

原动机及其调速系统动态模拟

毛承雄, 王丹, 陆继明, 李国久, 杨德先

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对原动机及其调速系统的实际特点, 采用通用数学模型, 以微机为核心, 利用可控整流技术和直流电机实现了原动机及其调速系统的动态模拟。该模拟系统的直流电机电源采用以集成触发模块为核心的移相触发技术实现控制, 简化了系统。设计的红外测速系统容易安装, 简单可靠。动模试验结果令人满意。

关键词: 原动机; 调速系统; 动态模拟

中图分类号: TM743 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)19-0034-05

0 引言

电力系统动态模拟技术对实际电力系统的研究具有十分重要的意义。它包括诸多内容, 其中原动机及其调速系统的模拟是电力系统动态模拟的基础之一。特别是在研究电力系统机电暂态过程时, 原动机的模拟是一个重要环节。在研究时间比较长, 转速变化比较大的非同期运行、系统综合稳定性以及冲击负荷的影响时, 必须在比较大的范围模拟原动机的特性。

早期原动机及其调速系统的模拟均采用模拟式集成电路实现^[1], 由于元件和电位器数量多, 调试和维护复杂, 并且只能模拟原形系统的部分环节, 难以模拟整个系统, 准确度不高。目前, 国内外对采用微机实现原动机调速系统模拟的研究较少, 文献[2, 3]分别介绍了采用 8031 和 80C196 实现原动机调速系统的模拟技术, 但未见推广应用。

本文采用 3 片 80C196 CPU 实现了原动机及其调速系统的动态模拟。该系统的突出特点在于: 仿真计算采用 32 位二进制定点进行, 其中 4 位为整数位, 28 位为小数位, 计算精度高, 可大幅度减小仿真计算中的累计误差; 数值大小表示范围可以满足原动机及其调速器的标么值系统计算要求, 同时加入了数值溢出检验; 该模拟系统可以稳定、灵活地模拟各种功率的原动机系统, 设置了完备的保护功能, 同时解决了原有模拟系统电机测速装置安装复杂的问题。该技术已经在我国多家大专院校、研究所及军工单位的实验室推广应用。

1 原动机及其调速系统的数学模型

1.1 原动机数学模型

原型系统中原动机分为汽轮机和水轮机两种,

它们既具有相似的地方, 又各有自己的特点。由于实际精确模型比较复杂, 所以在实用电力系统分析与计算中常常采用简化数学模型。

对于汽轮机, 其动态特性主要考虑汽门和喷嘴间的蒸汽惯性引起的蒸汽容积效应(即蒸汽压力不会立即发生变化, 因而输入汽轮机的功率也不会立即变化), 这通常可以采用一阶惯性环节来模拟。汽轮机的数学模型描述的是汽轮机汽门开度同输出机械功率之间的关系。

对于水轮机, 其动态特性主要考虑引水管道由于水流惯性引起的水锤效应(即导水叶突然开大时, 水轮机瞬时功率会突然减小一下, 然后再增大, 反之亦然)。与汽轮机类似, 水轮机的数学模型描述的是导水叶开度与输出机械功率之间的关系。

汽轮机和水轮机的典型数学模型见文献[4]。

1.2 调速器数学模型

调速系统是原动机的一个重要组成部分, 它的主要作用是自动维持机组转速和在机组间分配负荷。汽轮机的调速系统主要有液压调速器和功频电液调速器两类, 可以用相同的数学模型进行描述; 水轮机的调速系统主要有机械调速器和电气液压调速器两种, 他们也可以用相同的数学模型进行描述。

文献[4]给出了汽轮机调速器和水轮机调速器的典型传递函数框图。两者的环节基本相同, 主要区别在于汽轮机调速器只有硬反馈环节但没有软反馈环节, 而水轮机调速器两种反馈都有。

1.3 仿真算法

在已知原动机及其调速系统数学模型的前提下, 可以应用数值解法来仿真其暂态过程。在众多的数值解法当中, 隐式梯形积分法被认为是计算电力系统暂态过程较理想的方法^[5]。

对于一个如式(1)所示的典型惯性环节

$$y = \frac{1}{1 + T \cdot s} \cdot u \quad (1)$$

可以写成微分方程的形式:

$$y = -\frac{1}{T} \cdot y + \frac{1}{T} u$$

将上式离散化后化成差分方程:

$$y_{k+1} = y_k + (y_k + y_{k+1}) = y_k + \left(-\frac{1}{T} y_k + \frac{1}{T} u_k - \frac{1}{T} y_{k+1} + \frac{1}{T} u_{k+1}\right)$$

式中: $\Delta t = \frac{1}{h}$; h 为仿真步长。

因此,

$$y_{k+1} = \frac{T-}{T+} y_k + \frac{1}{T+} u_k + \frac{1}{T+} u_{k+1} \quad (2)$$

式(2)就是式(1)所示的惯性环节的隐式梯形积分分解法的叠代方程,它具有普遍意义。对于有些环节,式(2)中 u_k 和 u_{k+1} 可以取为相等。文献[4]给出的原动机及其调速系统的数学模型可以化成多个惯性环节之积的形式,利用式(2)即可进行仿真计算。

2 原动机及其调速系统的动态模拟系统

2.1 整体结构

在电力系统动态模拟中,原动机模拟普遍采用直流电动机拖动方案来实现,直流电动机的供电电源采用三相晶闸管整流桥。以单片机为核心的控制系统通过对调速器及原动机相关环节的仿真模拟技术,控制直流电动机使之动态行为模拟出原型中的原动机特性。图1是原动机及其调速系统的动态模

拟系统构成图。

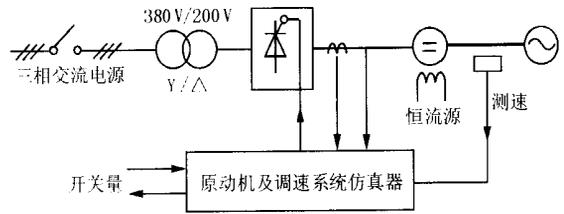


图1 动态模拟系统结构图

Fig. 1 Structure of dynamic simulation system

作为原动机及其调速系统仿真器,它要完成原动机及其调速系统各种特性的模拟,最终输出控制晶闸管整流桥的触发脉冲,如图2所示。

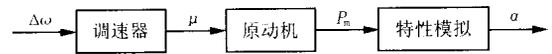


图2 动态模拟实现过程图

Fig. 2 Procedure of dynamic simulation

2.2 晶闸管触发系统

晶闸管触发电路有很多种构成方法,目前已出现了很多种集成触发模块,TC787 是其中的一种。TC787 主要适用于三相晶闸管移相触发和三相功率晶体管脉宽调制电路,它具有功耗小、功能强、输入阻抗高、抗干扰性能好、移相范围宽和外接元件少等优点。在原动机及其调速系统的模拟系统中,本文以 TC787 为核心,设计了直流电动机源(三相整流桥)的移相触发系统。

在这里的一个关键问题是:为了模拟原动机的特性,选择哪些量作为 TC787 的 4 号脚的控制量以获得满意的移相输出脉冲。图3所示的是本文采用的方案,从最终的运行结果来看,效果较好。

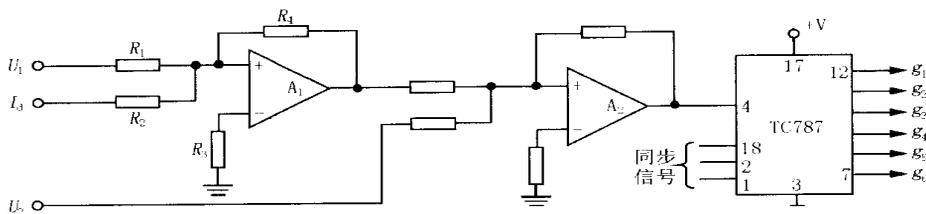


图3 移相触发系统

Fig. 3 Phase shifting and triggering system

由于利用原动机数学模型进行仿真计算的输出结果是原动机的有功出力,所以它不能被用来作为控制量 U_1 、 U_2 去控制整流桥,而必须经过适当的转换使之与触发控制角 α 形成一一对应关系。也正因为如此,本文所设计的原动机及其调速系统的模拟系统可以模拟不同额定功率的原动机。

2.3 测速装置

在原动机及其调速系统的模拟中,精确快速测量发电机的转速关系到整个模拟系统动态性能。以往发电机测速常采用测速电机、数码盘、数字式编码器和接近开关等手段实现,这些方法都需要在发电机轴上安装附加装置。

本文介绍的模拟系统采用作者利用红外发射接收管设计的测速装置,不需要在发电机轴上附加任何装置就可以实现精确测速,具有简单方便的优点。测速装置的原理示意图如图 4 所示。

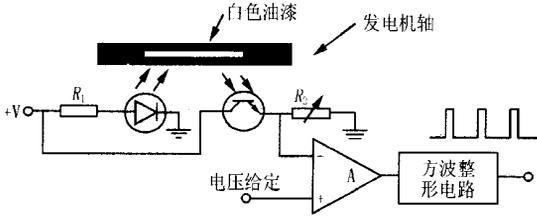


图 4 红外测速装置原理简图

Fig. 4 Schematic diagram of speed measurement by infrared ray

图 4 中, R_1 是红外发射管的限流电阻, R_2 是方波电路的灵敏度调节电阻。红外测速装置安装完成后,通过调节 R_2 ,红外测速装置便可输出持续稳定的测速方波。

红外测速装置的测速原理是:发电机旋转时,当转轴的带状白色油漆(宽约 2 cm 左右,边缘尽量整齐)每经过红外测速装置时,红外接收管就能接收到较强的反射红外线,电压比较器电平开始翻转,这样就可形成一系列方波信号。调速系统仿真器就是根据该信号测量转速。大量动模试验表明,该红外测速装置,安装和调试简单方便,运行时性能稳定。

2.4 原动机特性模拟

本文采用直流电动机拖动方案实现原动机模拟。根据电机学原理,直流电机的固有机械特性为:

$$n = \frac{U}{C_E} - \frac{R_a}{C_E} I_d = \frac{U}{C_E} - \frac{R_a}{C_E C_T} T_{em}$$

式中: U 为电枢电压,单位为 V; C_E 为电动势常数; Φ 为主磁通,单位为 Wb; n 为电机转速,单位为 rpm; I_d 为电枢电流,单位为 A; R_a 为电枢回路电阻,单位为 Ω ; T_{em} 为电磁转矩,单位为 N·m; C_T 为转矩常数。

标么化以后可得:

$$n^* = U^* - R_a^* I_d^* = U^* - R_a^* T_{em}^*$$

由于直流电动机的电枢电阻 R_a^* 很小,所以直流电动机的固有机械特性很接近水平线。在原型系统中,原动机的特性曲线各有不同,但在模拟系统中,汽轮机和水轮机的特性曲线一般按 45° 特性线整定。因此,直流电动机固有的机械特性曲线不能满足模拟要求,必须人为增大 R_a^* 。这可以通过在电枢回路串联电阻来解决,但这种方案的损耗也比较大。实际上,采用在晶闸管触发控制回路引入电流

负反馈的方法也可以达到目的。引入电流负反馈,使

$$U^* = U^* - I_d^* R_f^*$$

因此

$$n^* = U^* - (R_a^* + R_f^*) I_d^* = U^* - (R_a^* + R_f^*) T_{em}^* \quad (3)$$

从式(3)可以看出,通过引入电流负反馈,可以使直流电机的机械特性变软,只要反馈电阻选择合适,就可以模拟出 45° 左右的机械特性曲线。

在图 3 所示的晶闸管触发系统中,电流 I_d 信号实际就是为了模拟原动机机械特性而引入的电流反馈信号,同时也可起到稳定电枢电流的作用。通过调节 R_2 ,可以模拟不同斜率的原动机机械特性, R_2 增大,特性曲线更平坦,反之,特性曲线更倾斜。

2.5 微机控制系统

原动机及其调速系统动态模拟微机系统采用成本较低、功能较强的 3 片 80C196KC CPU:主 CPU、测量 CPU 和控制 CPU。测量 CPU 和控制 CPU 与主 CPU 之间采用双口 RAM 通讯。

测量 CPU 任务:原机电枢回路直流电流、直流电压的测量和励磁电流的测量;模拟交流发电机的交流电流和交流电压的测量并计算出有功功率和无功功率,与主 CPU 通讯。

控制 CPU 任务:主要完成两路 12 位串行 D/A 转换,实现晶闸管导通角控制,与主 CPU 通讯。

主 CPU 任务:原动机和调速器(汽轮机和水轮机)仿真,输入、输出开关量处理,参数整定与修改,保护系统等。另外,完成与测量 CPU 和控制 CPU 之间的通讯。

所有软件功能均采用 80C196 汇编语言实现。该系统仿真计算采用 32 位二进制定点进行,计算精度高,可大幅度减小仿真计算中的累计误差。该系统显示功能较强,电流、电压、控制量等以及重要的内部变量均可显示,如:模拟调速器的死区前和死区后量的大小等。

由于在动模实验系统中,完善、可靠的报警保护系统对于保证试验过程中的人身安全和设备安全具有重要意义,本文重点研究和实现了完善的保护功能。主要包括:

- 1) 过速保护。当发电机频率大于 60 Hz 时,仿真器报警并自动跳开关。
- 2) 过流保护。当电枢电流大于 1.5 p. u. 时,仿真器报警并自动跳开关。
- 3) 过压保护。当电枢电压大于 1.5 p. u. 时,仿

真器报警并自动跳开关。

4) 失磁保护。当励磁电流小于 0.6 p. u. 时,仿真器报警并自动跳开关。

5) 仿真器内部故障,包括 CPU 等。

6) 机组停止转动后才能再合闸,否则也自动跳开关。

7) 红外测速装置故障,自动跳开关。

保护动作值的大小可以根据需要进行整定。

3 试验结果

针对原动机及其调速器模拟系统,在动模实验室进行了大量动模试验。本文只给出其中部分动模试验结果。

3.1 原动机机械特性曲线测取

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,使转速发生变化的办法来完成。

将发电机在额定转速下带到额定负载,维持开度 μ 不变,然后逐渐减少负载,使转速提升到 $1.1 n_e$ 左右。再增加负载,使转速下降,并记录数据,一直做到转速为 $0.9 n_e$ 左右,再减少负载,使回升到 $1.1 n_e$ 。把所记录的数据折算成标么值,就可以作出原动机的转矩-转速特性曲线。

改变图 3 中的 R_2 ,可以获得不同斜率的特性曲线,图 5 是在动模实验室完成的 45 特性曲线。

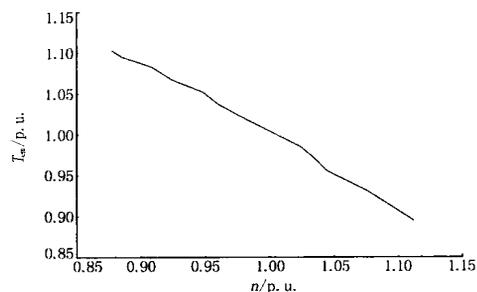


图 5 原动机机械特性曲线

Fig. 5 Curve of mechanical characteristic

3.2 突然启动电机负荷和甩负荷试验

图 6 所示是本文设计的动态模拟系统在突然启动电机负荷和甩 100% 负荷时的暂态响应波形。从波形来看,所设计的动态模拟系统具有较好的动态性能。

4 结论

本文以微机为核心,利用直流电机和可控整流技术建立了原动机及其调速系统的动态模拟系统。采用微机数字化技术实现调速器和原动机相关环节模拟,大大简化了模拟系统的结构,并使原动机及其调速系统的模拟装置更加灵活。利用集成触发芯片,设计了直流电动机电源(三相整流桥)的移相触发系统,简化了系统结构,提高了可靠性。设计的红外测速装置,具有简便可靠的特点。采用软件编程

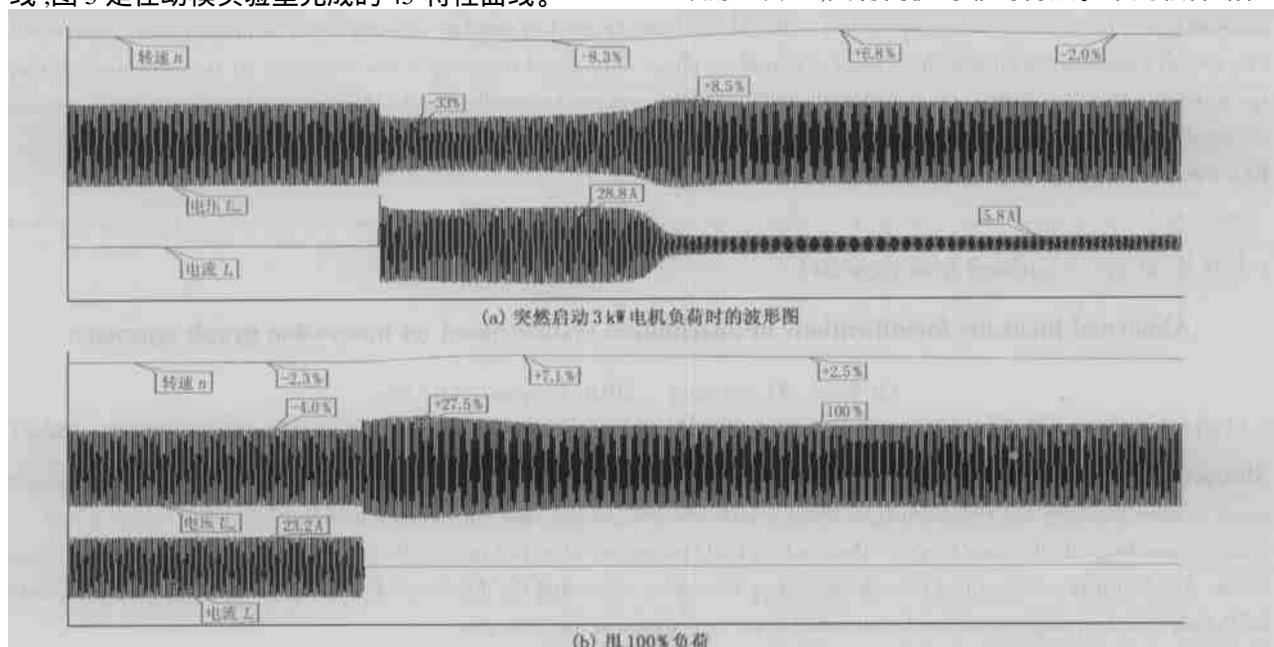


图 6 暂态波形

Fig. 6 Waveforms of transient process

实现了较为完善的保护功能,提高了试验设备的安全性和可靠性。

参考文献:

- [1] 杨德先,李国久,陈贤治 (YANG De-xian, LI Guo-jiu, CHEN Xian-zhi). 同步发电机的原动机仿真研究 (A Study on the Simulation of Prime Mover of a Turbine generator) [J]. 华中理工大学学报 (Journal of Huazhong University of Science & Technology), 1998, 26(s1): 44-46.
- [2] 刘觉民,鲁文军,周先亮,等 (LIU Jue-min, LU Wen-jun, ZHOU Xian-liang, et al). 微机控制型原动机调速器的模型与设计 (Model and Design of Governor of Generator Controlled by Microcomputer) [J]. 湖南大学学报 (Journal of Hunan University), 1996, 23(3): 92-97.
- [3] 覃平生,刘觉民,周有庆,等 (QIN Ping-sheng, LIU Jue-min, ZHOU You-qing, et al). 基于 80C196KC 的原动机仿真系统设计 (Design of Prime Mover Simulation System Based on 80C196KC) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2002, 23(2): 41-45.
- [4] 倪以信,陈寿孙,张宝霖 (NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin). 动态电力系统的理论和分析 (Theory and Analysis of Power System Dynamics) [M]. 北京:清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2002.
- [5] 夏道止 (XIA Dao-zhi). 电力系统分析 (Power System Analysis) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1998.

收稿日期: 2004-02-11; 修回日期: 2004-03-04

作者简介:

毛承雄 (1964 -), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大型同步发电机控制、并行计算、大功率电力电子技术在电力系统中应用的研究;

王丹 (1977 -), 男, 博士研究生, 研究方向为同步发电机控制及电力电子技术在电力系统中的应用研究;

E-mail: wangdenver@hotmail.com

陆继明 (1956 -), 男, 副教授, 主要从事大型同步发电机励磁控制及大功率电力电子技术在电力系统中应用等研究。

Dynamic simulation of prime mover and its governor

MAO Cheng-xiong, WANG Dan, LU Ji-ming, LI Guo-jiu, YANG De-xian
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: According to the characteristics of the prime mover and its governor, this paper sets up the dynamic simulation system of the prime mover and its governor based on the microcomputer, converter technology and DC electric machine. As the application of the microcomputer, the dynamic simulation system is flexible and can be used to simulate different types of prime movers conveniently. One special integrated circuit module is adopted to perform phase shifting and triggering of the converter. At the same time, a simple speed detector based on infrared ray is proposed which is reliable and can be installed easily. The test results of its dynamic simulation are satisfactory.

Key words: prime mover; governor; dynamic simulation