

基于 Matlab 模块化模型的水轮发电机组仿真研究

曹程杰^{1,2}, 莫岳平², 刘洁³

(1.扬州大学, 江苏 扬州 225000; 2.南京南瑞自动控制有限公司, 江苏 南京 210003;
3.江都水利工程管理处, 江苏 扬州 225200)

摘要: 采用 Matlab 建立水轮发电机系统各子系统的多种精度模块化模型, 在此基础上分别构建水电机组非线性模型、线性化模型和经典理想模型。通过与现场运行数据相比较, 研究了不同模型的适用范围, 验证了仿真模型和算法的正确性, 体现了模块化建模在水电站仿真计算中的优势。

关键词: 水轮机调节系统; 数学模型; 仿真

Research of hydrogenerating units based on modularized model of Matlab

CAO Cheng-jie^{1, 2}, MO Yue-ping², LIU Jie³

(1. Yangzhou University, Yangzhou 225000, China; 2. NARI Automatic Control Co., Ltd., Nanjing 210003, China;
3. Jiangdu Water Conservancy, Yangzhou 225200, China)

Abstract: The multiple-precision mathematic models of the subsystem of hydrogenerating units is established, and then the nonlinear model, linear model and classical-ideal model of hydrogenerating units are built respectively. Through a comparison between simulation results and field data, this paper studies the different application scopes of the models and verifies the validity of the simulation model, which shows the superiority of modularized modeling in the simulation for hydropower stations.

Key words: hydraulic turbine governing system; mathematical model; simulation

中图分类号: TP273.2; TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)02-0068-04

0 引言

水电厂是电网频率调节的主要电厂, 随着电力系统中大中型水电机组的广泛应用, 其整体动态模型研究日益受到人们的重视, 建立符合实际的水轮发电机组模型, 对于理论分析计算、试验研究、调节保证计算等都具有重要意义。水轮机仿真模型既要保证仿真结果的准确性, 又要兼顾计算时间及工作效率, 针对不同的仿真要求需要选择不同的模型。同时, 水电机组控制系统是一个复杂的非线性系统, 模型和算法选取的正确与否应在实践中加以检验, 正确、合理的仿真试验对实践才具有指导意义。

水轮发电机系统由水轮机、引水系统、调速系统、发电机及负荷等子系统组成, 本文采用 Matlab 软件作为仿真平台, 建立了各子系统的多种精度模块化模型, 以在仿真计算中根据水电站的具体特征

以及不同的仿真工况和仿真目的进行选择。

1 水轮机调节系统的数学模型

1.1 引水系统模型

1.1.1 刚性水击模型

一般在小扰动情况下, 对简单直管路且管道长度小于 600~800 m 时, 管壁及水体的弹性以及流动的摩擦阻力均可以忽略, 此时可以认为是刚性水击, 其传递函数为:

$$h(s) = -T_w s q(s) \quad (1)$$

式中: h 为管道中水头的变化量; q 为管道中瞬时水流量的变化量; 轮机额 T_w 为管道水流惯性时间常数; $T_w = LQ_r / gFH_r$; L 为管道长度; F 为管路截面积; Q_r 为水轮机额定流量; H_r 为水定水头; g 为重力加速度。

1.1.2 弹性水击模型

当引水管路较长时, 管道及水体的弹性均不能忽略, 此时弹性水击理论能更精确地描述管道动态

过程, 在不考虑水力摩阻的情况下, 由水力学原理中的动力方程和连续方程可以导出弹性水击方程:

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -h_w \frac{T_r s}{1 + \frac{1}{8} T_r^2 s^2}$$

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -h_w \frac{T_r s + \frac{1}{24} T_r^3 s^3}{1 + \frac{1}{8} T_r^2 s^2} \quad (2)$$

$$\frac{h(s)}{q(s)} = -h_w \frac{T_r s + \frac{1}{24} T_r^3 s^3}{1 + \frac{1}{8} T_r^2 s^2 + \frac{1}{384} T_r^4 s^4}$$

式中: T_r 为水锤压力波反射时间, 即水锤相长; $T_r = 2L/c$, c 为压力水波速, 对于钢管 $c=1\ 220$ m/s, 对于混凝土管道 $c=1\ 420$ m/s; h_w 为管道特征系数, $h_w = T_w/T_r$ 。上述 3 式均为弹性压力引水管道传递函数的表达式, 可根据工程需要采用。项数取得越多, 计算精度就越高, 但计算的复杂性也增加了, 甚至可能造成数值不稳定。

1.2 水轮机模型

1.2.1 非线性水轮机模型

水轮机是一个复杂的非线性系统, 流量和力矩是水轮机的两个重要参数, 目前为止水轮机流量和力矩与其他参数之间的关系尚不能用解析法表示, 因此, 较通用的方法仍是以水轮机模型特性曲线为基础, 采用数表或曲线的形式将水轮机流量和力矩表达为导叶开度、转速、水头的函数:

$$M = M(a, H, n) \quad (3)$$

$$Q = Q(a, H, n)$$

式中: M 为力矩; Q 为流量; a 为导叶开度; H 为水头; n 为转速。

原型水轮机主要参数与模型机单位参数之间关系如下:

$$M_i = 9.81 \frac{Q_i'}{n_i} D_i^2 H_i \eta_i$$

$$Q = Q_i' D_i^2 \sqrt{H}$$

$$n = \frac{n_i' \sqrt{H}}{D_i} \quad (4)$$

式中: n_i' 、 Q_i' 分别为模型水轮机单位转速、单位流量; n 、 Q 、 H 、 D_i 为原型水轮机转速、流量、水头及转轮直径。

1.2.2 线性水轮机模型

当水轮机各参数在小范围内变动时, 水轮机特性可以用线性的水轮机力矩方程和流量方程来表示, 其中具有单一调节机构的水轮机线性模型可表示为:

$$m_t = e_x x + e_y y + e_h h \quad (5)$$

$$q = e_{qx} x + e_{qy} y + e_{qh} h$$

式中: q 、 m_t 、 y 、 x 、 h 分别为流量、力矩、接力器行程、转速、水头的相对偏差; e_{qy} 、 e_{qx} 、 e_{qh} 分别为流量对导叶开度、转速、水头的传递系数; e_y 、 e_x 、 e_h 分别为力矩对导叶开度、转速、水头的传递系数。

水轮机传递系数可利用水轮机模型综合特性曲线进行计算, 如图 1 所示。首先在图上确定稳态工作点 O , 然后在其周围取 1、2、3、4 点。其中 1、2 点在等单位流量线上, 而 3、4 点在等开度线上。于是可以读出各点的 Q_{11i} 、 n_{11i} 、 η_i 、 a_i 等参数, 同时可计算出各点的力矩 M_i 、水头 H_i ($i=1, 2, 3, 4$)。传递系数可按式 (6) 计算。

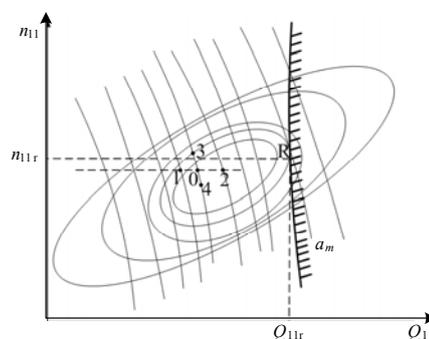


图 1 由综合特性曲线计算传递系数

Fig.1 Calculating transfer coefficient according to synthetic characteristic curve

$$e_y = \frac{\partial m_t}{\partial y} \approx \frac{\Delta m_t}{\Delta y} = \frac{(M_2 - M_1) / M_r}{(a_2 - a_1) / a_M}$$

$$e_x = \frac{\partial m_t}{\partial x} \approx \frac{\Delta m_t}{\Delta x} = \frac{(M_4 - M_3) / M_r}{(n_4 - n_3) / n_r}$$

$$e_h = \frac{\partial m_t}{\partial h} \approx \frac{\Delta m_t}{\Delta h} = \frac{(M_4 - M_3) / M_r}{(n_4 - n_3) / n_r}$$

$$e_{qy} = \frac{\partial q}{\partial y} \approx \frac{\Delta q}{\Delta y} = \frac{(Q_2 - Q_1) / Q_r}{(a_2 - a_1) / a_M}$$

$$e_{qx} = \frac{\partial q}{\partial x} \approx \frac{\Delta q}{\Delta x} = \frac{(Q_4 - Q_3) / Q_r}{(n_4 - n_3) / n_r}$$

$$e_{qh} = \frac{\partial q}{\partial h} \approx \frac{\Delta q}{\Delta h} = \frac{(Q_4 - Q_3) / Q_r}{(H_4 - H_3) / H_r} \quad (6)$$

式中:

$$M_i = 93740 \frac{Q_{11r} \eta_i}{n_{11r}} D_1^3 H_0 (\text{N}\cdot\text{m}) \quad i=1, 2, 3, 4$$

$$M_r = 93740 \frac{Q_{11r} \eta_r}{n_{11r}} D_1^3 H_r (\text{N}\cdot\text{m})$$

$$Q_i = Q_{11r} D_1^2 \sqrt{H_0} (\text{m}^3/\text{s}) \quad i=1, 2, 3, 4$$

$$\begin{aligned}
 Q_r &= Q_{1r} D_1^2 \sqrt{H_r} \text{ (m}^3/\text{s)} \\
 n_i &= n_{1i} \sqrt{H_0} / D_1 \text{ (1/min)} \quad i=3,4 \\
 n_r &= n_{1r} \sqrt{H_r} / D_1 \text{ (1/min)} \\
 H_i &= \left(\frac{n_0 D_1}{n_{1i}} \right)^2 \quad i=3,4 \quad (7)
 \end{aligned}$$

1.2.3 经典水轮机模型

如果假定水轮机理想无损，即效率为常数，在额定工况点下运行，并忽略水轮机转速的影响，则可以得到理想水轮机传递函数：

$$G(s) = \frac{1 - T_w s}{1 + 0.5 T_w s} \quad (8)$$

1.3 调速系统模型

1.3.1 PID 调节模块

国内数字式电液调节器都采用并联 PID 结构，其传递函数为：

$$G_{PID}(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{1 + T_d s} \quad (9)$$

式中： K_p 、 K_I 、 K_D 为比例、积分、微分增益； T_d 为暂态反馈时间常数。

1.3.2 液压随动模块

调速器输出的控制信号经过液压转换器变成液压信号，再经过引导阀、主配压阀逐级放大，最后推动主接力器动作，带动水轮机导叶开启或关闭。这部分通常是一个随动系统，其传递函数为：

$$Y(s) = \frac{1}{1 + T_y s} \quad (10)$$

式中： T_y 为接力器时间常数。

如对仿真精度有较高要求时，则根据不同的仿真工况，还应考虑液压随动系统死区、接力器输出限幅、齿隙特性等非线性因素。

1.4 发电机及负荷模型

1.4.1 一阶简化模型

单机孤网运行时，仅考虑转速变化的情况下，可采用一阶简化发电机及负荷模型，传递函数为：

$$G_L(s) = \frac{1}{T_a s + e_n} \quad (11)$$

式中： T_a 为机组和负载惯性时间常数； e_n 为水轮发电机组综合自调节系数。

1.4.2 E'_q 恒定二阶模型

当仿真计算需要考虑发电机输出功率 P_e 时，可采用暂态电势 E'_q 恒定的二阶经典模型，该模型对象为单机无穷大容量系统，且假设机组暂态电势 E'_q 在扰动期间保持恒定，不计及阻尼绕组的作用：

$$\begin{cases} \delta = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega} = \frac{\omega_0}{H} P_m + \frac{\omega_0}{H} P_{m0} - \frac{D}{H} (\omega - \omega_0) - \frac{\omega_0}{H} P_e \end{cases} \quad (12)$$

$$P_e = \frac{E'_q V_s}{x_{d\Sigma}} \sin \delta - \frac{V_s^2}{2} \left(\frac{x'_d - x_q}{x_{d\Sigma} x_{q\Sigma}} \right) \sin 2\delta$$

$$x_{d\Sigma} = x'_d + x_t + x_l$$

$$x_{q\Sigma} = x_q + x_t + x_l$$

式中： δ 为功角； ω 、 ω_0 分别为发电机角速度和同步角速度； P_m 为输入机械功率； P_{m0} 为机械功率初始稳态值； P_e 为发电机输出电磁功率； H 为机械转动惯量； D 为阻尼系数； V_s 为发电机机端电压； x'_d 、 x_q 、 x_t 、 x_l 分别为发电机 d 轴暂态电抗、q 轴同步电抗、变压器短路电抗、输电线路电抗； $x_{d\Sigma}$ 为系统 d 轴总暂态电抗， $x_{q\Sigma}$ 为系统 q 轴总电抗； E'_q 为发电机 q 轴暂态电势。

2 水轮发电机组模型仿真

采用 Matlab 软件建立的线性化水轮发电机组模型如图 2 所示。其中引水系统模块、水轮机模块、液压传动模块、发电机及负荷模块均有不同精度的多种模型可供选择，K1、K2、K3 为调节模式转换开关，这些开关的不同位置组合，可以构成水轮机调节系统不同的调节模式。

图 2 中 E_y / E_p 分别为人工开度/功率死区系数， b_p / e_p 分别为导叶接力器/机组功率永态差值系数。

根据某水电站资料，对同一调节系统建立三种不同的水轮机模型，分别为：刚性水击、理想水轮机、一阶发电机的低精度模型；弹性水击、线性水轮机、一阶发电机的普通模型；高阶弹性水击、非线性水轮机、二阶发电机高精度模型。对以上三种模型进行频率增加 2% 仿真试验，结果如图 3 所示。系统参数如下： $T_y=0.3$ ， $T_r=0.2$ ， $h_w=5$ ， $T_d=2.5$ ， $b_p=0$ ， $E_y=0$ ， $E'_q=1.2$ ， $\delta_0=43^\circ$ ， $V_s=1.0$ ， $D=5$ ， $H=10$ s， $x_l=1.4$ ， $x'_d=0.211$ ， $x_q=0.535$ ， $P_{m0}=0.8$ ， $x_t=0.125$ ， $\omega_0=314$ rad/s。 δ_0 、 H 、 ω_0 均为实际值，其余各量均为标么值。

由仿真结果可知低精度水轮机调节模型结构简单，概念清晰，仿真计算速度快，但同时误差较大，只能用于对结果要求不高的定性计算中，如判断系统是否稳定。高精度模型仿真结果与实际运行数据相仿，可以为运行决策提供有力支持，但仿真速度较慢，且前期需要对大量的数据进行处理。普通模型的性能则介于两者之间。

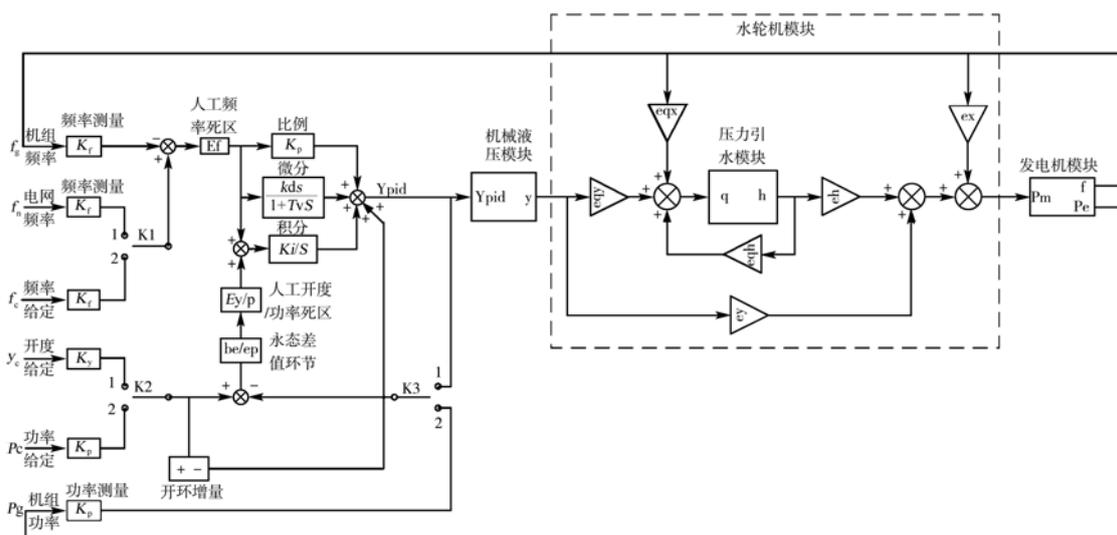


图 2 水轮机调节系统模型框图

Fig.2 The model of hydro-turbine governing system

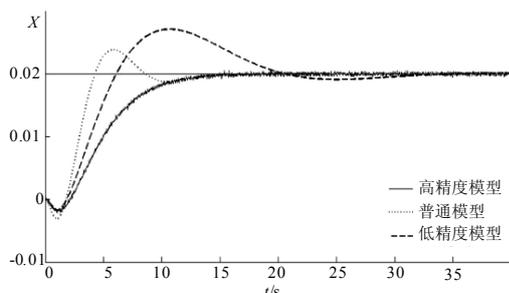


图 3 不同精度模型频率扰动仿真比较

Fig.3 Waveform comparison of frequency disturbance

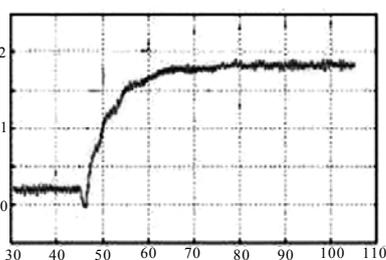


图 4 水电站频率扰动现场录波

Fig.4 Copy wave on site of frequency disturbance

3 结论

本文采用 Matlab 软件建立了水电机组控制系统中各子系统的多精度模块化模型, 形成子系统模块库, 针对不同仿真目的采用不同模型搭建系统, 充分发挥了 Matlab 软件的开放性和可移植性, 综合考虑了仿真精度、计算效率等多方面因素, 模型组建高效、快捷, 对水电站的设计和控制具有重要意义。

参考文献

[1] 于波, 肖慧民. 水轮机原理与运行[M]. 北京: 中国电

力出版社, 2008.

[2] 刘翔, 李东海, 姜学智, 等. 水轮发电机组的非线性控制器仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 91-96.

LIU Xiang, LI Dong-hai, JIANG Xue-zhi, et al. Simulation Study on Nonlinear Controller for Hydro Turbine Generator Sets[J]. Proceedings of Chinese Society for Electrical Engineering, 2002, 22(1): 91-96.

[3] 桂小阳, 胡伟, 刘锋. 基于水轮发电机综合非线性模型的调速器控制[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 18-22.

GUI Xiao-yang, HU Wei, LIU Feng. Governor Control Design Based on Nonlinear Hydraulic Turbine Model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 18-22.

[4] 谭群峰, 李朝晖. 基于工况的水轮机调速系统性能分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 34-37.

TAN Qun-feng, LI Zhao-hui. Performance Analysis for Hydroturbine Governing System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 34-37.

[5] 孙郁松, 孙元章, 卢强. 水轮发电机水门非线性控制规律的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(23): 33-36.

SUN Yu-song, SUN Yuan-zhang, LU Qiang. Research on Nonlinear Control Strategy for Hydroturbine Governor[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(23): 33-36.

收稿日期: 2009-02-07; 修回日期: 2009-06-02

作者简介:

曹程杰 (1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为自动控制理论, 电力系统控制等; E-mail: bluesky-wflts@163.com

莫岳平 (1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事电机及其控制的教学及研究工作;

刘洁 (1984-), 女, 助理工程师, 主要研究方向为水工水利水运、继电保护。