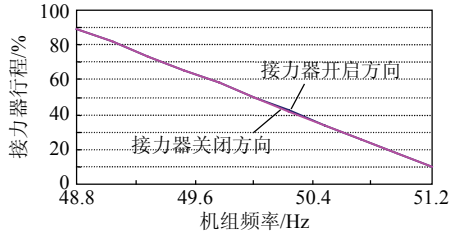


图 6 静态特性曲线

Fig. 6 Curve of static characteristic

1.2.3 执行机构测试

执行机构部分主要由电液转换环节、配压阀以及接力器等部分组成。比例阀为一带反馈的积分环节，可以用一阶惯性环节  $\frac{1}{1+T_p s}$  描述。其中  $T_p$  为电液转换时间，该时间常数很小，一般为 10 ms 左右。接力器为一积分环节，用  $\frac{1}{T_g s}$  表示。其中  $T_g$  为积分时间常数，接力器在开启或者关闭时  $T_g$  值不同。该环节的模型框图可以用图 7 表示。其中  $K_a$  为综合放大倍数，P\_Rate 和 P\_Limit 分别为速率限制和限幅环节。液压系统中还有死区、延时等非线性环节，图中没有表示。

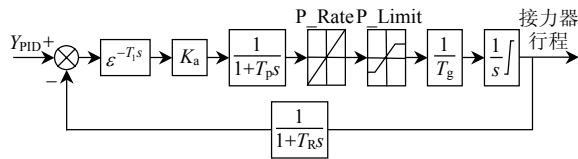


图 7 液压系统模型

Fig. 7 Model of hydraulic system

开启油压系统进行液压随动系统扰动试验，获取比例阀和接力器等的响应曲线，如图 8~9 所示。通过分析曲线的特性可以辨识液压系统 PID 调节部分模型及液压系统限幅环节等非线性模型参数。

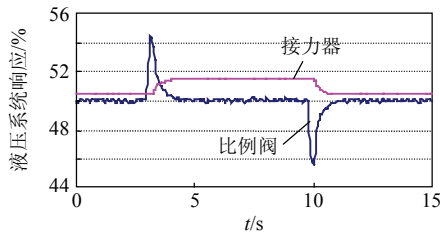


图 8 执行机构 1% 小阶跃扰动试验

Fig. 8 Testing of 1% step response of executing agency

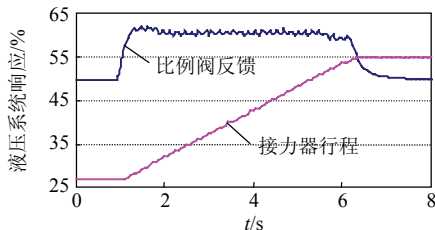


图 9 执行机构 30% 大阶跃扰动试验

Fig. 9 Testing of 30% step response of executing agency

通过计算，电液转换时间常数为 0.012 s，与厂家提供的 0.01 s 基本吻合，即

$$G(s) = 1/(1 + T_p s) = 1/(1 + 0.012s) \quad (2)$$

执行机构接力器的传递函数为

$$G(s) = 1/(T_g s) = K_g / s \quad (3)$$

由试验结果整理得到仿真计算用积分系数  $K_g$ 。开启方向  $K_g=0.54$ ，关闭方向  $K_g=0.15$ 。

液压系统其它参数可采用时域或频域的方法加以辨识，文献[2]提出的基于 GA 的智能辨识法也是有效方法之一。

1.2.4 频率扰动试验

机组在 503 MW 工况进行频率扰动试验。试验结果如图 10 所示。

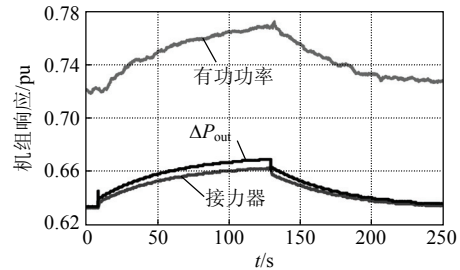


图 10 频率扰动试验机组响应曲线

Fig. 10 Curve of frequency disturbance testing response

动态扰动中机组有功功率从 503 MW 开始变化，稳定于 537 MW。机组调节过程中，有功调节有 2 MW 左右的波动，伴有较为明显的水锤现象。

2 模型的建立

我国电力系统仿真软件如电力系统计算分析软件 PSD-BPA 以及电力系统综合仿真程序 PSASP 中都没有合适的调节系统模型。在 PSASP 建立调节系统 2075 模型，考虑了限幅等非线性环节，在 PSASP 程序中采用文本方式编辑，非线性环节在图 11 中

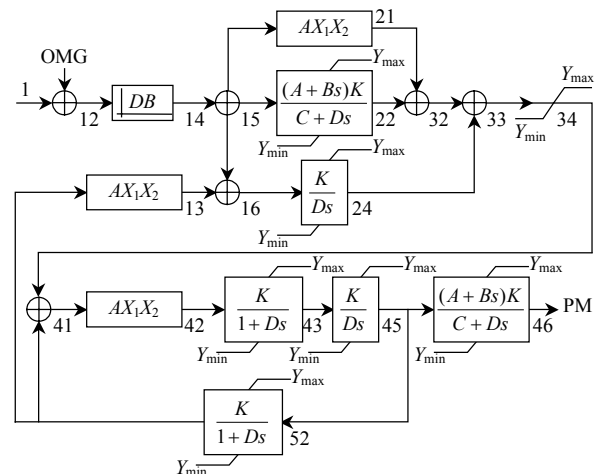


图 11 水轮机调节系统模型

Fig. 11 Model of hydro-turbine governor system

没有显示。

目前该调节系统模型已经编入 PSD-BPA 暂态稳定程序并投入使用，新增的暂态稳定程序中的水轮机调节系统卡片如图 12 所示。

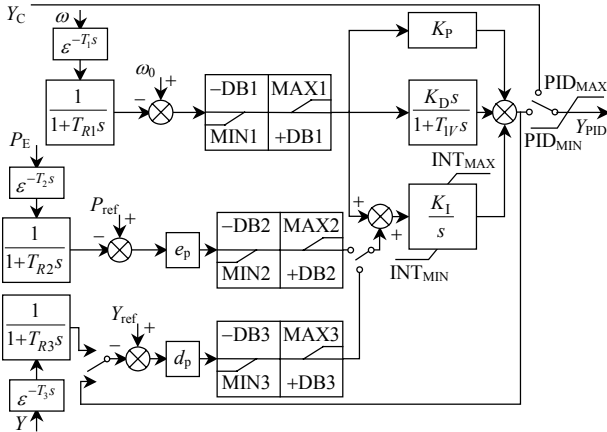


图 12 BPA 中的 GM 卡  
Fig. 12 GM card in BPA

### 3 仿真校核

#### 3.1 仿真参数

部分稳定计算参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Parameters for simulation

参数项	标识	仿真值
频率测量时间常数	$T_R$	0.02
转速死区(负方向)	-DB1	-0.001
转速死区(正方向)	DB1	0.001
比例放大倍数	$K_P$	3
微分放大倍数	$K_D$	0.3
积分放大倍数	$K_I$	0.4
微分时间常数	$T_D$	0.05
PID 积分上限	INT_MAX	1.0
PID 积分下限	INT_MIN	-1.0
PID 上限	PID_MAX	1.2
PID 下限	PID_MIN	0
永态转差系数	$b_p$	0.05
永态功率差值系数	$e_p$	0.05
负方向死区	-DB2	-0.001
正方向死区	DB2	0.001
电液转换时间	$T_p$	0.012
$K_g$ 开启方向	$K_{gup}$	0.54
$K_g$ 关闭方向	$K_{gdn}$	0.15

#### 3.2 静态仿真校核

在仿真模型中进行仿真校核，接力器行程仿真结果与实际测量结果对比如图 13 所示。

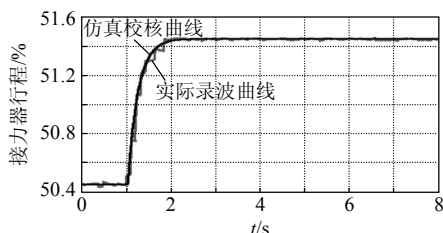


图 13 接力器行程实际录波与仿真曲线  
Fig. 13 The actual and simulation curve of servomotor

#### 3.3 动态仿真校核

动态仿真<sup>[17-18]</sup>校核采用华中电网 2008 年某方式数据，引水系统水轮机模型采用刚性水击模型。根据试验所得数据，机组有功出力在电力系统综合仿真程序 PSASP 中的仿真结果如图 14 所示。

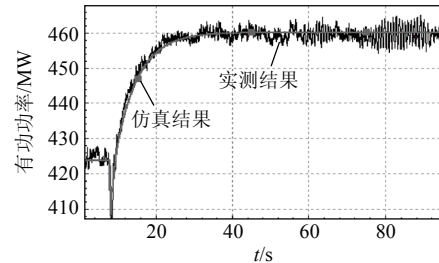


图 14 有功功率实际曲线与仿真曲线  
Fig. 14 The actual curve and simulation curve of active power

频率扰动仿真中，实际功率与仿真有功功率最大偏差为 2 MW，出现在频率阶跃后 13.3 s。实际录波中，有功功率在扰动 80 s 后稳定在 573.8 MW，仿真有功功率曲线在扰动 80 s 后稳定在 574 MW。因机组正常运行时，有功功率有较小的扰动，本仿真中有功功率与实际有功功率的偏差可以忽略，有功仿真曲线与实际录波曲线相吻合。仿真校核中考虑了纯延时等非线性环节的影响。

### 4 结论

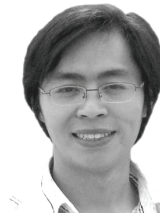
- 1) 在水轮机调节系统模型参数测试工作中，完成了数字控制部分模型辨识、电液转换、接力器等液压机构(执行机构)传递函数的测试辨识及负荷扰动等试验。
- 2) 在现场试验基础上得出了水轮机调节系统的稳定计算用仿真模型。
- 3) 通过 PSASP 及 PSD-BPA 仿真计算，验证了原动机及调节系统模型参数的准确性。
- 4) 本文给出的水轮机调节系统模型和参数可以为电力系统稳定计算所使用。
- 5) 国产 700MW 水轮机调节系统模型已编入电力系统稳定计算程序并投入使用。结果表明，该模型能反映实际现场设备响应特性。

### 参考文献

[1] 王官宏, 陶向宇, 李文峰, 等. 原动机调节系统对电力系统动态稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 80-86.  
Wang Guanhong, Tao Xiangyu, Li Wenfeng, et al. Influence of turbine governor on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 80-86(in Chinese).

[2] 李悝, 张靖, 孙海顺, 等. 水轮机及其调速系统建模与参数辨识方法[J]. 水电能源科学, 2006, 24(4): 79-82.

- Li Li, Zhang Jing, Sun Haishun, et al. Study on modelling and parameter identification of hydro turbine and governor system[J]. Water Resources and Power, 2006, 24(4): 79-82(in Chinese).
- [3] 国家电网公司. 电力系统四大参数对暂态稳定的影响[C]. 电力系统建模与仿真技术研讨会, 湖南, 2004.
- [4] 朱方, 刘增煌, 高光华. 电力系统稳定器对三峡输电系统动态稳定的影响[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 44-47.  
Zhu Fang, Liu Zenghuang, Gao Guanghua. Influence of power system stabilizer on dynamic stability of three gorges power system[J]. Power System Technology, 2002, 26(8): 44-47(in Chinese).
- [5] 高慧敏, 刘宪林, 徐政. 水轮机详细模型对电力系统暂态稳定分析结果的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 5-8.  
Gao Huimin, Liu Xianlin, Xu Zheng. Effect of detailed hydro turbine models on analysis results of power system transient stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 5-8(in Chinese).
- [6] 王官宏. 原动机调节系统对电力系统动态稳定影响的研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2008.
- [7] 西安交通大学, 清华大学, 浙江大学, 等. 电力系统计算[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978: 312-375.
- [8] 秦勇, 李卫平, 张春丽, 等. 水轮机及其调速系统在单机无穷大系统低频振荡中的作用[J]. 水利发电, 2006, 32(8): 56-58.  
Qin Yong, Li Weiping, Zhang Chunli, et al. Effect of turbine and speed governor on low-frequency oscillation of single generating unit infinitely great system[J]. Water Power, 2006, 32(8): 56-58(in Chinese).
- [9] 汤涌, 宋新立, 刘文焯, 等. 电力系统全过程动态仿真中的长过程动态模型: 电力系统全过程动态仿真软件开发之三[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 20-25.  
Tang Yong, Song Xinli, Liu Wenzhuo, et al. Power system full dynamic simulation(Part III): long term dynamic models[J]. Power System Technology, 2002, 26(11): 20-25(in Chinese).
- [10] Fang H Q, Shen Z Y. Dynamic real-time simulator for hydraulic turbine generating unit based on programmable computer controller [C]. The 30th Annual Conference of the IEEE industrial Electronics Society, Busan, Korea, 2004.
- [11] Report of working group on prime mover and energy supply models for system dynamic performance studies. Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 164-169.
- [12] 李艳军, 刘宪林. 考虑水力系统详细模型的电力系统暂态过程仿真[J]. 电网技术, 2005, 29(4): 61-64.  
Li Yanjun, Liu Xianlin. Power system transient simulation considering detailed models of hydraulic system [J]. Power System Technology, 2005, 29(4): 61-64(in Chinese).
- [13] 李华, 史可琴, 范越, 等. 电力系统稳定计算用水轮机调速器模型结构分析[J]. 电网技术, 2007, 31(5): 25-28.  
Li Hua, Shi Keqin, Fan Yue, et al. Structure analysis of water turbine governor model for stability calculation of power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(5): 25-28(in Chinese).
- [14] 沈祖诒. 水轮机调节[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 1-16.
- [15] 魏守平. 水轮机控制工程[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005: 326-343.
- [16] 罗旋. 水轮机调节系统的研究与仿真[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [17] 中国电力科学研究院. PSD-BPA 暂态稳定程序用户手册[M]. 3.0版. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [18] 中国电力科学研究院. PSASP 综合稳定计算程序暂态稳定计算手册[M]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.



王官宏

收稿日期: 2009-08-22。

作者简介:

王官宏(1982—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统建模、电力系统运行与稳定控制, E-mail: wanggh@epri.sgcc.com.cn;

濮钧(1970—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制;

陶向宇(1981—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统建模、电力系统运行与稳定控制;

刘增煌(1937—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统稳定与控制。

(责任编辑 王晔)