

# 电能变换原理与系统

## 实验四：

### 他励直流电动机双闭环调速系统仿真

2017010928 屈晨迪 自 71

## 1 实验目标

- (1) 掌握本课程讲述的直流电动机双闭环调速系统的工程设计方法；
- (2) 熟悉仿真软件Matlab/Simulink的基本使用方法及其在电机控制系统中的应用；
- (3) 附加：讨论负载特性对系统控制性能的影响，对比系统对不同转速指令信号的跟踪特性

## 2 实验内容

- (1) 直流电动机双闭环调速系统的电流调节器与转速调节器的设计；
- (2) 基于Matlab/Simulink搭建直流电动机双闭环调速系统的仿真模型；
- (3) 观测并分析直流电动机双闭环调速系统正常工况下的运行特性；
- (4) 附加：对比不同负载情况对双闭环调速系统控制性能的影响；
- (5) 附加：对比双闭环调速系统对不同转速指令跟踪性能的差别，分析可能的原因，并对系统进行改进

## 3 必做任务

(1) 仿照教材例题4.5-2，根据指标要求设计双闭环系统的调节器，并给出各个控制器设计选型的理由

首先设计电流环。确定时间参数，电流环小时间参数 $T_{\Sigma i} = T_s + T_{oi} = 0 + 0.002 = 0.002s$ ，电枢回路时间常数 $T_l = L/R = \frac{0.015}{0.5} = 0.03s$ 。根据时间常数确定电流调节器的结构和参数，在结构的选择上，有①稳态要求：希望电流环稳态无静差，获得理想堵转特性；②跟随要求：希望跟随给定电流，超调量越小越好，本题中要 $\sigma_i \leq 5\%$ ；③抗扰性能：减小电压 $U_{d0}$ 和反电势  $E$  变化对电流环输出的影响，又有 $T_l \gg T_{\Sigma i}$ ，因此选择将电流环校正为典型

1 型系统；调节器传递函数为 $K_i \frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}$ ，取 $\tau_i = T_l = 0.03s$ 消去大惯性环节时间常数，为满足

$\sigma_i \leq 5\%$ ，取 $K_{op,i} T_{\Sigma i} = 0.5$ ，因此有 $K_{op,i} = \frac{0.5}{0.002} = 250s^{-1}$ ，ACR 的比例放大系数 $K_i = \frac{K_{op,i} \tau_i R}{K_s \beta} =$

$\frac{250 \times 0.03 \times 0.5}{0.05 \times 40} = 1.875$ 。检验近似条件，晶闸管整流装置传递函数近似条件 $\omega_{ci} \leq 1/3T_s$ ，有 $\omega_{ci} =$

$K_{op,i} = 250s^{-1}$ ， $T_s = 0$ ，成立；电流环小时间常数近似条件 $\omega_{ci} \leq \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{T_s T_{oi}}}$ ，成立；忽略反电

势对电流环影响的条件 $\omega_{ci} \geq 3\sqrt{\frac{1}{T_m T_l}}$ , 有 $C_e = \frac{U_N - I_N R_a}{n_N} = 0.132Vmin/r$ ,  $C_m = 30C_e/\pi$ , 所以

$$T_m = \frac{GD^2 R}{375 C_e C_m} = \frac{27.5 \times 0.5 \times \pi}{375 \times C_e C_m} = 0.22s, \quad 3\sqrt{\frac{1}{T_m T_l}} = 36.9 < \omega_{ci}, \quad \text{成立。}$$

下面设计转速环。确定时间常数, 电流环等效时间常数 $2T_{\Sigma i} = 0.004s$ , 转速环小时间常数 $T_{\Sigma n} = 2T_{\Sigma i} + T_{on} = 0.004 + 0.01 = 0.014s$ 。确定转速调节器的结构和参数, 因为本系统要求无静差, 因此要含有积分环节, 来消除负载的扰动, 又考虑到动态性能的要求, 需要比例环节, 因此设计为 PI 控制器, 按典型 II 型系统设计转速环, 转速调节器的传递函数为

$$\frac{K_n(\tau_n s + 1)}{\tau_n s}, \quad \text{取中频宽 } h = 6, \quad \text{按照 } \gamma_{\max} \text{ 准则确定参数, ASR 的超前时间常数为 } \tau_n = hT_{\Sigma n} =$$

$$6 \times 0.014 = 0.084s, \quad \text{转速环开环放大系数 } K_{op,n} = \frac{1}{h\sqrt{h}T_{\Sigma n}^2} = \frac{1}{6\sqrt{6} \times 0.014^2} = 347.15s^{-2}, \quad \text{ASR 调}$$

$$\text{节器的比例放大系数 } K_n = \frac{\beta C_e T_m}{\sqrt{h} \alpha R T_{\Sigma n}} = \frac{0.05 \times 0.132 \times 0.22}{\sqrt{6} \times 0.007 \times 0.5 \times 0.014} = 12.10. \quad \text{检验近似条件和性能指标,}$$

$$\text{电流环传递函数等效条件 } \omega_{cn} \leq \frac{1}{5T_{\Sigma i}}, \quad \text{其中 } \omega_{cn} = K_{op,n} \tau_n = 347.15 \times 0.084 = 29.16s^{-1}, \quad \text{而}$$

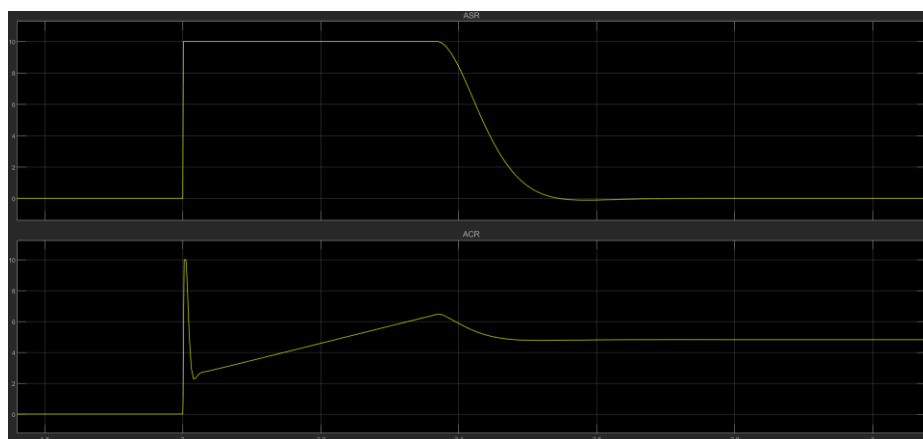
$$\frac{1}{5T_{\Sigma i}} = 100 > 29.16, \quad \text{成立; 转速环小时间常数近似条件 } \omega_{cn} \leq \frac{1}{3} \sqrt{\frac{1}{2T_{\Sigma i} T_{on}}} = 52.7, \quad \text{成立。}$$

设计参数如下表 ( $GD^2 = 27.5, h = 6, T_s = 0$ )

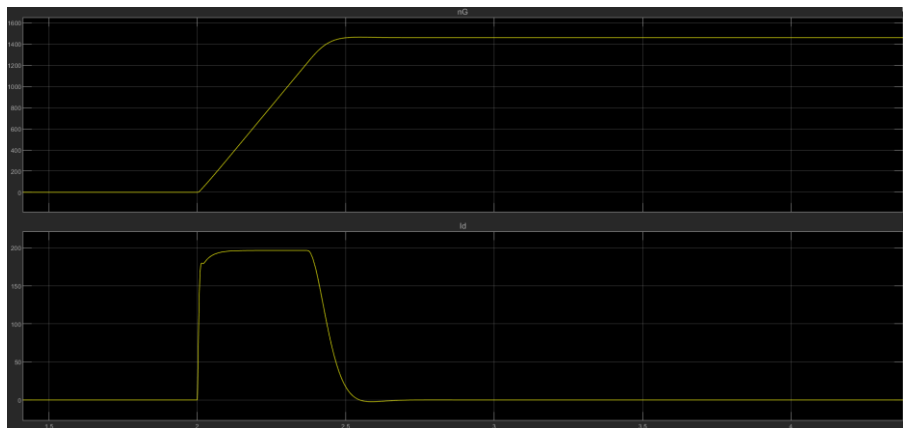
电流环参数			转速环参数	
$K_i$	$\tau_i$	$T_l$	$K_n$	$\tau_n$
1.875	0.03	0.03	12.1	0.084

(2) 基于已设计的调节器参数建立直流双闭环调速系统的Matlab仿真模型, 在额定转速给定情况下起动并运行, 记录转速、电流、以及调节器ASR、ACR输出的波形, 并分析从起动到稳态运行过程中上述变量的变化情况所对应的物理过程(说明: 存在两个动态阶段, 一个是空载启动阶段, 另一个是负载扰动后的动态恢复过程)

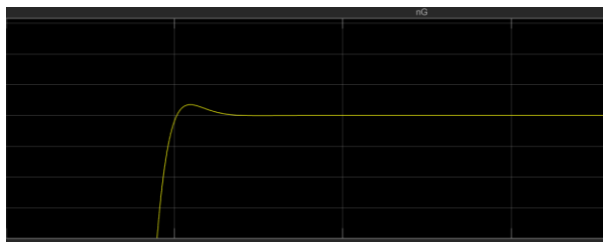
#### • 空载启动阶段



(a) 上: ASR 输出波形 下: ACR 输出波形



(b) 上：转速 下：电流

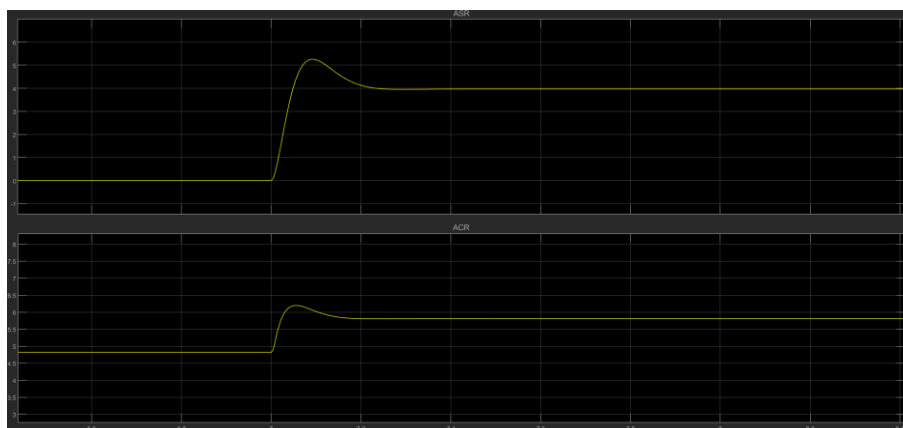


(c) 放大观察转速超调

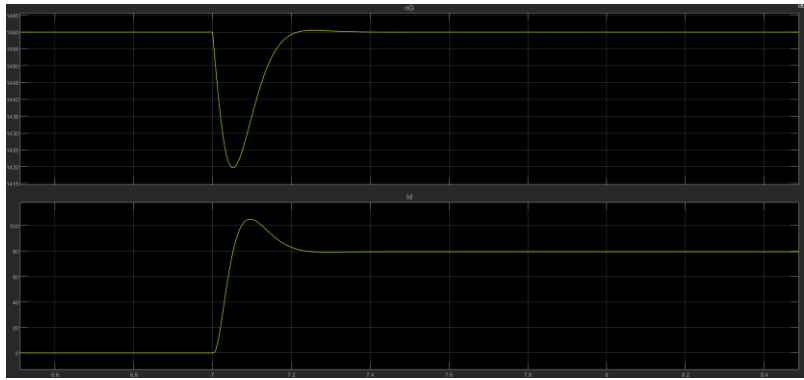
图 1

空载启动过程可分为三个阶段。首先是电流上升阶段，2 秒时突加给定电压 $U_n^*$ ，一开始转速为 0，ASR 立刻达到饱和值 10V，ACR 输出也达到饱和，随即电枢电流 $I_d$ 迅速增加，使 ACR 退出饱和，呈现波形中的尖峰，由于机电惯性，转速增加较慢；之后是转速恒速提升的阶段，此时由于转速未到指定电压，ASR 输入极性不变，输出维持在饱和值，ACR 输出线性增加，调节电流保持恒定， $I_d$ 略低于 $I_{dm}$ ，电动机加速度恒定，转速线性增长；第三是转速调节阶段，转速与给定电压平衡后，由于积分作用还在加速，产生图(c)所示的超调，此时 ASR 输入极性反转，输出下降退出饱和状态，电流也随之下降，但 $I_d$ 仍然大于负载 $I_{dl}$ ，电机还在加速，当 $I_d = I_{dl}$ 时，电机加速度为 0，转速到达最大值，这时 ASR 的输出还在减小，电流也随之减小，出现小于 $I_{dl}$ 的情况，并在 ASR 和 ACR 的调节下恢复稳定。

#### • 负载扰动恢复



(d) 上：ASR 输出波形 下：ACR 输出波形

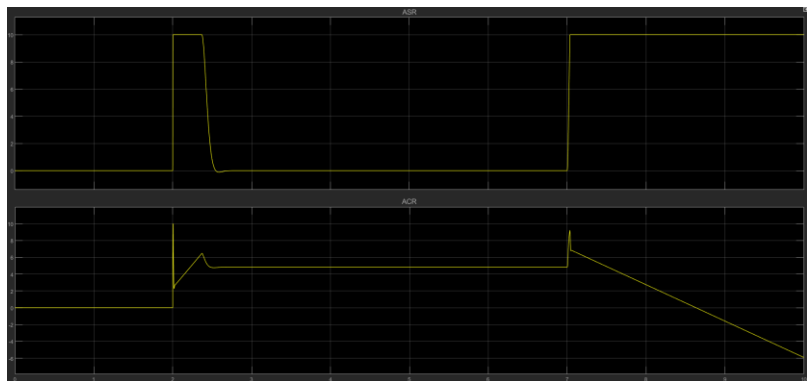


(e) 上：转速 下：电流

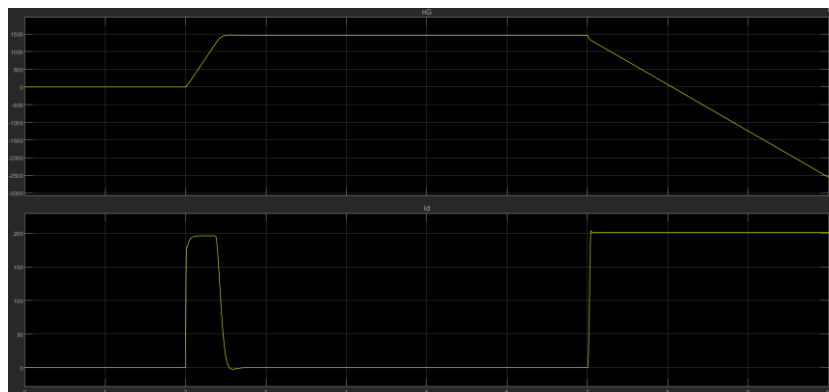
图 2

当负载突然增加时， $I_d < I_{dl}$ ，转速下降，低于给定电压 $U_n^*$ ，ASR 输入为正，输出开始增加， $I_d$ 随之增加，ACR 的输入变为正，输出也开始增加；当 $I_d$ 变大至与 $I_{dl}$ 相等时，转速停止减小，ACR 输出停止增大， $I_d$ 持续增大，转速开始恢复直至升回到给定值，随着转速的增加，ASR 的输出也开始减小， $I_d$ 也随之减小，但仍大于 $I_{dl}$ ，因此转速继续上升，最终系统各量稳定在平衡位置。

(3) 将负载由轻载改为重载（Step\_TL阶跃后的数值从100改为350），在额定转速下起动并运行，记录转速、电流以及调节器ASR、ACR输出的波形，分析从起动到稳态运行过程中上述变量的变化情况所对应的物理过程，对比2和3中加载后转速恢复的时间，分析造成差别的原因。



(a) 上：ASR 输出波形 下：ACR 输出波形

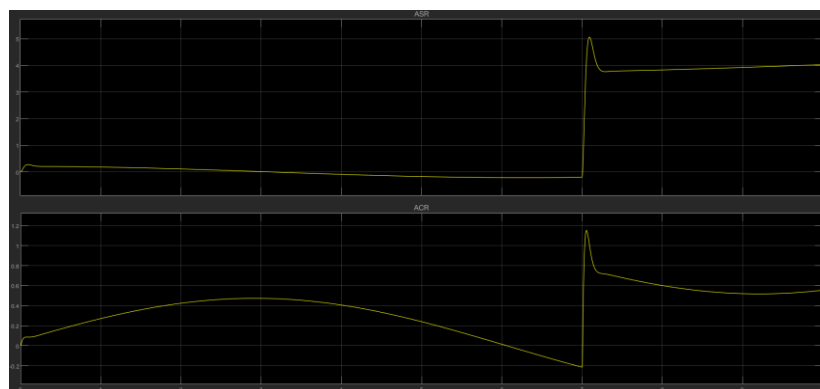


(b) 上：转速 下：电流

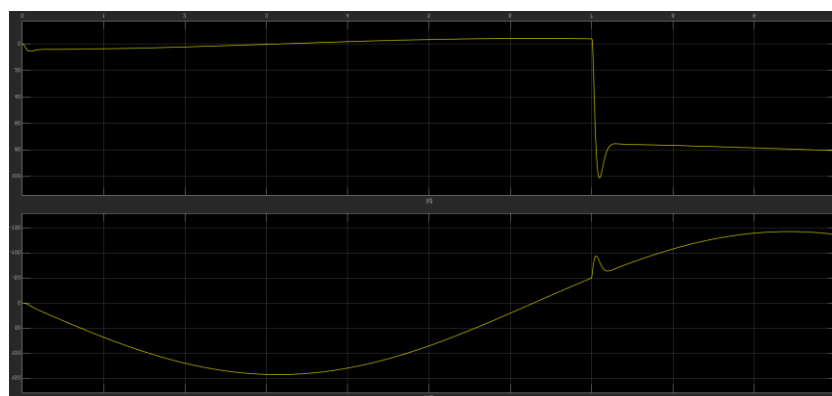
图 3

改变负载扰动，可以看到在空载启动部分与（2）相同，当突加重负载时，转速下降，ASR 输出上升， $U_i^*$  上升， $I_d$  随之上升，然而当  $I_d$  上升达到饱和值时，仍然无法与  $I_{dl}$  相等，即系统无法带动重负载，ASR 输出和  $I_d$  稳定在最大值，转速持续线性下降，出现反转现象，ACR 的输出也线性下降。改变此种情况的方法是提高饱和值，使最大电流值大于负载  $I_{dl}$ 。

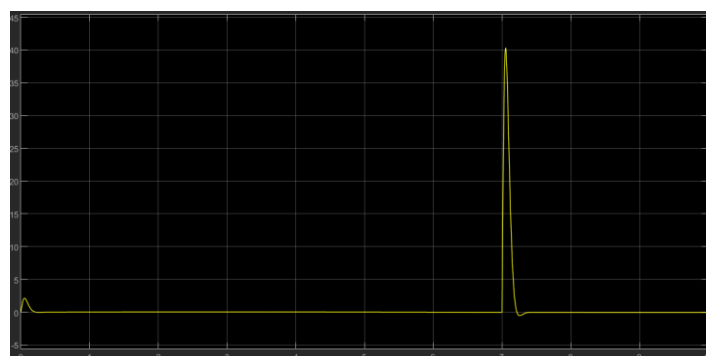
（4）将负载恢复为轻载（Step\_TL 阶跃后的数值改回100），保持已设计好的调节器不变，将转速给定信号改为幅值为1，频率为0.5rad/s的正弦信号（如图4.3），起动并运行，记录转速、电流、调节器ASR、ACR输出的波形，以及转速指令与实际转速的误差波形，并分析上述变量的变化情况所对应的物理过程



(a) 上：ASR 输出波形 下：ACR 输出波形



(b) 上：转速 下：电流



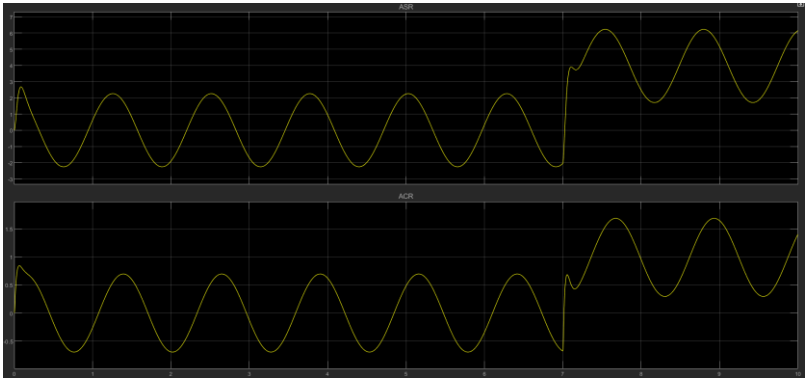
(c) 误差（指令\*143 与实际转速做差）

图 4

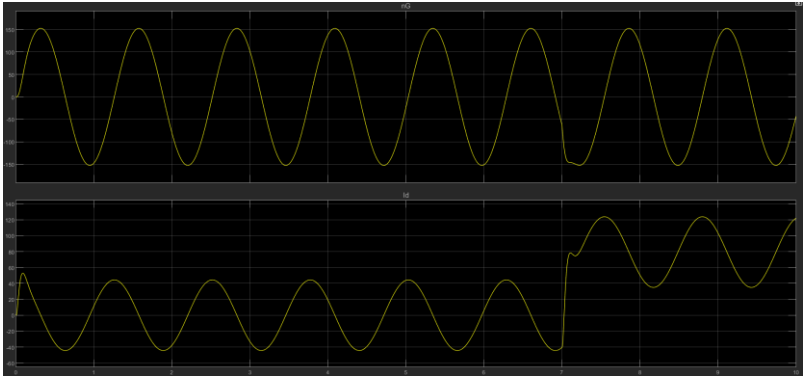
给定信号为低频正弦波，此时不同于阶跃信号，输入电压缓慢增加。可以看到在启动时，ASR 输出随着给定信号缓慢增加， $I_d$  随之增加，转速提升，转速能很快追上给定电压值，因

此 ASR 不会达到饱和，而是增加到一个较小值就开始缓慢下降， $I_d$  也会减小；当正弦波进入下降段时，ASR 输出和  $I_d$  达到 0，并开始负方向增加；而 ACR 的输出也是先上升，后当  $I_d$  降为 0 时开始下降。负载突变的过程与（2）中阶跃较为类似，不过叠加了正弦的基波。将速度指令乘以转速极大值 143，再与转速做差，得到误差波形，可以看到系统对低速变化的指令的跟随性能很好，除了刚启动和负载突变处，其余基本无误差。

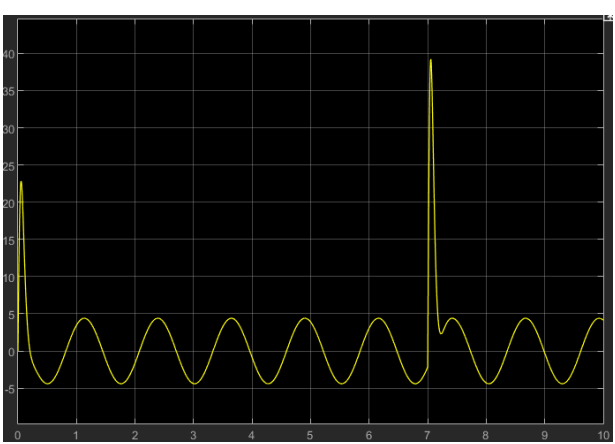
（5）保持已设计好的调节器不变，将转速给定信号改为幅值为1，频率为5rad/s的正弦信号（如图4.4），起动并运行，记录转速、电流以及调节器ASR、ACR输出的波形，以及转速指令与实际转速的误差波形，分析上述变量的变化情况所对应的物理过程，对比调节器对高频和低频正弦信号的跟踪性能，并分析造成差别的原因。



(a) 上：ASR 输出波形 下：ACR 输出波形



(b) 上：转速 下：电流



(c) 指令\*150 与实际转速做差

图 5

施加较高频率的正弦波信号，空载启动过程中各个波形的变化与低频时基本相同，但是

#### 4 选做任务

### • 方法一

The diagram illustrates a closed-loop control system for a motor. The input is a sine wave. The forward path consists of a transfer function block  $\frac{\text{num}(s)}{\text{den}(s)}$  labeled 'filter1', followed by a 'WASR' block (labeled 'Ref1' and 'feedback1'), and then another transfer function block  $\frac{\text{num}(s)}{\text{den}(s)}$  labeled 'filter2'. The feedback path starts from the output of 'filter2', goes through a summing junction (labeled 'Ref1' and 'feedback1'), and then through a 'WACR' block. The output of 'WACR' is subtracted from the input at the summing junction. The output of the system is labeled 'current'. A red box highlights a derivative block  $\frac{du}{dt}$  in the feedback path, which is multiplied by  $-K$  before being subtracted from the input.

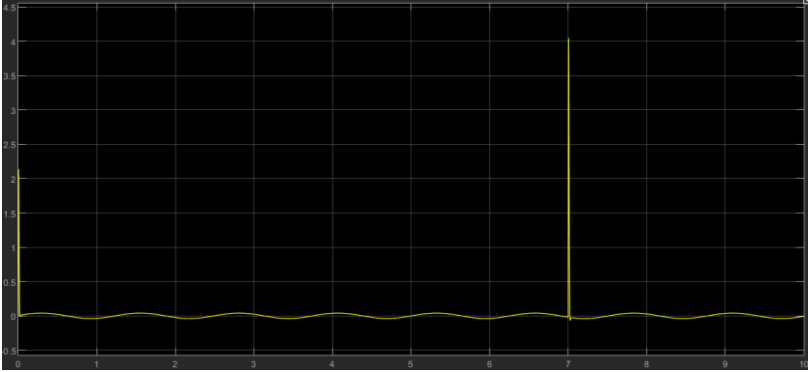
The graph displays a function  $f(x)$  on a coordinate plane. The horizontal axis (x-axis) is labeled from -10 to 10 with major grid lines every 2 units. The vertical axis (y-axis) is labeled from -5 to 45 with major grid lines every 5 units. The function  $f(x)$  is represented by a blue line that remains at  $y=0$  for all  $x$  except at  $x=7$ . At  $x=7$ , the function has a sharp vertical spike that reaches a maximum value of 41 on the y-axis. This spike is characteristic of a Dirac delta function scaled by 41.

图 6

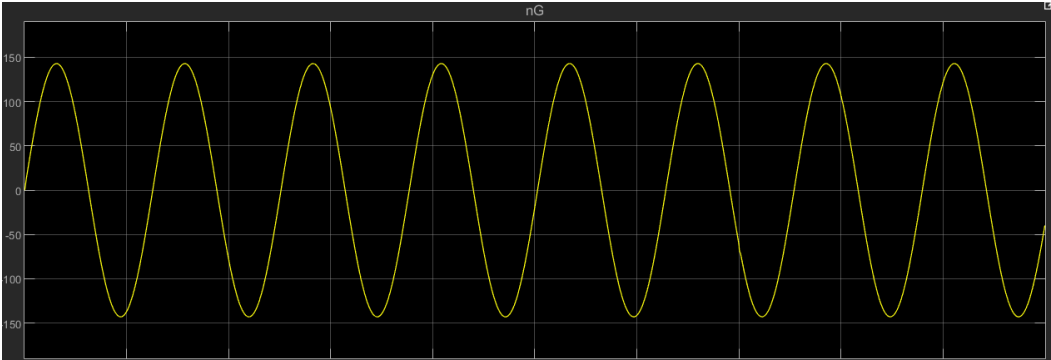
可以看到改善后误差显著减小，尤其是刚启动的一个阶段内，跟随性能有较明显的提高。

• 方法二

要提高快速响应能力，增加带宽，联想到减小系统时间常数  $T$ ，将  $T_{on}$  和  $T_{oi}$  缩小至原来的  $1/10$  倍，相应其他参数也做对应的修改， $K_i, K_n$  放大 10 倍， $\tau_n$  缩小 10 倍，最终误差波形如下，可以看到误差有较为明显的减小，观察转速波形，基本看不到扰动。



(a) 误差（指令\*143 与实际转速做差）



(b) 转速波形

图 7