

基于 PCC 的抽水蓄能机组仿真测试系统

何 峰, 沈祖诒

(河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 采用可编程计算机控制器 PCC(Programmable Computer Controller)作为硬件平台, 通过建立抽水蓄能机组的数学模型, 利用 C 语言编程, 研发了基于 PCC 的抽水蓄能机组仿真测试系统。该系统由 B&R2003 系统、PP120 系统、PC 机及其对应软件组成, 实现水轮机调节对象实时仿真、现场测试及数据分析处理。结合抽水蓄能机组微机调速器, 采用某电站真实参数, 进行了测试验证。结果表明, 该系统有效地提高了数据采集和传输的实时性和可靠性, 为抽水蓄能机组调节系统进行迅速、准确的调整提供了便捷的方法。

关键词: 抽水蓄能; 仿真; 可编程计算机控制器

中图分类号: TM 312

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)09-0030-04

抽水蓄能电站调速器调节品质的好坏, 直接影响机组的安全稳定运行。因此, 调速器必须在出厂前、投运前和大修后进行调试, 并对其控制参数进行适当整定^[1-2]。为了提高抽水蓄能机组调速器的研发和测试水平, 设计了一套可对抽水蓄能机组调节系统进行实时动态仿真且实用可行的测试设备。

1 仿真数学模型

抽水蓄能机组调节系统由调速器和调节对象组成, 调速器由调节器和电液随动系统 2 部分组成, 调节对象包括有压过水系统、可逆式水轮机、发电机和电网。

根据参考文献, 建立调节对象的单机单管可逆式机组水力-机械过渡过程数学模型。

1.1 有压过水管道数学模型^[3-4]

设已知有压管道 U 、 D 2 点上在 $t-\Delta t$ 时刻的压力 p_U 、 p_D 和流量 Q_U 、 Q_D , 如图 1 所示, 则在 t 时刻, p_1 点的压力 p_{p1} 和流量 Q_{p1} , p_2 点的压力 p_{p2} 和流量 Q_{p2} , 可通过特征线方程求解。

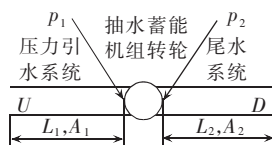


图 1 有压过水管道模型示意图
Fig.1 Model of head conduit

$$C^+: Q_{p1} = C_U - C_1 p_{p1} \quad (1)$$

$$C^-: Q_{p2} = C_D + C_2 p_{p2} \quad (2)$$

$$C_i = \frac{gn_i \Delta t}{\sum_{j=1}^{N_i} l_{ij} / S_{ij}} \quad i=1, 2; \quad j=1, 2, \dots, N_i \quad (3)$$

$$C_U = Q_U + C_1 p_U - C_1 f_1 Q_U |Q_U| \quad (4)$$

$$C_D = Q_D - C_2 p_D - C_2 f_2 Q_D |Q_D| \quad (5)$$

$$N_i \Delta t = L_i / v_i \quad (6)$$

式中 $i=1, 2$ 分别表示压力引水系统和尾水系统的

参数; N_i 为管道分段数; $\sum_{j=1}^{N_i} l_{ij} / S_{ij}$ 为管道各段长度与截面积之商的和; v_i 为波速; f_i 为压力管道阻力系数; g 为重力加速度; Δt 为计算步长。根据上述方程, 分别建立边界条件。

a. U 点为上游水库, 边界条件为

$$p_U = c_1 \quad (7)$$

b. p_1 、 p_2 点分别为可逆式水轮机机组进口断面和出口断面处, 边界条件为

$$Q_{p1} = Q_{p2} = Q_{11} \sqrt{p_{p1} - p_{p2}} D_1^2 \quad (8)$$

式中 Q_{11} 为可逆式水轮机单位流量; D_1 为可逆式水轮机直径。

c. D 点为下游水库, 边界条件为

$$p_D = c_2 \quad (9)$$

c_1 、 c_2 为常数。由此, 可求得 p_1 和 p_2 点(即可逆式水轮机机组进口断面和出口断面处)各时刻的状态。

1.2 可逆式水轮机模型^[3,5]

可逆式水轮机的特性十分复杂, 很难用一个数学表达式准确地描述。其特性通常用 5 个参数表示: 转矩 M_t 、流量 Q 、水头 H 、机组转速 n (或频率 f) 和导叶开度 a (或接力器行程 Y)。这 5 个参数的函数关系为

$$M_t = M_t(n, a, H), \quad Q = Q(n, a, H)$$

抽水蓄能机组控制系统受扰动后, 其工况点变化较大, 若用一组简单的传递系数描述可逆式水轮机特性, 其计算结果将会产生很大的误差。本系统利用可逆式水轮机 4 象限全特性曲线, 用 Suter-from 方法^[1]加以改进, 将其转换成 2 个数表, 即: 单位流量与单位转速、导叶开度关系系数表; 单位转矩与单位转速、导叶开度关系系数表。可以运用这 2 个数表描述可逆式水轮机的非线性特征。在计算中, 根据已知的机组转速、水头和开度, 通过查表和插值计算的迭代过程求得当前工况点的流量和力矩。

1.3 小开度工况机组特性方程的建立及处理

小开度工况下没有机组全特性曲线,引用前人研究结果^[6],化简整理得:

$$Q_t=c_3a_pQ_r\sqrt{H}$$
$$P=c_3^2c_4a_pHM_r\sqrt{d_2^2-a_p^2}\frac{\pi n_t}{30\times1000}$$

式中 a_p 、 d_2 分别为导叶相对开度、水泵水轮机导叶间距; c_3 、 c_4 为常数; Q_r 、 Q_t 分别为可逆式水轮机的额定流量和通过可逆式水轮机的瞬时流量; H 为可逆式水轮机转轮工作水头瞬时值(m); P 为可逆式机组功率; M_r 为机组的额定转矩; n_t 为可逆式水轮机的瞬时转速(r/min)。

接力器行程、电液随动系统、发电机及负荷等数学模型则容易获得^[7]。

2 仿真测试系统硬件配置和软件系统

2.1 硬件配置及其特点

2.1.1 硬件配置^①

抽水蓄能机组仿真测试系统是集水轮机调节对象实时仿真、现场测试及数据分析处理于一体的综合型测试系统。就硬件组成而言,系统可以划分为 3 个部分。

a. B & R 2003 系统:CPU 模块 7CP476.60-1,主频 26 MHz,750 KB SRAM,1.5 MB FlashPROM;模拟量输入(AI)模块 7AI354.70,4 路 AD 通道,输入范围 -10~+10 V;模拟量输出(AO)模块 7AO352.70,2 路 DA 通道,输出范围 -10~+10V(或者 0~20 mA);数字量输入(DI)模块 7DI135.70,4 路 DI 通道,用于频率测量;数字量输出(DO)模块 7DO135.70,4 路 DO 通道,用于频率输出;数字量输入输出混合(DM)模块 7DM435.70,8 路 DI 通道,8 路 DO 通道;附加了扩展模块 7AF101.7、AI 模块 7AI354.70 以及 AO 模块 7AO352.70 用于通信。

b. PP120 系统:彩色触摸屏 4PP120.0571-21,5.7 吋 QVGA,256 色,320×240 像素,处理器为 Geode SC 2200 266 MHz,内存 16 MB DRAM;存储卡 Compact Flash(CF) 32 MB。

c. PC 机:可采用一般的台式机或笔记本电脑,由于需要使用 CF 卡,所以需要配置一个 CF 卡适配器,将 CF 卡连接到 PC 机上。

整个系统构成(仿真工作状态)如图 2 所示。

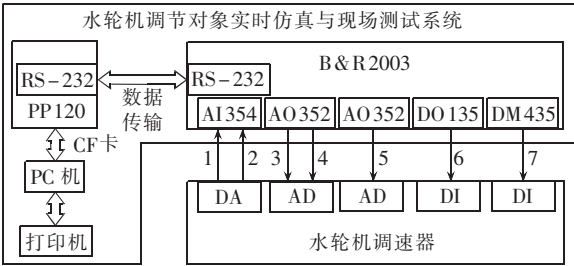


图 2 抽水蓄能机组仿真测试系统组成框图
Fig.2 Block diagram of simulation and test system for pumped storage unit

图中,1~7 分别表示导叶控制信号、桨叶控制信号、导叶开度信号、桨叶输出信号、输出功率信号、仿真发电机频率信号、断路器信号。

2.1.2 仿真硬件系统的特点

可编程计算机控制器 PCC(Programmable Computer Controller)经济、高效地集成了可编程逻辑控制器(PLC)、工控机(IPC)和大型计算机的特点,构成了一种性价比较高的工业仿真平台。

PCC 采用高级语言,分析运算能力强,在同一 CPU 中,能同时运行不同程序,且仅扫描部分程序,因而效率高^①。

PP120 系统采用触摸屏作为人机界面,操作方便。由于 PCC 的高度集成化和高可靠性,调试只需设定有关数字,而电位器等可调元件少,操作简单。

采用 PCC 作为仿真测试系统的硬件平台,大大提高了仿真测试的可靠性和开发速度。

2.2 软件组成

抽水蓄能机组仿真测试系统软件主要由后台 B & R 2003 软件、PP120 软件、PC 机软件 3 部分组成。

2.2.1 后台 B & R 软件

后台 B & R 2003 的软件采用 C 语言,在集成软件开发环境 B & R Automation Studio 下开发。主要负责可逆式机组调节对象(包括水轮发电机组、有压引水系统及液压随动系统)的仿真以及调速器静特性和动态测试。软件组成如图 3 所示。

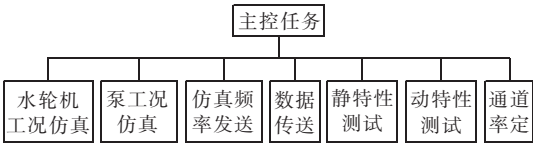


图 3 B & R 2003 系统软件组成

Fig.3 B & R 2003 system software composition

2.2.2 PP120 软件

在本系统中,PP120 处于前台,主要的作用是作为用户的操作界面、仿真曲线显示以及数据存储平台。PP120 上运行的软件也采用 C 语言在 B & R Automation Studio 开发。负责 PP120 与 B & R 2003 之间通信的任务在 PP120 上运行。通信任务通常由 2 部分构成:通信程序,负责建立 PP120 与 B & R 2003 间的通信;数据模块,指定两者之间需要通信的变量名。

2.2.3 PC 机软件

PC 机的主要作用是对仿真及测试数据进行分析,计算过渡过程的主要指标。该软件在 VC++ 6.0 下开发,具有友好的人机界面,能够极大地简化仿真数据的处理,提高水轮机调速器的开发、测试效率。

3 系统功能实现与特点

抽水蓄能机组仿真测试系统主要功能包括水轮机调节对象实时仿真、现场测试及数据分析处理 3 个部分。系统仿真测试框图如图 4 所示。

① 奥地利 B & R 公司. B & R System 2003 user's manual(4.0 version).

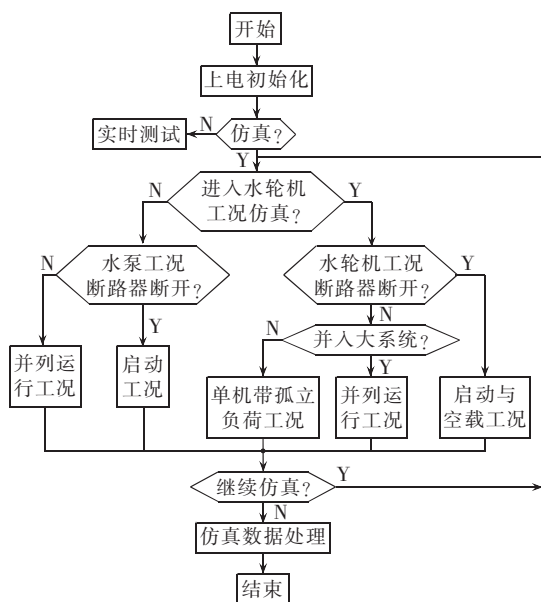


图 4 系统仿真测试框图

Fig.4 Flowchart of simulation and test

图 4 中,上电初始化程序主要是实现 2 个功能:将事先在 PP120 系统中输入并已形成数据文件的电站的基本参数,单位流量与单位转速、导叶开度关系数表以及单位转矩与单位转速、导叶开度关系数表传给下位机 B&R2003 系统存储;然后下位机根据这些数据计算出机组的初始稳态工况。整个仿真程序开始运行时总是假定处于初始稳态工况,即停机状况。

程序中采用水轮机工况的参数为正,即转速、流量、力矩、功率均为正值;水泵工况的转速、流量和功率均为负值,但力矩为正。由于仿真系统和本实验室研发的微机调速器无法区分频率的正负,故在仿真仪上设置界面,由用户根据需要设定进入水轮机或是水泵工况,仿真系统相应设定转速的正负,同时用开关量向调速器输出转速正负的信号。水轮机工况下的启动与空载工况和水泵工况下的启动工况调用的是同一个子程序,同样,水轮机工况下的并列运行工况和水泵工况下的并列运行工况也是如此。

仿真过程中机组的导叶相对开度、机组频率、机组进口断面水压和机组的功率随时间变化的情况,将在仿真仪界面上以曲线形式实时显示。并且系统在暂定状态时可以将界面上所显示曲线的的数据以数据文件的形式保存,供试验完成后利用 PC 机上的仿真及测试数据处理软件进行全面系统的分析。

4 仿真试验

电站参数如下:蜗壳高程 266 m;下游水位 256 m;上游水位 744 m;压力引水管长与管道面积之比 27.51/m;仿真步长 0.02 s;转轮标称直径 2.27 m;额定转速 428.6 r/min;发电机额定功率 306 MW;飞轮力矩 4 000 kN·m;主接力器时间常数 0.3 s;辅助接力器时间常数 0.01 s。

在抽水蓄能电站可逆机组的所有可能出现的过

渡过程中,水轮机工况甩负荷的过渡过程是最主要的。这类过渡过程在很大程度上决定了机组运行的可靠性和造价,是蓄能电站仿真系统所要仿真的重点对象^[8-9]。下面将以这一过程和水泵运行工况转水轮机工况为例,利用本实验室研制的抽水蓄能机组微机调速器,对该仿真测试系统进行测试验证。

图 5、6 即为本实验室在 PC 机上开发的仿真及测试数据处理软件分析所得仿真曲线图。图 5、图 6 中的(a)~(d)分别为导叶相对开度 a 、机组频率 f 、机组进口断面水头 H 和机组功率 P 随时间变化的曲线。图 5 中,0~33.70 s 为水轮机空载运行工况到并入大电网运行工况的过渡过程;33.70~62.92 s 为机组甩 100% 负荷过渡过程;62.92~80.40 s 为水轮机空载运行工况。图 6 中,0~22.97 s 为泵运行工况;22.97~60.15 s 为抽水转发电过渡过程;60.15~80.40 s 为水轮机空载运行工况。

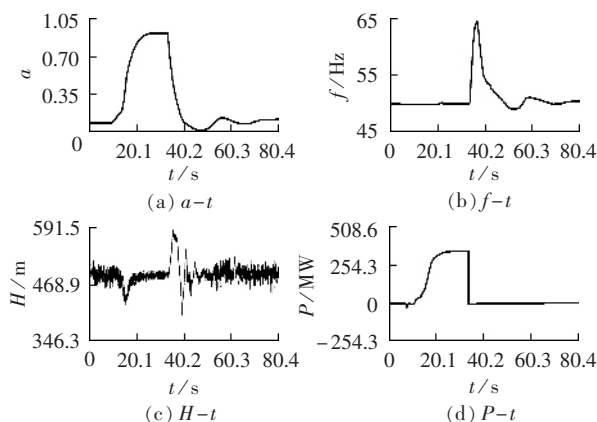


图 5 水轮机工况甩 100% 负荷曲线图

Fig.5 Waveforms of turbine 100% load shedding

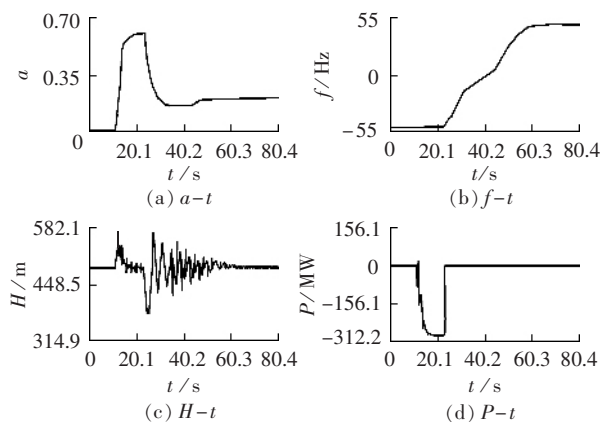


图 6 水泵工况转水轮机工况曲线图

Fig.6 Waveforms of transfer from pump operation to turbine operation

5 结语

基于 PCC 的抽水蓄能机组的仿真测试系统,可以对可逆式机组的静动态特性进行经济、方便、直观、迅速的测试。许多在现场无法进行或不宜多次重复进行的试验,都可以利用该系统对其仿真。实际电站的参数仿真试验证明其仿真效果良好。

但是,由于抽水蓄能机组的调节系统是一个复杂的、非线性的、非最小相位系统,而且在建立数学模型的过程中,不可避免地忽略了一些次要因素和对模型进行了简化,很难用仿真准确地反应水轮机调节系统的实际过程并得到定量的结论。现只能从定性的、比较的意义上对其进行仿真,为实际工作提供定性分析和决策支持,并且一定要采取理论与实际相结合的科学方法,在工程实际中加以验证。

参考文献:

- [1] 陆佑楣,潘家铮. 抽水蓄能电站[M]. 北京:水利电力出版社,1992.
- [2] 邓磊. 基于 PCC 的水力机组调速系统实时动态仿真仪研究[D]. 南京:河海大学,2004.
DENG Lei. Research on real-time dynamic simulator based on PCC for water turbine governing system[D]. Nanjing:Hohai University,2004.
- [3] 梅祖彦. 抽水蓄能发电技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [4] ALLAN R N,LI R,ELKATEB M M. Modelling of pumped-storage generation in sequential Monte Carlo production simulation[J]. IEE Proc Gener Transm Distrib,1998,145(5):611-615.
- [5] MANSOOR S P,JONES D I,BRADLEY D A, et al. Hardware-in-the-loop simulation of a pumped storage hydro station[J]. International Journal of Power and Energy Systems,2003,23(2):

127-132.

- [6] 王林锁,索丽生,曹小红. 抽水蓄能电站过渡过程调节控制计算模型研究[J]. 水电能源科学,2003,21(4):75-77.
WANG Lin-suo,SUO Li-sheng,CAO Xiao-hong. Study on model of regulating control for hydraulic transients at pumped storage plants[J]. Water Resources and Power,2003,21(4):75-77.
- [7] 沈祖诒. 水轮机调节[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
- [8] 刘竹青,常近时. 抽水蓄能电站水力装置系统动态过程仿真[J]. 中国农业大学学报,1999,4(6):69-73.
LIU Zhu-qing,CHANG Jin-shi. Study on dynamic processes simulation of hydraulic equipment system of pumped storage plant[J]. Journal of China Agricultural University,1999,4(6):69-73.
- [9] 康玲,叶鲁卿,李朝晖. 基于 Matlab 的抽水蓄能机组控制系统的仿真研究[J]. 大电机技术,1999(1):55-59.
KANG Ling,YE Lu-qing,LI Zhao-hui. Matlab-based simulations for control system of pumped storage unit[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,1999(1):55-59.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

何 峰(1980-),男,湖北随州人,硕士研究生,主要从事电站自动化与仿真技术的研究(E-mail:hoofer@hhu.edu.cn);
沈祖诒(1936-),男,浙江湖州人,教授,博士研究生导师,主要从事水力机械控制及其过渡过程、非线性控制、进化计算、电站自动化与仿真技术等方面的研究。

PCC-based simulation and test system of pumped storage unit

HE Feng,SHEN Zu-yi

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering,
Hohai University,Nanjing 210098,China)

Abstract: With PCC(Programmable Computer Controller) as the hardware platform and C language programming,a mathematical model of pumped storage unit is established and a simulation and test system for it is developed. The system consists of B&R2003 system,PP120 system,and PC with corresponding software,realizing the real-time simulation,field test and data analysis for test objectives of the hydraulic turbine. Combined with the microprocessor-based governor of pumped storage unit and applied practical parameters of a real power station,tests are carried out for verification. Results show that the system improves the real-time performance and reliability of data acquisition and transmission,providing a rapid and precise control of the governing system for pumped storage unit.

Key words: pumped storage; simulation; programmable computer controller