

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1026.2012.16.021

水轮机调速系统自定义建模与应用

黄青松, 徐广文

(广东电网公司电力科学研究院, 广东省广州市 510080)

摘要: 针对电力系统稳定性分析工具 BPA4.0 程序提供的水轮机调节系统模型仿真精度不高的缺点, 提出了自定义的水轮机调节系统模型, 由比例-积分-微分(PID)型调节器加二阶随动系统构成调速器模型, 用非线性高阶传递函数表示原动机模型, 并开发了改进的最小二乘算法、遗传算法和粒子群优化算法 3 种原动机模型辨识方法。仿真结果表明, 自定义模型的仿真结果较 BPA4.0 中的模型更接近实际, 仿真指标满足电力系统稳定分析的需求。

关键词: 电力系统稳定性; 水轮机; 调节系统; 自定义模型

0 引言

建立可表征现代调速系统实际特性的模型是提高电网安全稳定分析结论对系统运行指导性的重要基础^[1]。为了研究水轮机调节系统的动态特性对电网的影响, 实测其调速系统参数, 建立符合电网稳定性分析所需的相应机组的调速系统模型十分必要。为了克服已有电力系统稳定计算分析软件 BPA4.0 中水轮机调速系统模型较简单的缺点, 提出自定义的水电机组调速系统模型。水轮机调速系统模型由调速器模型和水轮机原动机模型组成。调速器模型有机械液压型、并联比例-积分-微分(PID)中间接力器型、并联 PID 一级电液随动系统等类型, 只要选取原理结构相近的调速器模型, 一般能较真实地反映控制系统的实际特性^[1]。原动机模型为理想水轮机模型。文献[2]指出: 水轮机模型对于用线性分析技术调整控制系统是有益的。但是, 对于涉及功率输出和频率大变化的研究, 这样的模型是不适合的, 需要采取更详细的非线性模型^[3]。

本文提出用非线性高阶传递函数表示水轮机调节系统被控对象的复杂模型, 进行参数实测和模型辨识, 建立实测模型, 然后进行模型验证。仿真表明, 该模型更符合实际。

1 水轮机及其调节系统模型

水轮机及其调节系统模型由调速器模型和引水道-水轮机模型组成。调速器模型模拟导叶开度的动作情况, 以此通过引水道-水轮机模型仿真得到输出功率。

调速器模型由调节系统模型和执行机构模型组成。调节系统模型如图 1 所示。图中: K_P , K_I , K_D 分别为比例、积分、微分增益; T_D 为微分时间常数; E_f 为人工频率死区; b_p 为永态调差率; e_p 为永态转差系数; Y_{PID} 为调节器输出; Y_{max} 和 Y_{min} 分别为调节器输出上、下限值; F_i 为机组频率; F_g 为频率给定值; Y_g 为开度给定值; P_g 为功率给定值; P 为机组功率。

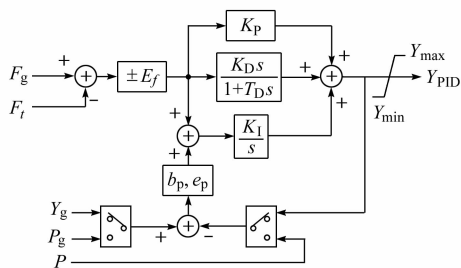


图 1 调节系统模型
Fig. 1 Control system model

该调速器执行机构属于 2 级液压放大的机械液压随动系统, 忽略前置放大级响应时间, 其简化模型如图 2 所示。图中: K_c 为电液转换环节系数; u_m 为主配压阀死区; T_y 为主接力器反应时间 (接力器时间常数); Y_{max}' 和 Y_{min}' 为接力器输出上、下限值。

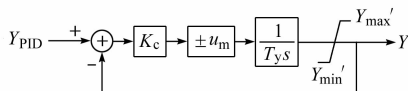


图 2 执行机构模型
Fig. 2 Actuator model

水轮机调速系统是一个水、机、电的综合调节系统, 调节对象的特性十分复杂^[2], 而且呈现较强的非线性特性。在水轮机调节过程中, 系统频率发生变

化,超过设定的频率死区就会引起导叶开度变化,从而引起流量变化,在调节过程中产生水锤效应。因此,从频率的变化到功率输出是一个非线性时变过程,从满足电力系统稳定计算精度考虑,将电站的引水系统、水轮机、发电机组、电网等部分作为一个整体(被控对象部分)进行建模。选用一种能反映工程实际的高阶传递函数(见图 3)加以代替。图 3 中, $b_3, b_2, b_1, b_0, a_4, a_3, a_2, a_1, a_0$ 为转递函数系数。

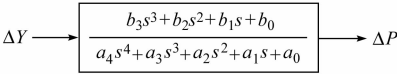


图 3 引水道-水轮机模型
Fig. 3 Headrace and hydro-turbine model

2 水轮机及其调速系统模型辨识

在自定义调速系统模型中,调速器模型由 PID 型电子调节器模型和二阶随动系统模型组成,考虑了转速死区(主配压阀遮程)、人工频率死区、导叶动作速度响应时间和导叶开度限幅等非线性环节。其中,二阶随动系统可根据情况通过忽略 T_{y1} 而转换为一阶系统。不同工况点附近辨识得到的高阶传递函数代表的原动机模型库,能够更好地模拟原动机的特性。其模型框图如附录 A 图 A1 所示。

2.1 调速器模型的辨识

自定义调速器模型涉及转速死区 $i_x, b_p, E_f, K_P, K_I, K_D, T_{y1}, T_y$, 导叶开启时间和关闭时间等参数,可参考 GB/T 9652.2—2007《水轮机控制系统试验》、DL/T 496—2001《水轮机电液调节系统及装置调整试验导则》在机组静态下辨识得到。以下是某抽水蓄能机组调速器模型的辨识结果。①电子调节器参数实测结果:人工频率死区类型为机械型; $E_f = 0.06\%$, $K_P = 3.5\%$, $K_I = 0.590\text{ s}^{-1}$, $K_D = 3.03\text{ s}$, $T_D = 0.116\text{ s}$; $b_p = 4.74\%$ 。②随动系统实测参数结果: $T_y = 0.22\text{ s}$; $K_c = 1$; $u_m = 0.042\%$; 接力器开启时间 $T_g = 14.8\text{ s}$; 接力器关闭时间 $T_f = 14.2\text{ s}$; 导叶开度最小值为 0。

2.2 原动机模型的辨识

与调速器模型参数的获取不同,高阶传递函数表示的原动机模型获取必须根据机组的动态频率扰动试验数据辨识。针对模型的辨识,开发了改进的最小二乘(LS)算法、遗传算法(GA)和粒子群优化(PSO)算法^[4-6]。PSO 算法在水电机组调速系统建模方面的应用还是首次,经工程实践检验了其有效性,从而丰富了水电机组原动机模型辨识方法。

2.2.1 辨识方法

目前常用的参数辨识方法有频域辨识法和时域

辨识法^[7],它们有一个共同的缺点,即只能进行线性系统的参数辨识,所辨识的结果无法反映系统的非线性动态特性^[7]。水轮机调节系统是一个复杂的非线性、参数时变的闭环调节系统,引水道-水轮机模型是包含多个非线性环节的模型,为辨识得到模型参数,开发了改进的 LS 算法、GA 和 PSO 算法。

参数辨识的基本思想如图 4 所示。对真实系统和系统模型给予相同的激励信号,比较真实系统输出和模型输出,根据偏差和等价准则,应用辨识算法不断寻优系统模型参数直至满足等价准则为止,把得到的模型参数与模型结构相组合,得到一定条件下的真实系统的等价系统。

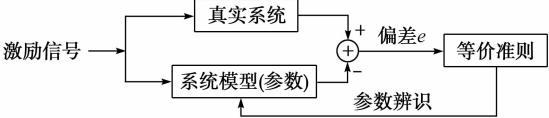


图 4 参数辨识基本思路
Fig. 4 Basic idea of parameter identification

2.2.2 辨识结果

扰动数据文件名为响应时间测定,功率模式;测试条件为: $b_p = 4\%$, $K_P = 3.5\%$, $K_I = 0.7\text{ s}^{-1}$, $K_D = 2.03\text{ s}$, 阶跃频率为 0.20 Hz , 实测数据见图 5。

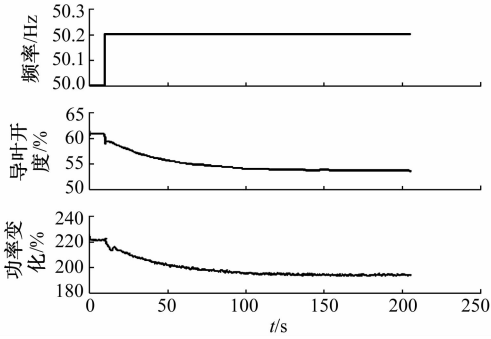


图 5 实测的扰动数据
Fig. 5 Measured disturbance data

表 1 根据实测扰动数据采用 LS 算法、GA、PSO 算法辨识得到水轮机组某工况下的原动机模型,与实测数据吻合较好,平均相对几何误差较小。

表 1 不同方法辨识得到的原动机模型
Table 1 Prime mover models obtained by different identification methods

算法	传递函数	功率吻合度/%	平均几何相对误差/%
LS	$\frac{-0.04s+1.26}{0.59s^2+1.74s+1.00}$	98.163	0.035
GA	$\frac{-1.00s+1.29}{0.82s^2+1.06s+1.00}$	92.149	0.059
PSO	$\frac{-0.70s+1.25}{1.21s^2+0.70s+1.00}$	94.060	0.037

3 仿真结果

由静态参数实测得到的调速器模型和通过动态试验数据辨识得到的原动机模型构成了该水轮机组调速系统自定义模型,其仿真结果与 BPA4.0 程序提供的模型以及实测数据的对照情况见附录 B 图 B1。自定义模型的开度吻合度为 91.860%(平均几何相对误差小于 0.017%),LS 算法功率吻合度为 98.163%(平均几何相对误差小于 0.035%),GA 功率吻合度为 92.149%(平均几何相对误差小于 0.059%),PSO 算法功率吻合度为 94.060%(平均几何相对误差小于 0.037%);BPA 模型的开度吻合度为 75.607%(平均几何相对误差小于 0.058%),功率吻合度为 76.111%(平均几何相对误差小于 0.370%)。这表明,自定义模型比 BPA 模型更加符合实际。

4 结语

BPA4.0 程序中由机械液压式调速器模型和理想水轮机模型构成的调速系统模型过于简单且脱离实际,电网稳定分析结果的可信度低,可以通过自定义的模型加以改善。

由 PID 型调节器加二阶随动系统构成的调速器模型,贴近实际水轮机组调速器的结构,加之非线性环节考虑周全,可准确反映真实调速器的动作情况,仿真结果吻合度高,平均几何相对误差小。

从仿真结果来看,非线性传递函数代表的原动机模型仿真精度比理想水轮机模型好,而且根据实测数据辨识得到了原动机模型。试验方法简单,辨识方法选择多样,效率高,费用低,是研究建立电网稳定性分析用水轮机原动机及其调速系统模型的一种有效方法。

附录见本刊网络版(<http://aepe.sgepri.sgcc.com.cn/aepe/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 邓磊,周喜军,张文辉.用于稳定计算的水轮机调速系统原动机模型[J].电力系统自动化,2009,33(5):103-107.
DENG Lei, ZHOU Xijun, ZHANG Wenhui. Hydro turbine prime mover model of governor system for power system stability computation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(5):103-107.
- [2] KUNDUR P. 电力系统稳定与控制[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [3] 桂小阳,胡伟,刘锋,等.基于水轮发电机组综合非线性模型的调速器控制[J].电力系统自动化,2005,29(15):18-21.
GUI Xiaoyang, HU Wei, LIU Feng, et al. Governor control design on nonlinear hydraulic turbine model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15):18-21.
- [4] 许立雄,吕林,刘俊勇.基于改进粒子群优化算法的配电网重构[J].电力系统自动化,2006,30(7):27-30.
XU Lixiong, LÜ Lin, LIU Junyong. Modified partial swarm optimization for reconfiguration of distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 27-30.
- [5] 高林,夏俊荣,戴义平,等.基于遗传算法的联合循环机组建模和参数辨识[J].电力系统自动化,2010,34(4):34-37.
GAO Lin, XIA Junrong, DAI Yiping, et al. Modeling and identification of combined cycle units based on the genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 34-37.
- [6] 刘昌玉,梁学磊.水轮机调节系统被控对象模型辨识[J].水电能源科学,2007,25(2):77-79.
LIU Changyu, LIANG Xuelei. Model identification of controlled subject for hydro turbine governing system[J]. Water Resources and Power, 2007, 25(2): 77-79.
- [7] 舒辉,文劲宇,罗春风,等.含有非线性环节的发电机励磁系统参数辨识[J].电力系统自动化,2005,29(6):66-70.
SHU Hui, WEN Jinyu, LUO Chunfeng, et al. Nonlinear parameters identification for synchronous generator excitation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(6): 66-70.

黄青松(1963—),男,通信作者,高级工程师,主要研究方向:自动化、水轮机控制与调节。E-mail: gddwgsdkyhqs@163.com

徐广文(1980—),男,硕士,工程师,主要研究方向:水轮机调节系统测试与建模。E-mail: hhuxgw@139.com

Custom Modeling and Application of Hydro-turbine Regulating System

HUANG Qingsong, XU Guangwen

(Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

Abstract: In order to further improve the stability analysis of a power system, a model for the turbine governing system is developed with the realistic governor model and the prime mover model is expressed as a higher order nonlinear transfer function. Three kinds of prime mover model identifying methods are built, namely, the improved least squares (LS) algorithm, genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO) algorithm. Compared with the measured dynamic process, the simulation results of the custom model is more realistic than the model provided by BPA4.0 and capable of meeting the demand for power system stability analysis.

Key words: power system stability; hydro-turbine; regulating system; custom model

附录 A

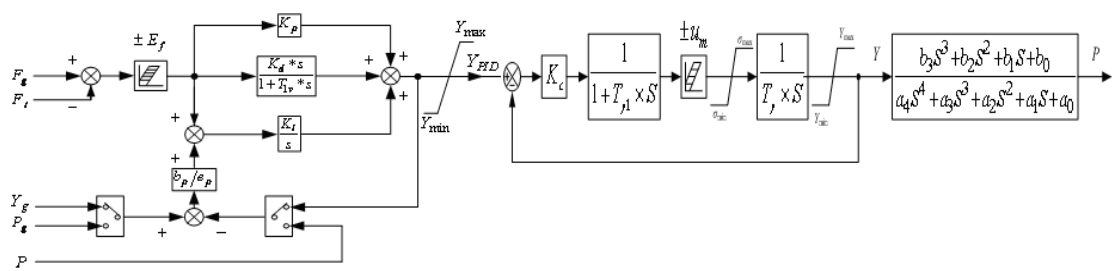


图 A1 自定义调速系统模型框图

Fig.A1 Custom model diagram of hydro-turbine regulating system

附录 B

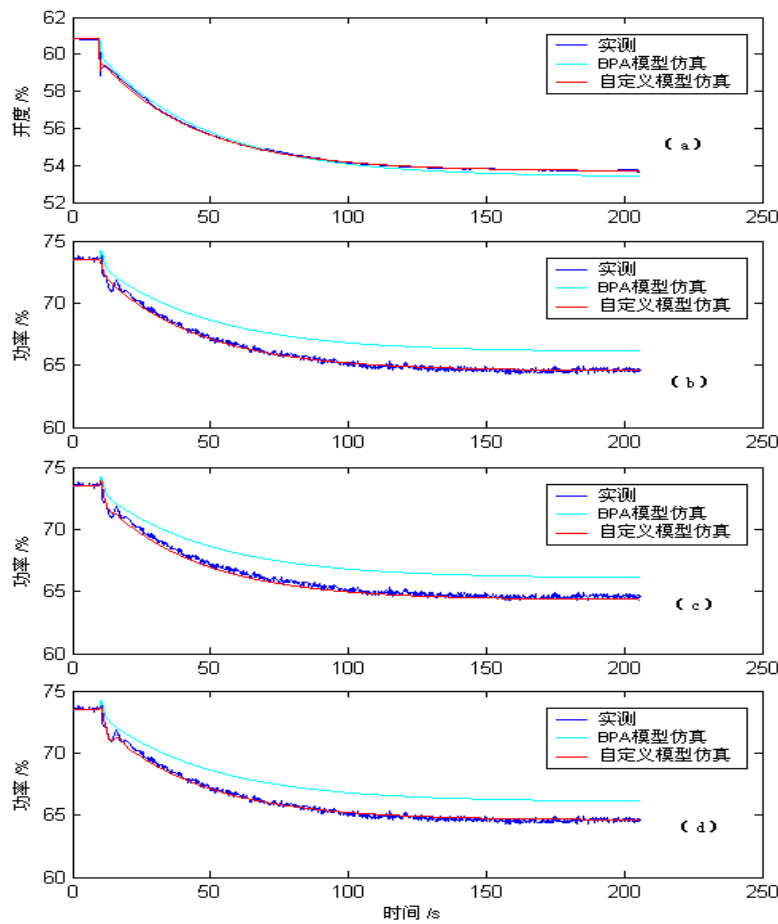


图 B1 不同模型仿真与实测动态过程比较

Fig.B1 Simulation of different models compared with the measured dynamic process