

文章编号:1671-6833(2006)03-0104-03

## 利用功率扰动辨识水电站水力系统模型

刘宪林, 杜晓勇

(郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 结合某抽水蓄能电站机组现场试验, 利用功率扰动下实测数据进行具有复杂输水系统的大型机组水力系统模型辨识. 该辨识方法输入信号通过调整调速器给定功率获取, 并不影响机组的正常试验和运行. 使用增广最小二乘法进行辨识计算, 利用先验知识检验、阶跃响应检验和残差白噪声检验三种方法对辨识结果进行验证. 结果表明, 所得辨识模型可信, 利用功率扰动辨识水电站水力系统模型的方法可行.

**关键词:** 水电站; 水力系统; 模型辨识; 模型检验

**中图分类号:** TM 743

**文献标识码:** A

### 0 引言

水电站水力系统(水轮机-输水系统)为水电机组提供原动力, 是水电站核心设备, 其动态数学模型是设计控制规律的基本依据, 并对电力系统稳定计算有重要影响. 传统的刚性水击理想水轮机模型及简单管道弹性水击-水轮机模型已难以满足电力系统稳定分析与控制的需要<sup>[1,2]</sup>. 由于水轮机特性复杂, 随工况而异, 且输水系统存在水击现象, 采用分析法建模较困难. 近年来, 试验建模法<sup>[3-5]</sup>越来越得到重视. 系统辨识理论为水力系统试验建模提供了理论支撑, 计算机的发展为试验建模提供了技术基础. 以阶跃信号和伪随机信号(PRBS)作为激励信号的试验方法曾在现场得到应用. 阶跃响应法对水轮机正常运行影响较大, 且不适合存在噪声的环境, 由于电厂是强磁场、强噪声环境, 因而该法辨识精度较差<sup>[4]</sup>; PRBS信号是辨识理论推荐的激励信号, 但其前期准备工作量和信号参数匹配困难较大, 对大容量机组, 若匹配不当, 可能对机组运行安全造成影响<sup>[5]</sup>, 该方法用于大容量机组的文献尚未发现. 笔者利用调整调速器有功给定产生的功率扰动作为激励信号, 用对噪声具有较强抑制作用的增广最小二乘法辨识模型参数, 该方法试验简便, 对机组正常运行影响较小. 在某抽水蓄能电站现场试验中应用此方法进行模型辨识, 对结果模型的检验表明此方法可获得满意的结果.

### 1 水力系统模型辨识及算法

水电站水轮机组示意图如图1所示, 在并网发电运行状态下, 电网频率基本稳定. 水轮机-输水系统为一个单输入单输出(SISO)系统<sup>[4]</sup>, 输入为水轮机导叶开度; 输出为水轮机输出转矩. 水力系统模型辨识的目的就是从水力系统的输入输出数据中提取出水力系统模型.

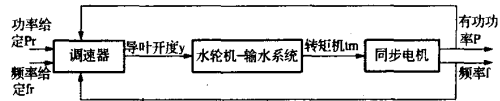


图1 水电站水轮机组示意图

Fig.1 The hydraulic generating set in Hydroelectric station

对于水力系统模型辨识, 可由先验知识初步确定水力系统的动态模型结构和阶次. 由于水电厂的存在有色噪声, 水力系统可用 ARMAX 模型<sup>[6]</sup>来描述:

$$A(z^{-1})m(k) = B(z^{-1})y(k) + C(z^{-1})v(k)$$

式中:  $y(k)$  为系统输入信号, 即导叶开度(标么值);  $m(k)$  为系统输出, 即水轮机输出转矩(标么值);  $v(k)$  则为均值为零的不相关随机噪声; 而

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \cdots + a_{n_a} z^{-n_a};$$

$$B(z^{-1}) = b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \cdots + b_{n_b} z^{-n_b};$$

$$C(z^{-1}) = 1 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \cdots + c_{n_c} z^{-n_c}.$$

收稿日期:2006-04-10; 修订日期:2006-05-13

作者简介:刘宪林(1955-), 男, 河南洛阳人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事电力系统分析与控制方面的教学和研究工作.

其中,  $n_a$  为系统输出信号阶次;  $n_b$  为系统输入信号阶次;  $n_c$  为噪声信号阶次。

水力系统在小波动条件下可认为在工况点附近为一个线性系统, 阶次为 1-2 阶<sup>[4]</sup>。确定模型结构和阶次后即可选用适当的算法进行辨识计算。这里使用对有色噪声有较强抑制作用的增广最小二乘法。选用 2 阶模型, 即取  $n_a = n_b = n_c = 2$ 。增广最小二乘递推算式如下<sup>[6]</sup>:

$$\hat{\theta}_N = \hat{\theta}_{N-1} + K_N [(m(N) - h_N^T \hat{\theta}_{N-1})]$$

$$K_N = P_{N-1} h_N [h_N^T P_{N-1} h_N + 1]^{-1};$$

$$P_N = [I - K_N h_N^T] P_{N-1}.$$

其中:  $N$  为递推次数;  $I$  为单位矩阵; 而

$$\theta = [a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_1, c_2]^T;$$

$$h_N = [-m(N-1), -m(N-2), y(N);$$

$$y(N-1), y(N-2), v(N-1), v(N-2)]^T.$$

辨识计算后, 对所得辨识模型, 可综合采用先验知识检验、交叉检验、残差白噪声检验等方法对其进行检验<sup>[4,6]</sup>。

## 2 现场测试方案

为测得功率扰动下水力系统的输入输出数据, 首先要产生功率扰动信号, 对于并网机组在稳定状态下, 产生扰动信号只需改变调速系统给定功率, 一般可使给定功率产生一个阶跃, 机组负荷上升, 经过波动结束后最终进入稳态, 测试仪记录动态过程中水轮机导叶开度和输出转矩的变化数据, 以此进行水轮机模型辨识。

测量中, 可通过测量接力器行程来代替水轮机导叶开度; 测量发电机的电磁转矩来代替难以测量的水轮机输出转矩, 电磁转矩可由同步发电机机端电磁功率除以转子机械角速度获得, 并网条件下可认为转子角速度标么值为 1, 发电机的电磁转矩等于机端电磁功率。

此外, 水电厂是强磁场、强电场环境, 现场测量中应考虑抗干扰措施, 一般应采用电流信号作为测量信号。测量后的原始数据中一般含有直流或低频成份, 为消除对辨识精度的影响, 辨识计算之前必须对测试数据进行零均值化处理<sup>[4,6]</sup>。

## 3 应用实例

某抽水蓄能电站安装 4 台 200 MW 混流可逆水轮发电机组。输水系统结构复杂, 4 台机组按 1 #、2 # 和 3 #、4 # 机组分为两组, 每组两台机组共用一个上游引水管道和下游尾水管道, 上下游均设有调压井。2005 年 5 月, 结合该电站 3 #、4 # 机组大修试验, 按照国家电网调度中心的安排, 有关单位联合对机组进行了试验。

万方数据

机组试验和数据采集过程为: 机组升速并网; 逐次改变调速系统给定功率使机组经负荷阶跃过程进入稳态。测试仪记录整个功率扰动过程接力器行程和发电机有功电磁功率数据, 采样间隔为 0.05 s。

现以求负荷为 140 MW 下的水轮机模型为例介绍辨识过程, 机组给定功率从 120 MW 到 140 MW 阶跃扰动下, 接力器行程和水轮机输出转矩的测量之值如图 2 所示。为了求出负荷为 140 MW 工况下的水力系统模型, 可用选择图中虚线以右部分进行辨识计算。

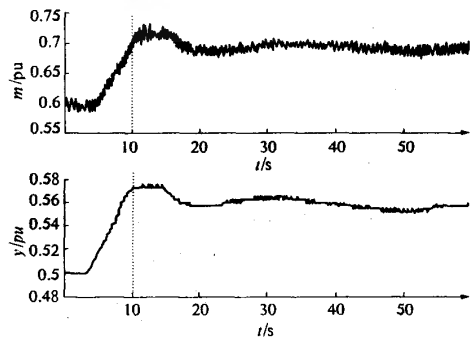


图2 机组给定功率阶跃扰动(120MW~140MW)下测量数据  
Fig.2 Curves of field test data under the step disturbance of given power(120MW~140MW)

测量数据经过零均值预处理后, 采用增广最小二乘算法辨识所得水力系统脉冲传递函数为

$$\frac{m(z)}{y(z)} = \frac{0.046183(z+2.448)(z-0.1328)}{(z+0.9984)(z-0.9613)}.$$

使用双线性变换可将上式转换为连续传递函数

$$\frac{m(s)}{y(s)} = \frac{-23.8874(s-95.26)(s+30.62)}{(s+49450)(s+0.7896)}.$$

使用以下三种方法检验辨识模型的正确性:

(1) 利用先验知识进行检验。辨识所得的脉冲传递函数有一个单位圆外的零点, 表明机组为非最小相位系统。这正是水击作用的体现, 与传统理论认识相符<sup>[4]</sup>。连续传递函数也表明了这一点。

(2) 利用测量数据交叉检验。辨识计算数据为 120 W 到 140 MW 给定功率阶跃扰动过程实测数据, 可使用 140 W 到 160 MW 给定功率阶跃扰动过程实测数据来检验辨识模型的正确性。以接力器行程实测信号为输入, 用上述辨识模型求取水轮机转矩仿真曲线, 将其与实测曲线进行比较, 如图 3 所示。

由图 3 可见, 除实测曲线的高频抖动部分在仿真曲线中反映不出来外, 仿真结果与实测结果在动态过程的各个阶段均相当一致, 这表明辨识模型质量较高。

(3) 检验模型的残差白色性<sup>[6]</sup>. 为了判定模型残差的白色性, 可计算出模型残差序列  $\{\varepsilon(k)\}$  的自相关函数  $R_\varepsilon(\tau)$ , 若  $\tau \neq 0$  时,  $R_\varepsilon(\tau)$  在一个接近于 0 的区间(置信度为  $\alpha$ )内波动, 则可认为  $\{\varepsilon(k)\}$  为白噪声, 辨识结果可靠.  $\alpha$  常取 95% 或 99%.

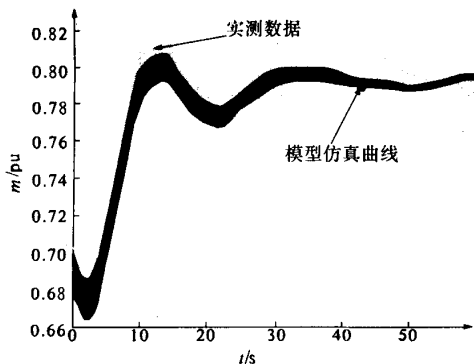


图3 机组给定功率阶跃扰动仿真曲线与实测曲线 (140MW ~ 160MW)

Fig.3 Curves of simulation and field test under the step disturbance of given power(140MW ~ 160MW)

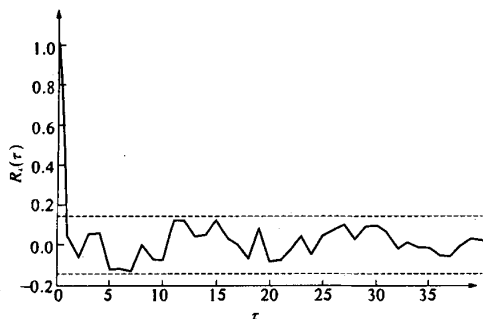


图4 140 MW 负荷水平辨识模型的残差相关系数

Fig.4 Residuals' correlation coefficient of the model identified under 140 MW load.

计算负荷为 140 MW 辨识所得模型的曲线  $R_\varepsilon(\tau)$  如图 4 所示. 图中两虚线之间为  $\alpha = 95\%$  的置信区间, 可见模型残差可视为置信度为 95% 的白噪声, 表明辨识所得模型是可靠的.

由以上 3 种检验结果可知, 所得辨识模型可信.

#### 4 结论

提出了使用功率扰动来辨识水电站大容量机组水力系统模型的方法. 利用某抽水蓄能电站现场测试数据和增广最小二乘算法实现了具有复杂输水系统的大型机组水力系统模型辨识, 检验表明所得辨识模型可信. 使用功率扰动来辨识水电站水力系统模型的方法简便可行.

#### 参考文献:

- [1] 李艳军, 刘宪林. 计及水力系统详细模型的多机系统暂态稳定计算[J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25(4): 90 ~ 93.
- [2] 高慧敏, 徐政, 刘宪林. 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.
- [3] TRUDNOWSKI D J, AQEE J C. Identifying a hydraulic - turbine model from measured field data[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1995, 10(4): 768 ~ 773.
- [4] 徐枋同, 李永华. 系统辨识理论与实践 - 在水电控制工程中的应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [5] 张承慧, 刘玉庆. 水轮机建模与参数识别[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(5): 53 ~ 56.
- [6] 方崇智, 萧德云. 过程辨识[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.

### Identifying the Hydraulic System Models in Hydroelectric Station Using Power Disturbance

LIU Xian - lin, DU Xiao - yong

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Hydraulic system models identification and validation in hydroelectric station have been researched. With reference to experiments in a pumped storage power station, the models of hydraulic system in large hydraulic generating set with complicated conduit system had been identified by using field test data under power disturbance. The input signal of the identification method could be gotten by justifying the governor's given electric power and had no influence on hydraulic generating set's normal operation and experiment. Models were identified by extended least squares algorithm and validated by prior knowledge validation, step disturbance validation and self relation function validation. The results show that the identified model is reliable and the method of identifying the hydraulic system models using power disturbance is feasible.

**Key words:** hydroelectric station; hydraulic system; model identification; model validation