

建立控制系统数学模型的目的之一是对控制系统进行设计与分析,以期实现对工程对象良好的控制性能。本章结合运动控制与电力电子控制的 8 个具体工程问题,给出基于系统建模与仿真实验的系统设计与分析;其中所涉及的理论与技术内容有助于我们深入理解已学过的知识,扩大自己的知识面。

3.1 直流电动机转速/电流双闭环控制系统设计

自 20 世纪 70 年代以来,国内外在电气传动领域里,大量地采用了晶闸管整流电动机调速技术(简称 V-M 调速系统)。尽管当今功率半导体变流技术已有了突飞猛进的发展,但在工业生产中 V-M 系统的应用还是占有相当比重;一般情况下,V-M 系统均设计成图 3-1 所示的转速/电流双闭环控制形式。

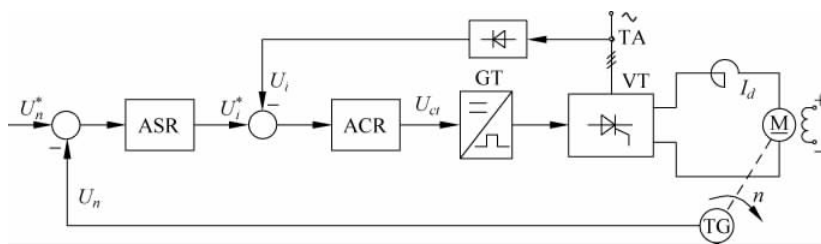


图 3-1 直流电动机双闭环调速系统结构图

1. 系统建模

根据 2.5.5 节的分析,可得图 3-1 所示的双闭环直流调速系统的动态系统结构,如图 3-2 所示。

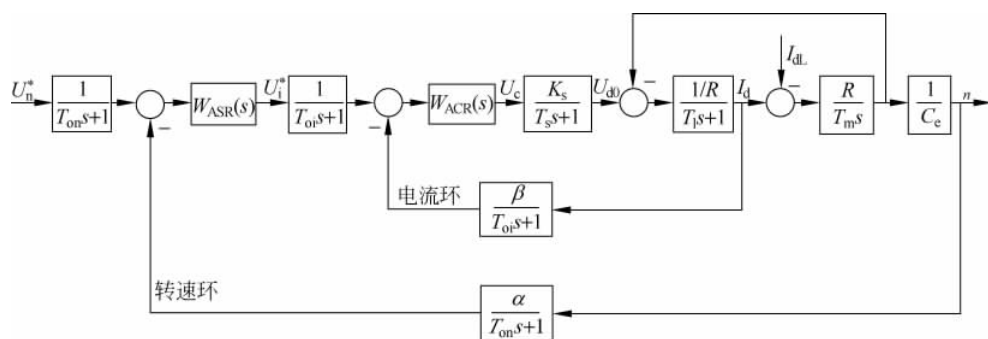


图 3-2 双闭环调速系统的动态结构框图

2. 电流环与转速环调节器设计

(1) 双闭环控制的目的

双闭环控制的直流调速系统着重解决了以下两方面的问题：

① 启动的快速性问题。借助于 PI 调节器的饱和和非线性特性,使得系统在电动机允许的过载能力下尽可能地快速启动。理想的电动机启动特性如图 3-3 所示。

② 提高系统抗扰性能。通过调节器的适当设计可使系统“转速环”对于电网电压及负载转矩的波动或突变等扰动予以控制(迅速抑制),在最大速降、恢复时间等指标上达到最佳,其动态特性如图 3-4 所示。

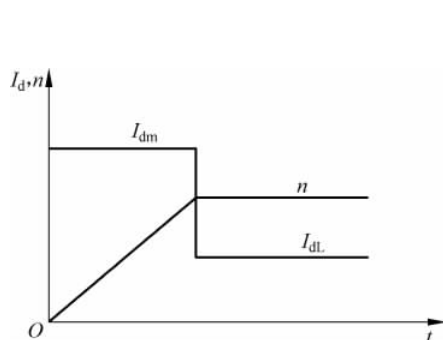


图 3-3 理想电动机启动特性

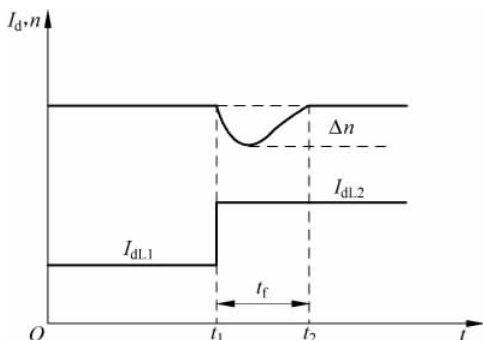


图 3-4 双闭环控制直流调速系统负载扰动特性

(2) 关于积分调节器的饱和和非线性问题

双闭环 V-M 调速系统中的 ASR 与 ACR 一般均采用 PI 调节器。在图 3-5 中给出了控制系统的 PI 控制规律动态过程,从中我们可知:

① 只要偏差 ΔU 存在,调节器的输出控制电压 U_c 就会不断地无限制地增加。因此,必须在 PI 调节器输出端加限幅装置。

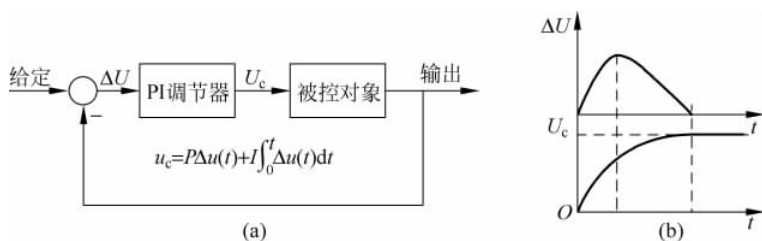


图 3-5 比例积分调节器结构及其输入输出动态过程

② 当 $\Delta U=0$ 时, U_c = 常数。若要使 U_c 下降, 必须使 $\Delta U < 0$ 。因此, 在直流调速控制系统中, 若要使 ASR 退出饱和状态(进入线性控制状态), 就一定要产生超调现象。

③ 对于前向通道带有惯性环节的控制系統, 若控制器存在积分作用, 则在给定作用下, 系统输出一定不会出现超调。

(3) ASR 与 ACR 的工程设计方法^[1]

对于直流电动机转速控制系统设计问题, 通常应用“典型系统工程设计方法”; 对于电流环控制器的设计, 在稳态上希望电流控制无静差, 以得到理想的启动特性, 同时要求电流的跟随性能要好; 因此, 把电流环设计校正成典型 I 型系统; 而转速环控制器, 通常按把系统综合成典型 II 型系统来设计, 这样既可以保证转速无静差, 又有较强的抗扰性。

对于图 3-1 所示的双闭环控制系统, 理论上 ASR 与 ACR 均采用 PI 调节器的形式, 且有如下最佳设计方法:

① 电流调节器:

$$W_{ACR}(s) = K_i \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}$$

式中, K_i 为电流调节器的比例系数; τ_i 为电流调节器的超前时间常数。

为了让调节器零点对消掉控制对象的大时间常数(极点), 选择

$$\tau_i = T_l$$

在一般情况下, 希望超调量 $\sigma\% \leq 5\%$ 时, 可取阻尼比 $\xi = 0.707$, $K_1 T_{\Sigma i} = 0.5$, 得

$$K_1 = \frac{1}{2T_{\Sigma i}}, \quad (T_{\Sigma i} = T_s + T_{oi})$$

又因为

$$K_1 = \frac{K_i K_s \beta}{\tau_i R}$$

得到

$$K_i = K_1 \frac{\tau_i R}{K_s \beta} = \frac{T_l R}{2K_s \beta T_{\Sigma i}} = 0.5 \frac{R}{K_s \beta} \left(\frac{T_l}{T_{\Sigma i}} \right)$$

② 转速调节器:

$$W_{ASR}(s) = K_n \frac{\tau_n s + 1}{\tau_n s}$$

式中, K_n 为转速调节器的比例系数; τ_n 为转速调节器的超前时间常数。

转速开环增益

$$K_N = \frac{K_n \alpha R}{\tau_n \beta C_e T_m}$$

按照典型 II 型系统的参数选择方法

$$\tau_n = h T_{\Sigma n}, \quad (T_{\Sigma n} = 2 T_{\Sigma i} + T_{on})$$

$$K_N = \frac{h+1}{2h^2 T_{\Sigma n}^2}$$

得到 ASR 的比例系数

$$K_n = \frac{(h+1)\beta C_e T_m}{2h\alpha R T_{\Sigma n}}$$

在工程上,通常选择 $h=5$ 为最佳。所以有

$$\tau_n = 5 \times T_{\Sigma n}, \quad K_N = \frac{6}{50 \times T_{\Sigma n}^2}$$

经过如上设计的 V-M 调速系统,理论上讲有如下动态性能:电动机启动过程中电流的超调量为 4.3%,转速的超调量为 8.3%;需要说明的是,上述设计是以“线性系统”为前提条件的;在系统调试中,受系统存在非线性、近似误差等因素的影响,实际动态性能会有所差异,下面的仿真实验也证明了这一点。

3. 仿真实验

(1) 仿真模型搭建

系统中采用三相桥式晶闸管整流装置,基本参数如下:

直流电动机: 220V, 13.6A, 1480r/min, $C_e = 0.131 \text{V}/(\text{r}/\text{min})$, 允许过载倍数 $\lambda = 1.5$; 晶闸管整流装置: $K_s = 76$; 电枢回路总电阻: $R = 6.58 \Omega$; 直流电动机时间常数: $T_l = 0.018 \text{s}$, $T_m = 0.25 \text{s}$; 反馈系数: $\alpha = 0.00337 \text{V}/(\text{r}/\text{min})$, $\beta = 0.4 \text{V}/\text{A}$; 反馈滤波时间常数: $T_{oi} = 0.005 \text{s}$, $T_{on} = 0.005 \text{s}$ 。

为使仿真结果更具真实性,系统控制对象的模型精度尤为重要;这里,我们借助 MATLAB/SimPowerSystems 工具软件来建立系统的仿真模型。

根据图 3-1 的双闭环调速系统结构,应用 SimPowerSystems 中的晶闸管整流和触发装置、直流电动机模型作为系统的被控对象,可得晶闸管-直流电动机调速系统如图 3-6 所示。

① 转速环控制器/ASR

由文献[1]知,转速环控制器需将外环系统校正成典型 II 型系统,故转速环控制器应采用 PI 控制方式;这里采用 Simulink 中的连续 PID 控制器模块,并且将

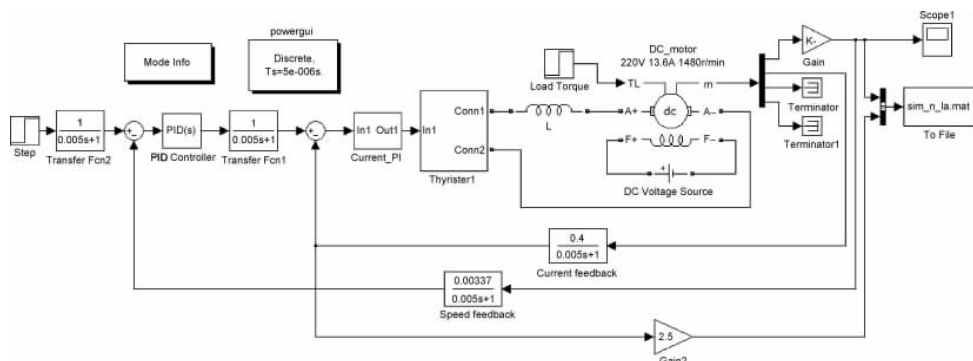


图 3-6 晶闸管-直流电动机调速系统仿真结构图

微分项的系数设置为 0,其结构如图 3-7 所示。

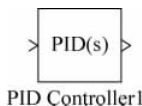


图 3-7 转速环调节器

图 3-8 所示为 PID 调节器内部参数的设置方法。

在 PID Advanced 选项卡中,限幅电压设为±8 伏特 (ASR 输出限幅值=电机电流最大值×电流环反馈系数 β 值),抗积分饱和方法选择 clamping 法(在积分达到限幅值时停止积分),以降低系统的超调量,缩短调节时间。

注意,转速环控制器/ASR 在系统的启动过程控制中,呈现“饱和非线性特性”,用以实现“最大电流/转矩启动”的最佳工作特性;这一“非线性特性”在上面的理论设计中,并未考虑之。

② 电流环控制器/ACR

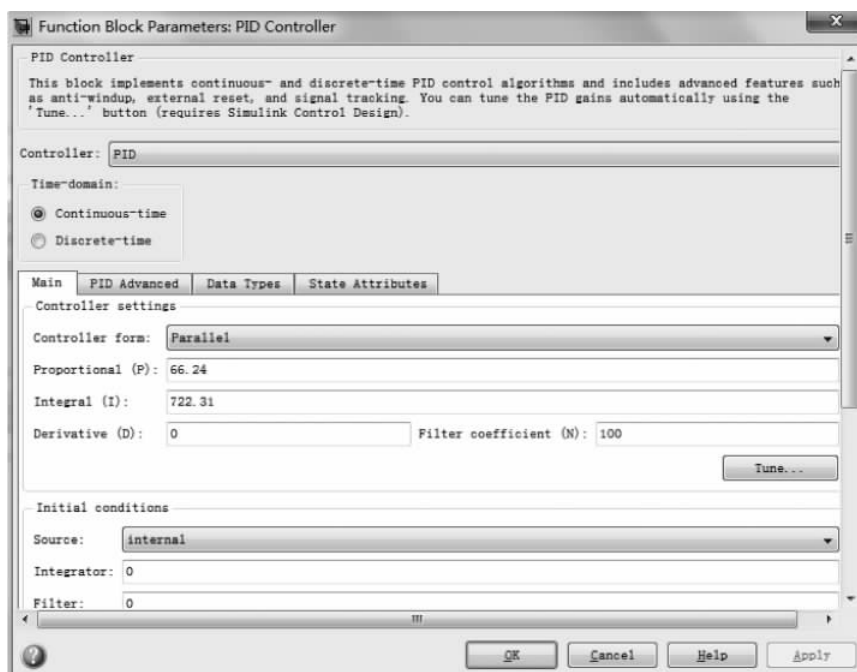
由文献[1]知,电流环控制器需将内环系统校正成典型 I 型系统,故电流环控制器也需采用 PI 控制方式,这里我们采用子系统的方式将电流环控制器封装为子系统。

需要强调的是,在 SimPowerSystems 环境下的电流环控制器与在 Simulink 环境下建立的数学模型不同,SimPowerSystems 环境里的模型是物理模型,必须考虑实际情况,由于电流环的输出连接至晶闸管整流器的相位输入,所以需要将电流环的“电压输出转化为晶闸管的相位输入”进行控制。各电压值与各相位值为线性关系,故设线性方程为 $y=ax+b$ 。

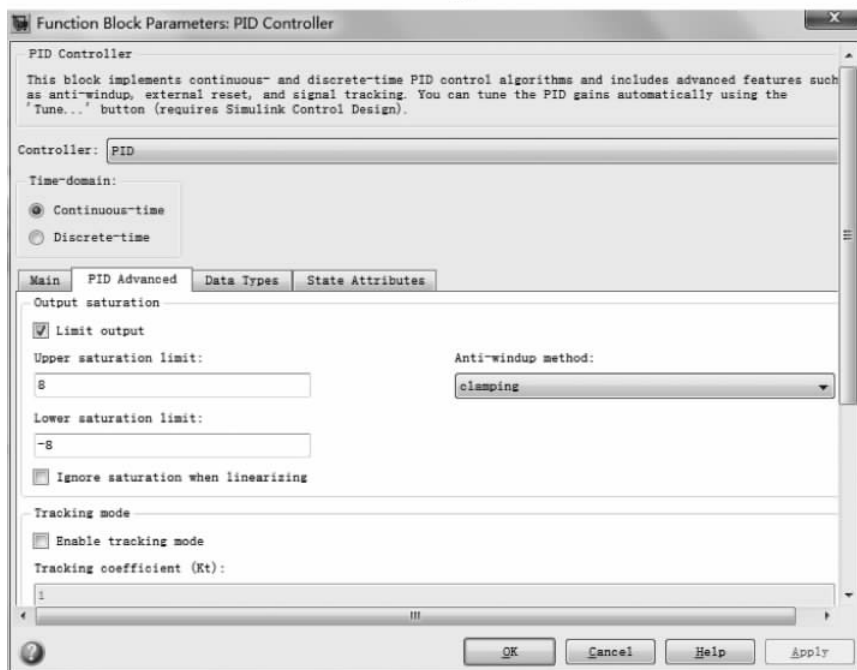
根据分析,负载电动机可以等效为阻感负载,当采用三相桥式全控整流电路时,相位控制范围为 $(0^\circ \sim 90^\circ)$,对应的电压范围为 $(248.19\text{V} \sim 0)$ 。

另外,与采用线性模型仿真所设计的电流环调节器不同,将电压转化为对应的触发角度值,需要添加“限幅环节”,将角度值限幅在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间。电流环子系统仿真程序如图 3-9 所示。

注意,通常电流环控制器/ACR 也设置“饱和限幅输出特性”,以限定电机两端的最高电压;但是,ACR 应该始终工作在线性段,以保证电流控制的快速跟随特性。



(a)



(b)

图 3-8 PID 调节器参数设置

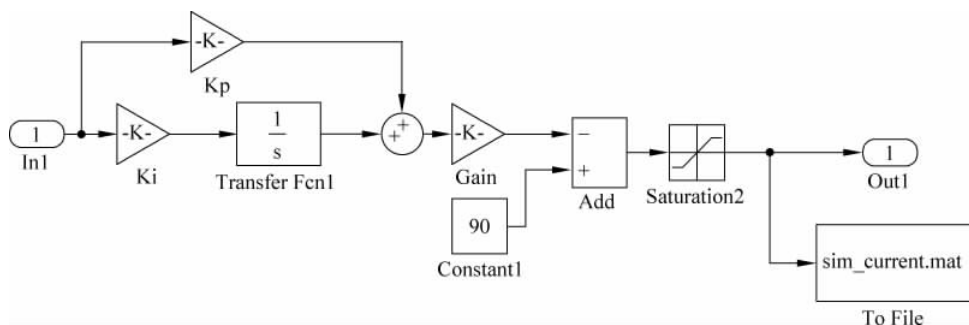


图 3-9 电流环子系统内部结构图

③ 晶闸管触发和整流装置

这里,我们采用三相桥式全控整流电路得到电动机驱动电压,三相桥式全控整流电路工作时要保证任何时候都有两只晶闸管导通,这样才能形成向负载供电的回路,并且是共阴极和共阳极组成各一个,不能为同一组的晶闸管;因此,采用 SimPowerSystems 环境下的同步六脉冲发生器(Synchronized 6-Pulse Generator)提供三相整流电路的触发脉冲。

图 3-10 中设置三个交流电压源 V_a, V_b, V_c 相位角依次相差 120° ,得到整流桥的三相电源。采用电压测量模块测得线电压 V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} 作为同步六脉冲发生器的输入端, α_{deg} 为触发角输入端,用来接收电流环调节器的输出相位控制信号,同步六脉冲发生器输出相位是作用在六个晶闸管上的六脉冲向量形式。

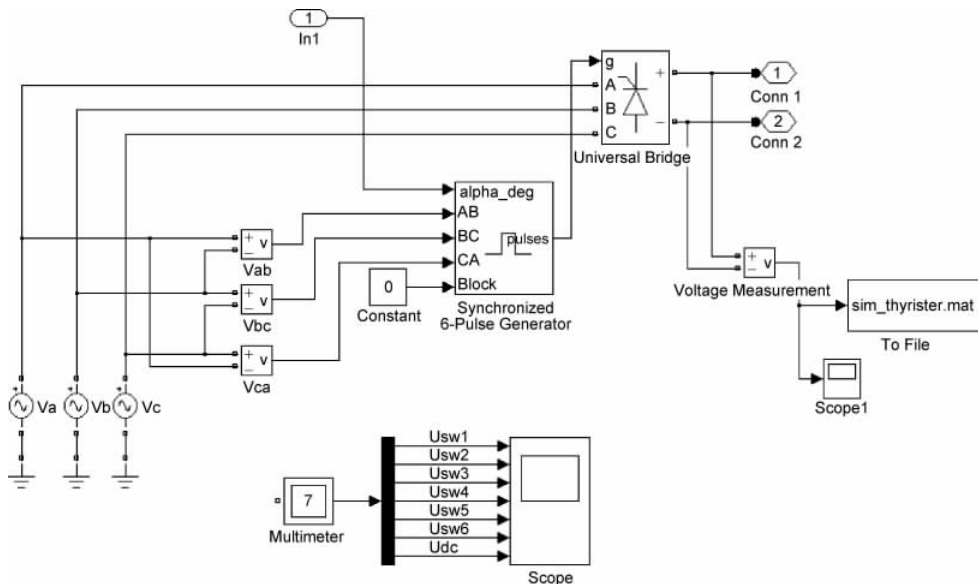


图 3-10 晶闸管触发和整流装置图

为方便调试,我们采用多路测量电压表对各晶闸管两端电压及整流后的输出电压通过示波器进行观察。

④ 直流电动机

本实验采用他励式励磁电动机,电动机模块如图 3-11 所示,该电动机的端子 F+ 与 F- 分别接励磁电压源的正负极,A+ 与 A- 接输入电压,TL 为电机负载输入,m 端为输出端,电动机参数设置如图 3-12 所示。

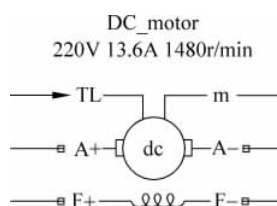


图 3-11 电动机模型

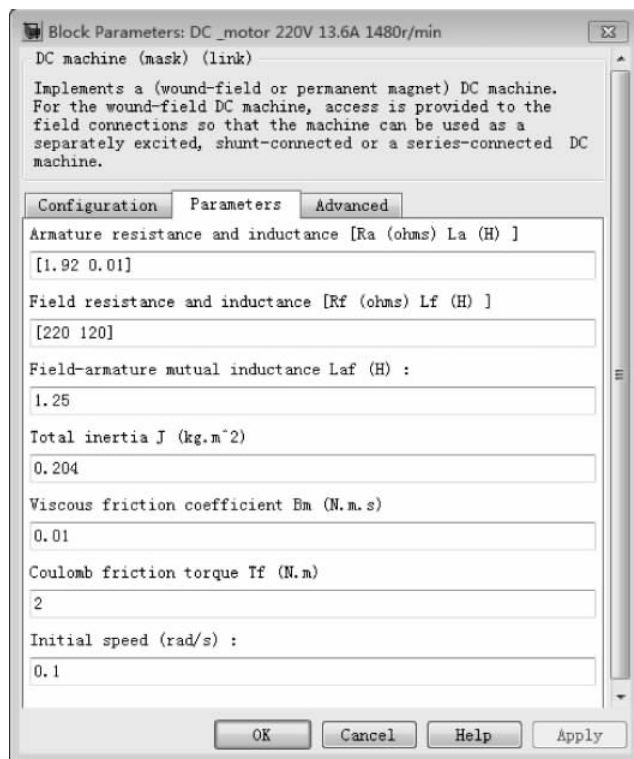


图 3-12 电动机参数设置

⑤ 反馈滤波环节的滞后对消

在实际工程中,为保证电流/电压反馈信号的质量,均采用“一阶惯性滤波器”(如图 3-6 中 current feedback 与 speed feedback 环节),为对消其产生的时间滞后,在前向通道上增加了 Transfer Fcn1 与 Transfer Fcn2,以保证信号传输时间上的一致性。

(2) 系统仿真实验

① 开环系统性能分析

实验中,选择 ode23tb 或 ode23t 解算方法,并将系统 powergui 模块中

Simulation type 设置为 Continuous, 选取 Start time=0.0, Stop time=6.0, 仿真时间从 0s 到 6s, 晶闸管触发角初始为 0° , 1.6s 时变为 45° , 3s 时变为 60° 。

仿真模型如图 3-13 所示。

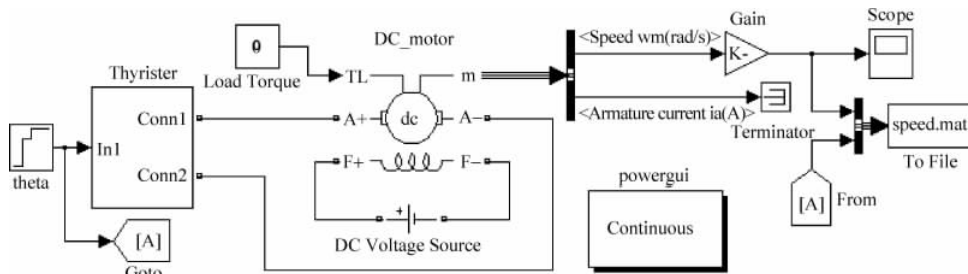


图 3-13 晶闸管-直流电动机开环系统仿真模型

图 3-14 为晶闸管触发角给定和电动机转速动态特性仿真结果,通过仿真分析,我们可以看到电动机转速随晶闸管触发角的改变而变化的情况。

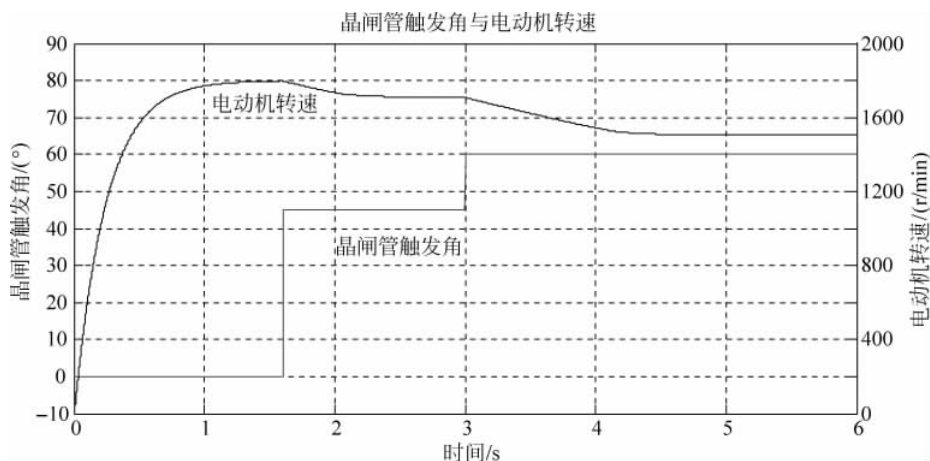


图 3-14 系统开环特性

上述仿真实验结果/实验曲线程序如下:

```

程序 1
clf
% 数据读取
load speed.mat
t = signals(1,:);
y1 = signals(2,:);
y2 = signals(3,:);
% 绘制曲线
[AX,H1,H2] = plotyy(t,y1,t,y2);

```

```

% 坐标范围设置
set(Ax(1), 'xlim', [0,6], 'xTick', 0:1:6);
set(Ax(2), 'xlim', [0,6], 'xTick', 0:1:6);
set(Ax(1), 'ylim', [-10,90], 'yTick', -10:10:90);
set(Ax(2), 'ylim', [0,2000], 'yTick', 0:400:2000);
% 坐标轴颜色设置
set(Ax(1), 'XColor', 'k', 'YColor', 'k');
set(Ax(2), 'XColor', 'k', 'YColor', 'k');
% 曲线颜色设置
set(H1, 'color', 'b');
set(H2, 'color', 'k');
% 绘制网格
grid on;
% 标注设置
set(get(Ax(1), 'Xlabel'), 'string', '时间(s)');
set(get(Ax(1), 'Ylabel'), 'string', '晶闸管触发角(°)');
set(get(Ax(2), 'Ylabel'), 'string', '电动机转速(r/min)');
title('晶闸管触发角与电动机转速');
gtext('晶闸管触发角');
gtext('电动机转速');

```

② 双闭环系统起动特性分析

实验中,选择 ode23tb 或 ode23t 解算方法,并将系统 Powergui 模块中 Simulation type 设置为 Discrete,采样周期设置为 5e-006s,最大仿真步长设置为 5e-006s,选取 Start time=0.0,Stop time=3.0,仿真时间从 0s 到 3s。

图 3-15、图 3-16、图 3-17 分别为 ASR 的输出与电动机转速动态特性仿真结果(其中图(b)为图(a)在 0s 附近的放大图)、ACR 的输出与电动机转速动态特性仿真结果以及电动机电流与电动机转速动态特性仿真结果。

上述仿真实验结果/实验曲线程序参考前述的程序 1。

通过仿真结果分析,我们可以看到,对于系统起动性能指标来说,起动过程中电流的超调量为 5.7%,转速的超调量为 0.2%;这一结果与理论设计结果相近(或优于理论结果:电流超调量为 4.3%,转速超调量为 8.3%),达到预期设计目的。

③ 双闭环系统抗扰性能分析

实验中,我们选取 Start time=0.0,Stop time=5.0,仿真时间从 0s 到 5.0s。扰动加入的时间均为 3.0s。

一般情况下,双闭环调速系统的干扰主要是负载突变与电网电压波动两种。图 3-18 绘出了该系统电动机转速在突加负载($\Delta T=8\text{N}\cdot\text{m}$)情况下电动机电流 I_d 与输出转速 n 的关系;图 3-19、图 3-20 分别绘出了电网电压突减($\Delta U=100\text{V}$)和电网电压突增($\Delta U=100\text{V}$)情况下晶闸管触发整流装置输出电压 U_{d0} 、电动机两端电压 U_d ,与输出转速 n 的关系。