

a. 错油门环节:连续模型为 $\delta = \eta - \xi$, 离散化为 $\delta(k) = \eta(k) - \xi(k)$ 。

b. 飞摆环节:连续模型为 $\eta = \varphi / \delta$, 离散化为 $\eta(k) = K_8 \varphi(k)$ 。

c. 油动机环节:连续模型为 $H(s) = 1 / (\tau_s s)$, 离散化为 $\mu(k) = \mu(k-1) + K_4 \delta(k)$ 。

d. 硬反馈环节:连续模型为 $\xi = i\mu$, 离散化为 $\xi(k) = i\mu(k)$ 。软反馈环节:连续模型为 $H(s) = \tau_r s / [(1 + \tau_r s)r]$, 离散化为 $\xi(k) = K_2 \mu(k) - K_3 \mu(k-1) + K_1 \xi(k-1)$, 其中, r 为软反馈系数。水轮机有硬反馈和软反馈, $\xi(k) = i\mu(k) + K_2 \mu(k) - K_3 \mu(k-1) + K_1 \xi(k-1)$; 汽轮机只有硬反馈, 没有软反馈。

e. 汽惯性:连续模型为 $H(s) = 1 / (\tau_o s + 1)$, 离散化为 $P_m(k) = K_5 \mu(k) + K_6 P_m(k-1)$ 。

f. 水锤效应环节:连续模型为 $H(s) = 1 - \tau_w s / (1 + 0.5 \tau_w s)$, 离散化为 $P_m(k) = K_5 \mu(k) + K_6 P_m(k-1) + K_7 \mu(k-1)$ 。

以上各式中 $K_1 \sim K_8$ 为模型中的常系数:

$$K_1 = \tau_r / (t + \tau_r), K_2 = r \tau_r / (t + \tau_r)$$

$$K_3 = r \tau_r / (\tau_r + 1), K_4 = t / \tau_s$$

$$K_5(\text{汽}) = t / (t + \tau_o), K_6(\text{汽}) = \tau_o / (t + \tau_o)$$

$$K_5 = (t - \tau_w) / [2(0.5 \tau_w + t)]$$

$$K_6 = 0.5 \tau_w / [2(0.5 \tau_w + t)]$$

$$K_7 = \tau_w / [2(0.5 \tau_w + 2t)], K_8 = 1 / \delta$$

其中, t 为采样时间。

2 控制系统设计

本系统是采用 DSP 为核心的数字电路作为主控制电路的数字式调速器。PID 控制设计中运用了差分法。这样,选择合适的采样周期后,若连续模型对应的是一个稳定系统,则其离散形式也是稳定的。通过对离散化方程运用 C 语言进行编程,实现对调速器控制特性的数字控制与仿真。

2.1 硬件系统设计

如图 3 所示,该系统采用 TI 公司的 32 位 DSP 处理芯片 TMS320F2812^[4-7] 作为控制核心,通过磁感应测速获得转速反馈;霍尔传感器将直流电流(直流

电压)与控制系统隔离并转换为与之成正比的模拟电压信号,送入 DSP 的 A/D 转换口进行转换;采用 PWM 触发。

2.1.1 脉冲放大电路

PWM 电路输出的脉冲功率小,不能直接驱动晶闸管导通,必须通过功率放大。在实际应用中,一般采用双窄脉冲触发^[8-9]。但是双窄脉冲经过脉冲变压器后脉冲宽度会改变,影响晶闸管的可靠触发。因此,本电路通过 DSP 输出与双窄脉冲对应的一系列窄脉冲,从而形成如图 4 所示脉冲列输出,经功率放大后输出到晶闸管的门极,使相应的晶闸管触发导通。

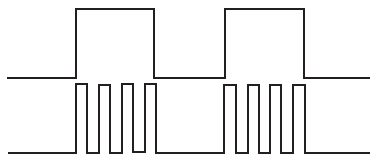


图 4 脉冲列示意图

Fig.4 Pulse train

2.1.2 按键输入、液晶显示电路

按键输入及液晶显示由单片机与 DSP 采取主从方式进行通信。单片机为主机, DSP 为从机。按键包括上键(增速)、下键(减速)、设置键及确定键,用于开机方式及参数修改等。液晶采用 320240 液晶模块,用于显示设置参数及运行参数。参数设置时,按键使单片机进入中断,并向 DSP 发出指令,液晶在接收到相应回复后显示相应界面;运行时,单片机定时发送查询指令,并将 DSP 回复的测量数据显示在界面上,人机交互十分友好。

2.1.3 光电编码器调速电路

光电编码器是一种工业上常用的将位移、角度等机械物理信号转换为电信号的元件,广泛应用于自动控制、自动测量及数控机床上坐标的测量等。光电编码器输出 A、B 2 个互差 90° 的方波信号,每转一周每个信号输出 N 个脉冲。A、B 信号的相位关系体现了光电编码器旋转方向。例如,当光电编码器顺时针旋转时, A 超前 B 90°; 逆时针旋转时, B 超前 A 90°。因此,鉴相电路通过 A、B 的相位关系来判断旋转方向,并且据此决定当一个计数脉冲出现时应该对当前计数值加 1 还是减 1。转速增量的大小与旋转角度存在对应关系,因此,使用光电编码器使得装置的操作性能大为增强。

2.1.4 通信接口

RS-485 串行总线标准,通信距离为几十米到上千米,采用平衡发送和差分接收,因此具有抑制共模干扰的能力;总线收发器具有高灵敏度,能检测低至 200 mV 的电压,故传输信号能在千米以外得到恢复;用于多点互连时非常方便,可以省掉许多信号线。本装置设计一个 RS-485 专用接口芯片 MAX485 的串行通信接口,用来与较远距离的 PC 机或监控系统连

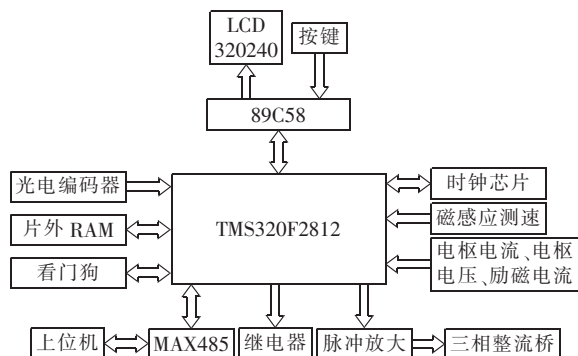


图 3 控制系统硬件框图

Fig.3 Block diagram of control system

接,系统通过串行口接收上位机的各种命令,同时将控制系统的各种运行状态、参数等信息上传至 PC 机,供运行人员远方监控。

2.2 软件系统设计

数字调速器的程序主要包括参数计算,即 $K_1 \sim K_8$ 的计算,根据数学模型和已知参数计算出控制量,反馈给调节系统。由于水轮机与汽轮机在反馈环节存在差异,所以在进入中断后需判断水/汽轮机,再分别对水轮机和汽轮机编写程序。

由上述离散方程可知,汽轮机方程中都存在未知数而形成死循环方程:

$$\delta(k) = \eta(k) - \xi(k), \quad \xi(k) = i\mu(k)$$

$$\mu(k) = \mu(k-1) + K_4\delta(k)$$

故算法上做如下调整^[3],先计算原动机环节 $\mu(k)$,再计算 $\xi(k)$ 。由 $\delta(k) = \eta(k) - \xi(k)$ 及 $\mu(k) = \mu(k-1) + K_4\delta(k)$ 得:

$$\mu(k) = \mu(k-1) + K_4[\eta(k) - \xi(k)]$$

整理得:

$$\mu(k) = d_{10}\mu(k-1) + d_{20}\eta(k)$$

$$d_{10} = 1/(K_4I + 1), \quad d_{20} = K_4/(K_4I + 1)$$

同理,对于水轮机方程可整理得:

$$\mu(k) = d_{1w}\mu(k-1) + d_{2w}\eta(k) - d_{3w}\xi(k-1)$$

$$d_{1w} = \frac{1 + K_3K_4}{1 + K_2K_4 + K_4I}$$

$$d_{2w} = \frac{K_4}{1 + K_2K_4 + K_4I}$$

$$d_{3w} = \frac{K_1K_4}{1 + K_2K_4 + K_4I}$$

这样计算时就能避免引入滞后量。

其流程图如图 5、图 6 所示。

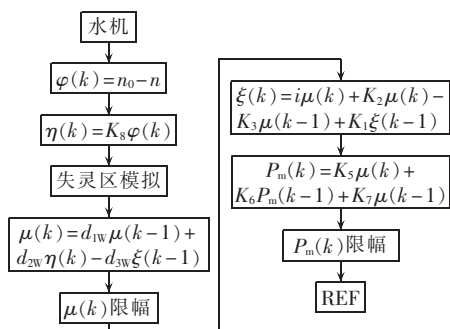


图 5 水轮机程序流程图

Fig.5 Flowchart of hydraulic turbine procedure

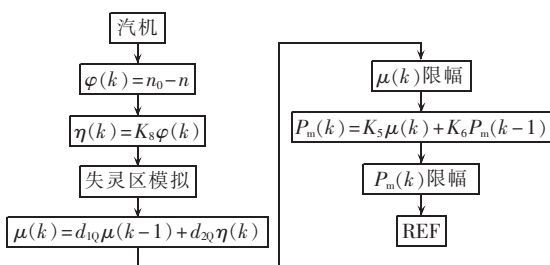


图 6 汽轮机程序流程图

Fig.6 Flowchart of steam turbine procedure

3 仿真分析

通过对原动机及其调速系统的特性分析,利用相似性原理采用直流电动机模拟原动机,可以得到原动机仿真系统的原理框图如图 7 所示。

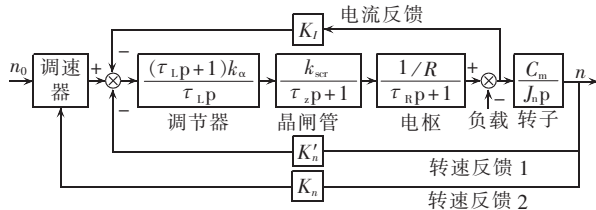


图 7 原动机仿真系统原理框图

Fig.7 Schematic diagram of prime mover simulation system

图中, k_α 为调节器放大倍数; τ_L 为调节器积分时间常数; τ_z 为整流桥等效时间常数; k_{scr} 为整流桥电压放大倍数,以 k_{scr} 为准; τ_R 为电枢回路时间常数; R 为电枢回路等效电阻; C_m 为转子系数; J_n 为转动惯量; p 为对时间的微分算子; K_I 为电流反馈系数 (< 1); K_n 、 K_n' 为转速反馈系数 (< 1)。

直流电动机由晶闸管供电,采用三相桥式整流电路。电机的相关参数为:功率 15 kW,额定电压 220 V,额定转速为 1500 r/min。

3.1 自平衡特性仿真

原动机机械特性曲线的测定是在开度 μ 一定的情况下,通过改变发电机负载使转速发生变化的方法来完成^[10]。通过改变电流反馈系数,可以得到不同斜率的特性曲线。将实际参数代入原动机自平衡特性模型中,并在 Matlab 下进行仿真,如图 8 所示(图中量为标么值)。

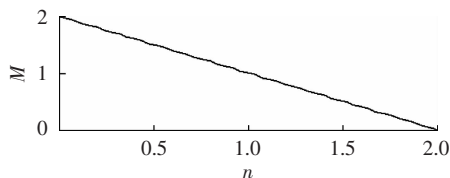


图 8 原动机机械特性曲线

Fig.8 Mechanical characteristic curve of prime mover

3.2 甩 100% 额定负荷仿真

突然甩 100% 负荷,并观察机组转速 n 的动态波形与稳态变化率,以验证模型的转速动态特性是否符合原型的基本规律^[11]。实际电力系统中,要求转速超调应小于超速保安器的动作转速 (110%~112%),明显的振荡次数应小于 3~5 次,机组静态调差系数 δ 值的范围一般在 3%~6%^[12]。仿真结果如图 9 所示 (n 为标么值,图 10 同)。

3.3 水轮机空载扰动仿真

当水轮机水门突然增大时,水轮机的输出由于水锤效应一开始并不会增大,反而会有所减小,电机转速也会略有下降,随后机组才会逐渐升速,最终到

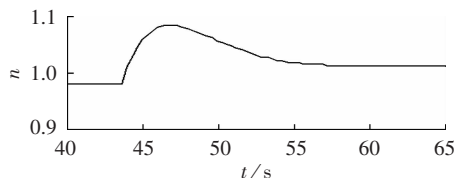


图 9 甩负荷曲线

Fig.9 Load rejection curve

达较高转速的稳定值。当水门突然关小时,其情况与此相反^[13-14]。仿真结果如图 10 所示。

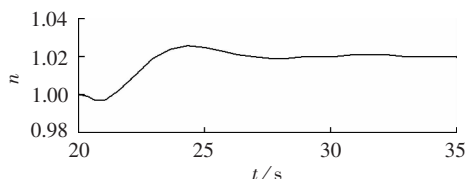


图 10 水锤效应曲线

Fig.10 Water hammer effect curve

4 结论

所设计的原动机及其调速系统动态仿真模型,以 DSP 芯片为控制核心,通过调速器模型实现了对原型调速器、水汽管道的仿真;利用直流电动机控制回路加电流、转速双反馈,实现了自平衡特性的仿真。最后通过 Matlab 仿真证明了模型的正确性,充分显示了原动机及其调速系统的仿真是电力系统动态模拟中非常重要的一环,对于研究电力系统静态稳定和动态稳定,以及调速器对电力系统过渡过程的影响都是必不可少的。

参考文献:

- [1] 郑玉森. 模拟发电机组原动系统仿真[J]. 天津大学学报,1985(3): 83-90.
ZHENG Yusen. The simulation of the prime mover systems of dynamic turbine-generator simulators[J]. Journal of Tianjin University, 1985(3): 83-90.
- [2] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:72-80.
- [3] 杨德先,李国久,陈贤治. 水轮机及其调速系统动态模拟研究[J]. 水电能源科学,1998(4):28-32.
YANG Dexian, LI Guojia, CHEN Xianzhi. The dynamic simulation of the hydraulic turbine and its governing system [J]. Hydro-electric Energy, 1998(4): 28-32.

- [4] 万山明. TMS320F2812X DSP 原理及应用实例[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007:1-48.
- [5] 周志宇,李裕能,郭松梅,等. 基于 DSP 的同步交流采样技术[J]. 电力自动化设备,2006,26(5):57-60.
ZHOU Zhiyu, LI Yuneng, GUO Songmei, et al. Synchronous AC sampling technologies based on DSP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(5): 57-60.
- [6] 王洪涛,周有庆,彭红海. 基于 DSP 的微机保护综合实验装置设计[J]. 电力自动化设备,2007,27(1):97-100.
WANG Hongtao, ZHOU Youqing, PENG Honghai. Design of integrative experimental device for microcomputer protection based on DSP[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(1): 97-100.
- [7] 蔡方凯,张玉平. 基于 DSP 实现双闭环控制的直流电源[J]. 电力自动化设备,2009,29(10):140-142.
CAI Fangkai, ZHANG Yuping. DC power supply with DSP-based dual closed-loop control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 140-142.
- [8] LIU Juemin, DIAO Xianqiang, FU Zhenyu. Study on increasing the reliability of speeder system in analogue prime movers[C]// The 1st International Conference on Reliability of Electrical Products and Electrical Contacts. Suzhou, China; [s.n.], 2004: 240-243.
- [9] 王兆安,黄俊. 电力电子技术[M]. 4 版. 北京:机械工业出版社,2000:19-40.
- [10] 毛承雄,王丹. 原动机及其调速系统动态模拟[J]. 继电器,2004, 32(19):34-38.
MAO Chengxiong, WANG Dan. Dynamic simulation of prime mover and its governor[J]. Relay, 2004, 32(19): 34-38.
- [11] 刘觉民. 原动机系统仿真模型动态特性研究[J]. 湖南大学学报:自然科学版,1994,21(2):98-104.
LIU Juemin. Study on dynamic characteristic of emulation model for governing system of prime movers [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 1994, 21(2): 98-104.
- [12] 叶荣学. 汽轮机调节[M]. 北京:水利电力出版社,1988:50-54.
- [13] JAEGER D E, JANSSENS N, MALFLIET B, et al. Hydro turbine models for system dynamic studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(4): 1709-1715.
- [14] 沈祖诒. 水轮机调节[M]. 北京:水利电力出版社,1997:162-192.

(编辑:李玲)

作者简介:

祖映翔(1986-),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要从事电力系统动态仿真与电力电子技术应用方面的研究(E-mail: zuyingxiang@sina.com);

刘觉民(1950-),男,湖南望城人,教授,主要从事电力系统与电力电子方面的科研与教学工作;

鲁文军(1971-),男,湖南浏阳人,讲师,博士,主要从事发电厂励磁及同期系统的调节控制和继电保护新原理及算法研究。

Dynamic simulation of prime mover and its governor based on DSP

ZU Yingxiang, LIU Juemin, LU Wenjun, LIU Zhongren

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A simulation model of prime mover and its governor based on DSP (Digital Signal Processor) is introduced, which integrates the proven mathematic models of some prime movers and takes TMS320F2812 as its controller to realize a complete digital control. The prime mover with self-equilibrium characteristic is simulated by DC motor with both speed and current feedbacks while the speed governor is simulated by software. The operating and regulating parameters of simulation system can be sent to the supervisory system or PC for easy operation and intuitive monitoring.

This work is supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities, Hunan University.

Key words: prime mover; governor; dynamic simulation; DSP