

车用电机原理及控制技术

实验报告

项目名称： 车用永磁同步电机矢量控制仿真分析

专业班级： 车辆工程 19-5 班

学 号： 2019214782

姓 名： 孔令鸣

指导教师： 江 尚

教学单位： 汽车与交通工程学院

车用永磁同步电机矢量控制仿真分析

学号：2019214782

姓名：孔令鸣

班级：车辆工程 19-5 班

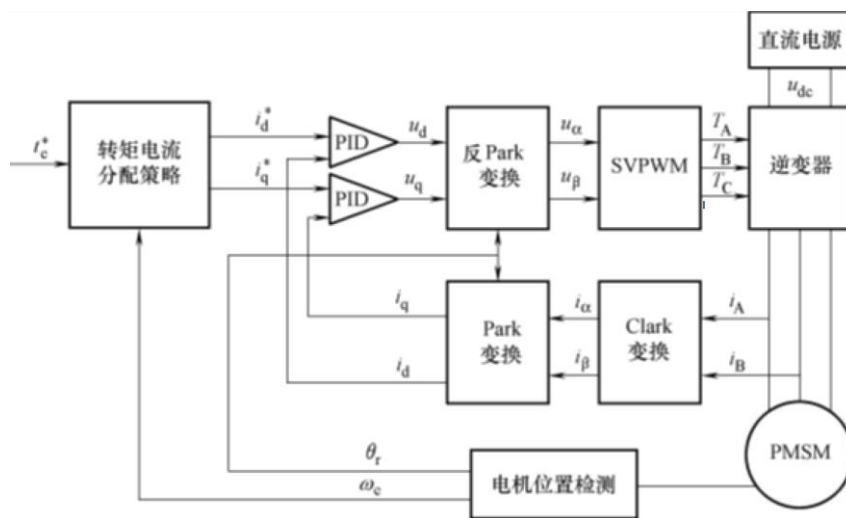
一、实验目的

本实验依据车辆工程本科教学大纲、《车用电机原理及控制技术》教学大纲进行，是车辆工程专业重要的实验教学环节。通过该实验，使学生加深对永磁同步电机 **PMWM** 的空间矢量和磁场定向控制知识的理解，为今后所从事的车辆工程领域的工作打下一定基础。

- 1) 掌握车用永磁同步电机矢量控制的理论、应用的基本知识
- 2) 强化和重视交流（电）量的分析和理解能力，重视物理概念，加强 Simulink 仿真应用能力
- 3) 掌握空间矢量脉宽调制技术，了解电机在固定转速下基速区、弱磁区的转矩、电流、电压等性能变化
- 4) 掌握车用永磁同步电机矢量控制仿真分析流程及数据处理方法

二、实验方法

电机控制系统框图的基本结构如下图所示。整个框图体系为矢量控制，将《车用电机原理及控制技术》所讲述的内容与《控制工程基础》等课程结合起来，实现了对现实问题的仿真分析，其中包含 **PMWM** 与转矩电流分配策略（第 5 章），**PID** 控制（控制工程基础），**Clark** 变换与 **Park** 变换（第 4 章），反 **Park** 变换与 **SVPWM** 电压调制（第 7 章）等内容。



转矩矢量方程式表明，在 dq 轴系内通过控制 i_s 的幅值和相位，就可控制电磁转矩。PMSM 磁场定向矢量控制的步骤如下：

- 1) 根据电机的目标转矩，由转矩调节器的输出结合电流分配策略可得到交轴电流给定值 i_q^* 和直轴电流给定值 i_d^*
- 2) 对电机三相定子绕组实际电流进行采样，并通过坐标变换，得到实际的直轴和交轴电流 (i_d 、 i_q)
- 3) 基于直轴和交轴电流目标值与实际值，进行电流闭环反馈调节，得到定子绕组设定电压 (u_d 、 u_q)
- 4) 利用坐标变换，根据电压目标值得到静止坐标系下的电压设定 (u_α 、 u_β)
- 5) 根据静止坐标系下的电压设定，经由 SVPWM 电压调制控制逆变器中功率开关器件的通断 (T_a 、 T_b 、 T_c)，实现对相电流的控制

基于电机控制系统框图的基本结构，使用 MATLAB/Simulink 建立数学模型，对车用永磁同步电机矢量控制进行仿真分析研究。

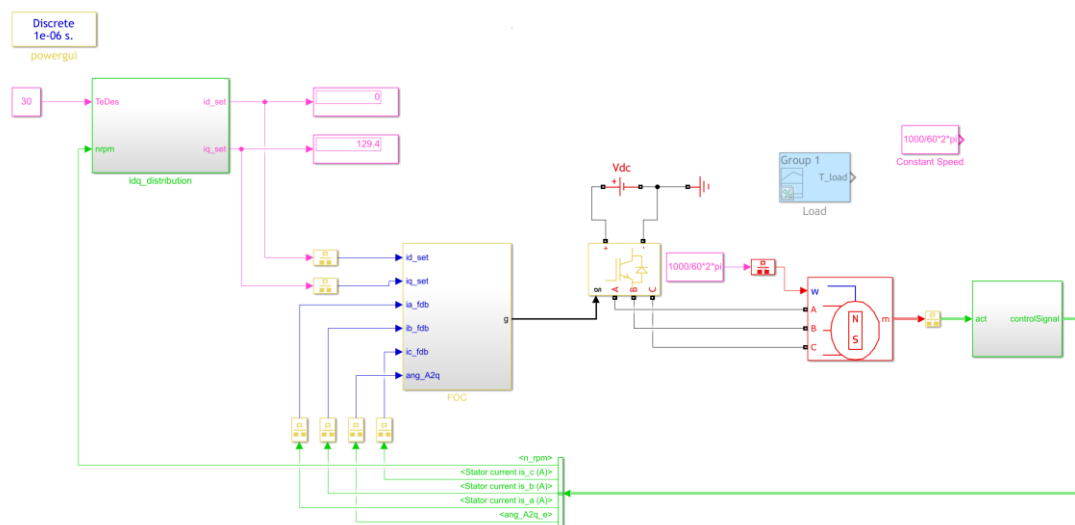
三、 程序说明(Matlab/Simulink)

1. 电机参数设置

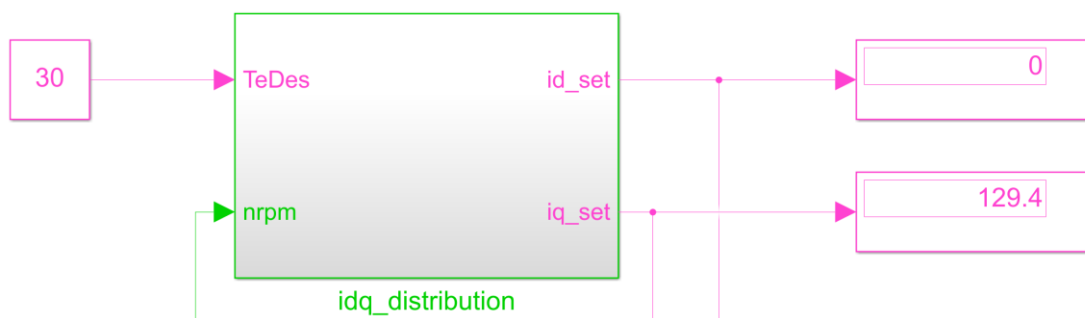
对所使用的车用永磁同步电机进行参数上的设置，以供 Simulink 仿真分析使用。其中 echo on 为打开命令回显。

```
Parameters.m
1  %*****电机参数*****%
2  echo on
3  clc,clear;
4  Vdc = 336; % V
5  Rs=0.01496;% % Oms
6  Lm=0.000402; % H
7  Ld = Lm;
8  Lq = Lm*2;
9  Pn=3; % pole pairs
10 Fluxf= 0.0515;
11 Jm = 1.36e-1; %kg*m^2 电机转动惯量
12 F = 0;
13 w0 = 100;
14
15 IsMax = 300;
```

2. 整体 Simulink 模型

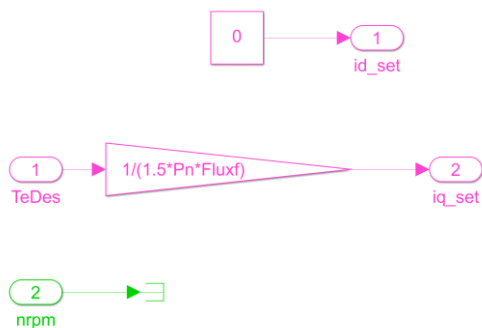


3. 交直流电流给定值

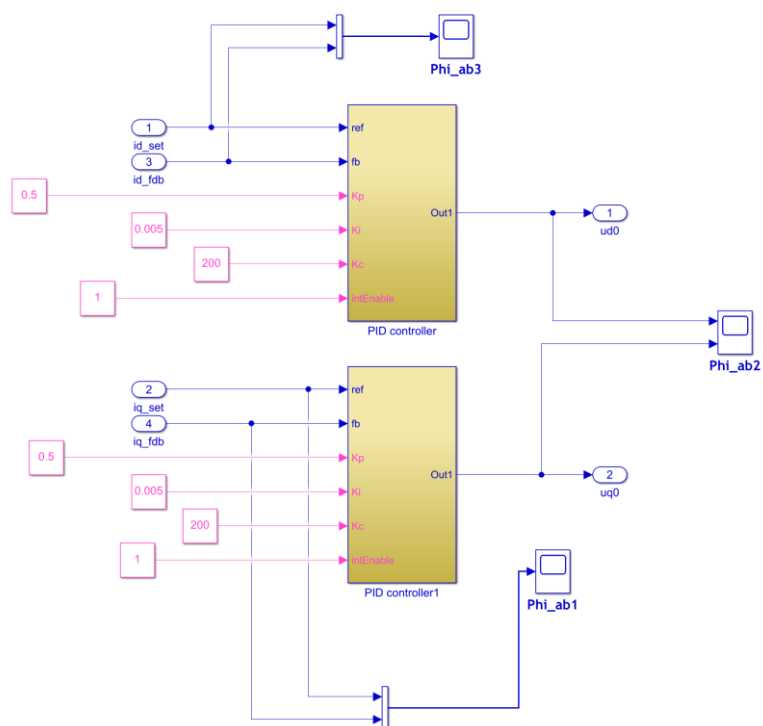


根据电机的目标转矩，由转矩调节器的输出结合电流分配策略可得到交轴电流给定值 i_q^* 和直轴电流给定值 i_d^* 。

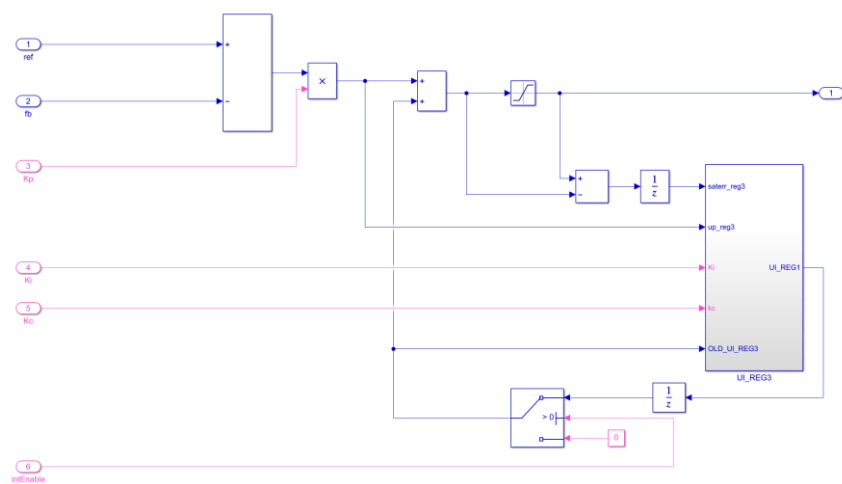
内部运算逻辑为



4.2 PI 控制模块



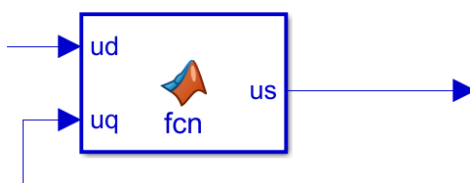
PID 控制器为



$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r (L_d i_d + \psi_f)$$

4.3 电压极限



```

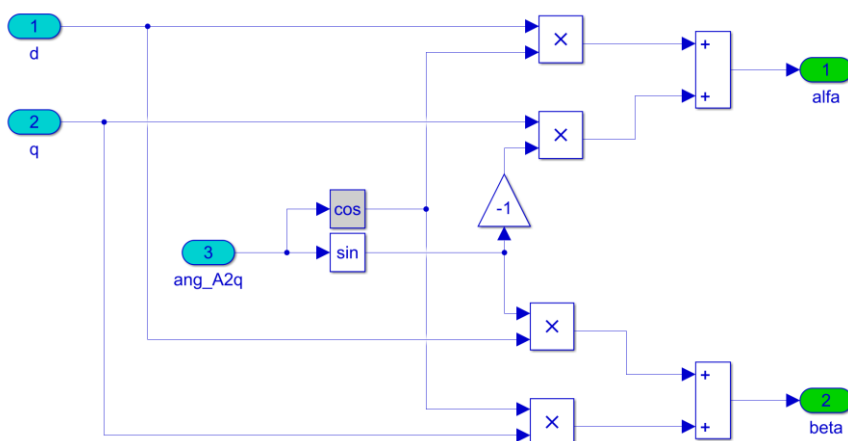
1  function us = fcn(ud, uq)
2
3  us = sqrt(ud^2 + uq^2);
    
```

$$|u_s| = \sqrt{u_q^2 + u_d^2}$$

当电动机在高速运行时，电阻压降占比较小可忽略不计，即

$$|u_s|^2 = (\omega_r \psi_f + \omega_r L_d i_d)^2 + (\omega_r L_q i_q)^2$$

4.4 反 Park 变换



$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(a) & \cos(a) \\ -\cos(a) & \sin(a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix}$$

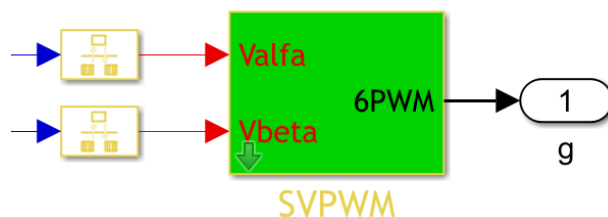
where 'a' stands for 'alfa', 'b' for 'beta'.

a = ang_A2q, angle of stator axis A to d axis.

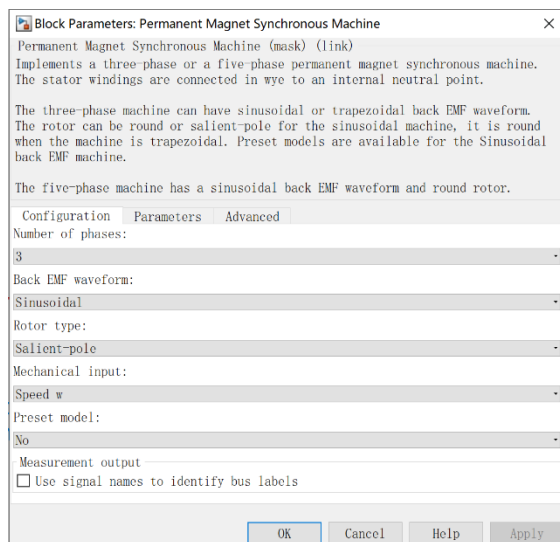
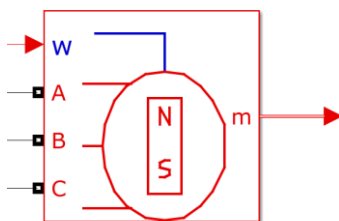
此处模型下方公式解释存在错误，正确的换算关系应该为

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_D & -\sin \theta_D \\ \sin \theta_D & \cos \theta_D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_D \\ i_Q \end{pmatrix}$$

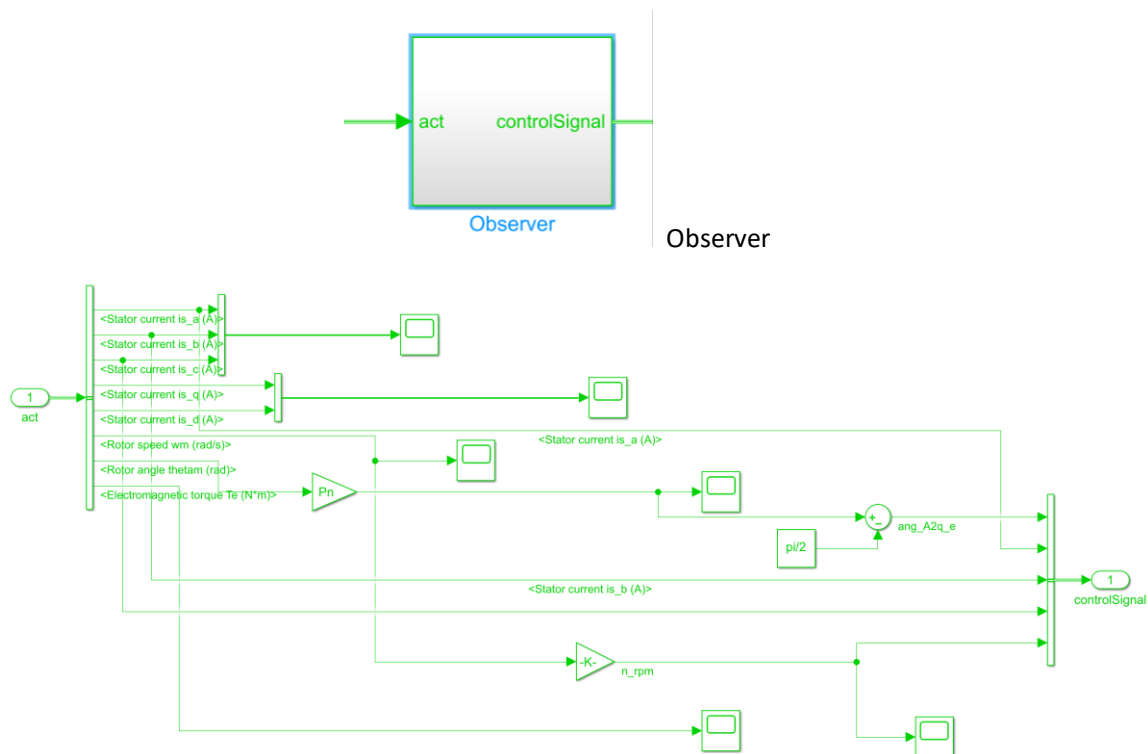
4.5 SVPWM 电压调制



5. 电机模块



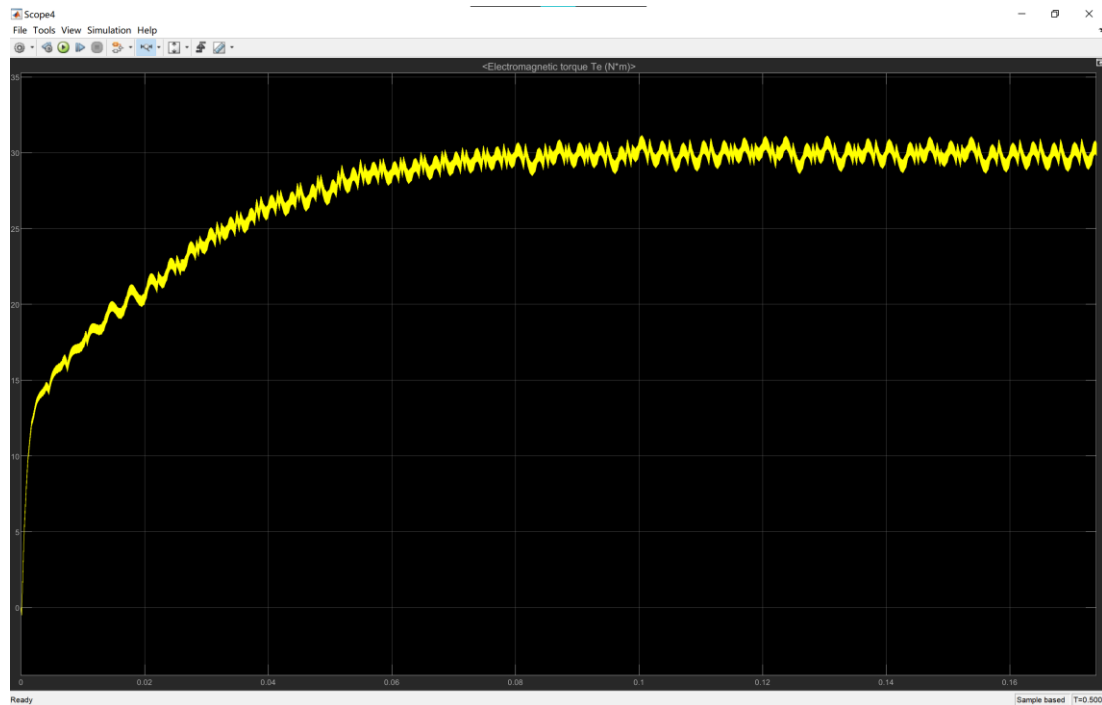
6. 观察者



四、 测试结果

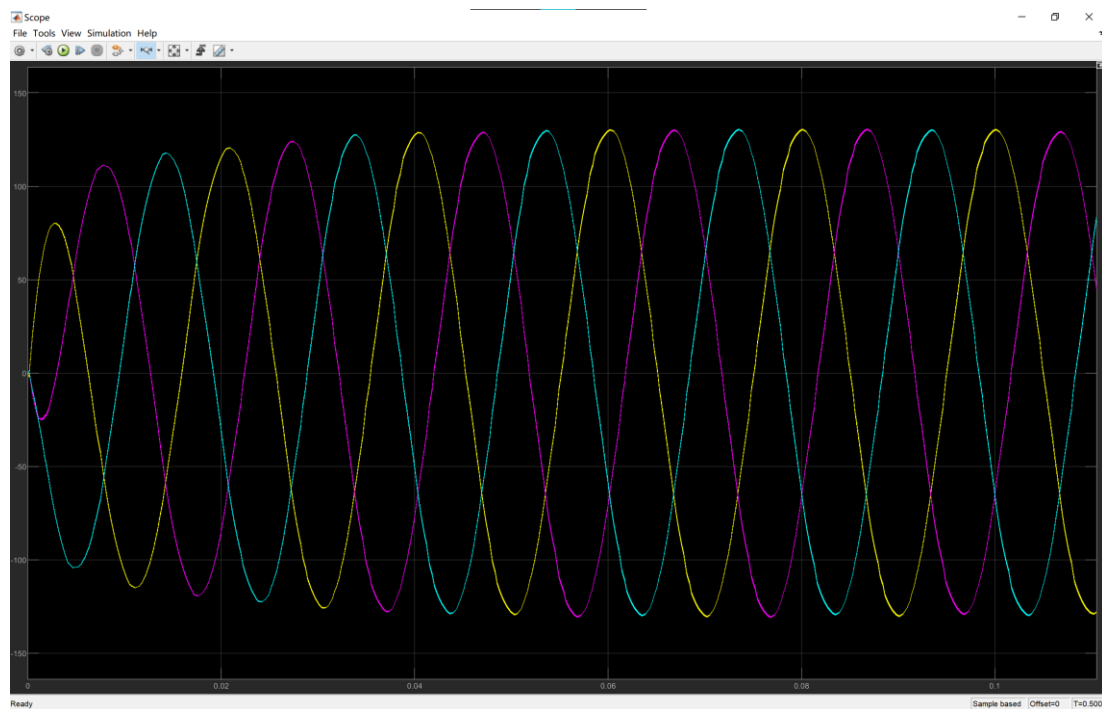
1) 基速下的转矩、电流、电压等结果（固定转速）：

a) 转矩曲线

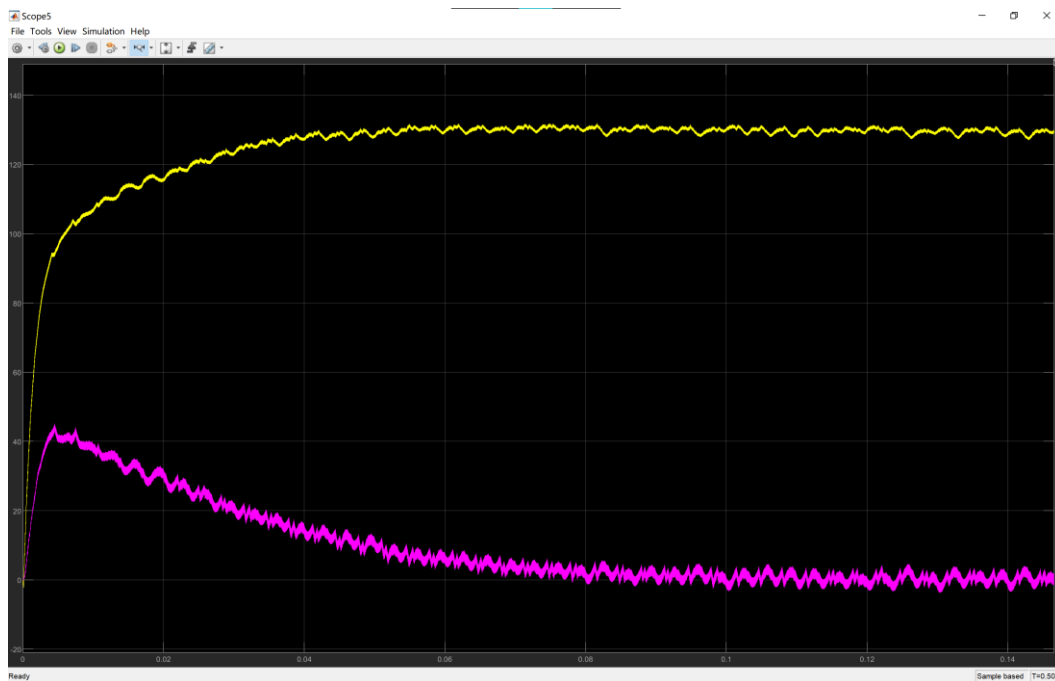


b) 电流曲线

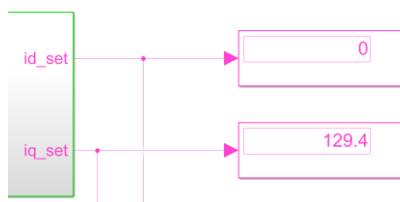
ABC 电流曲线



DQ 电流曲线

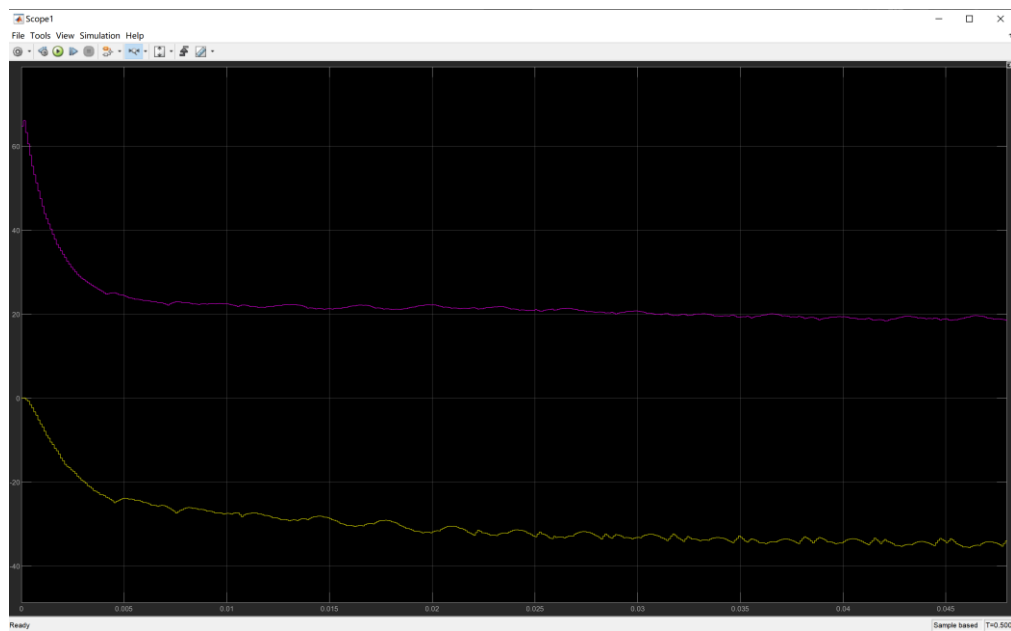


DQ 电流设定值

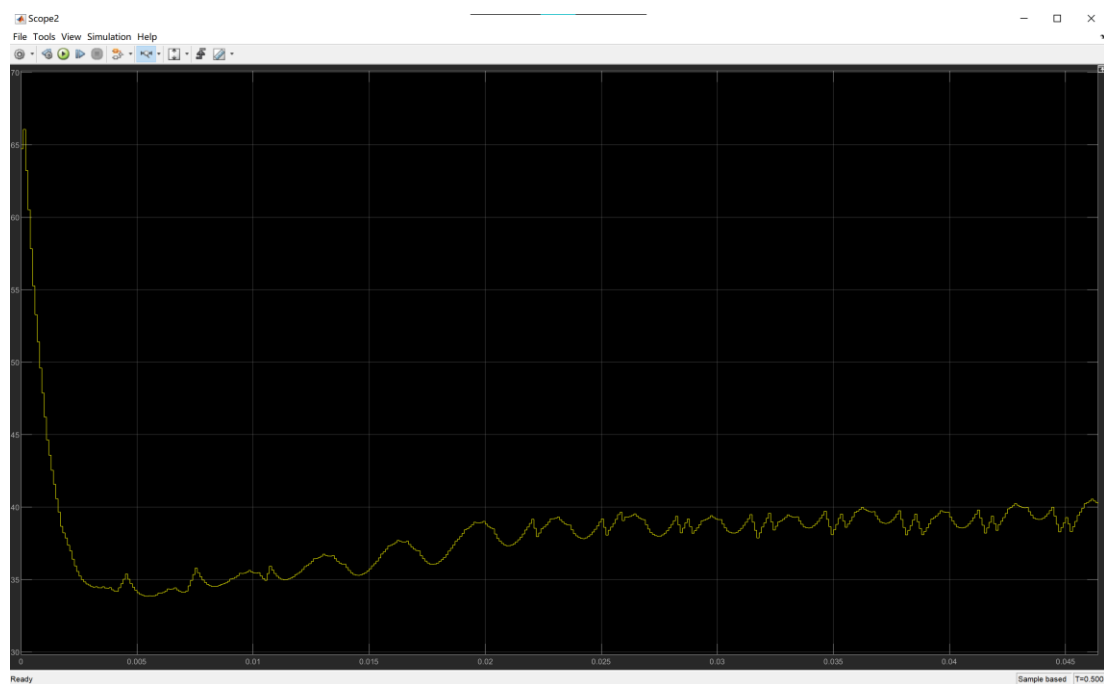


c) 电压曲线

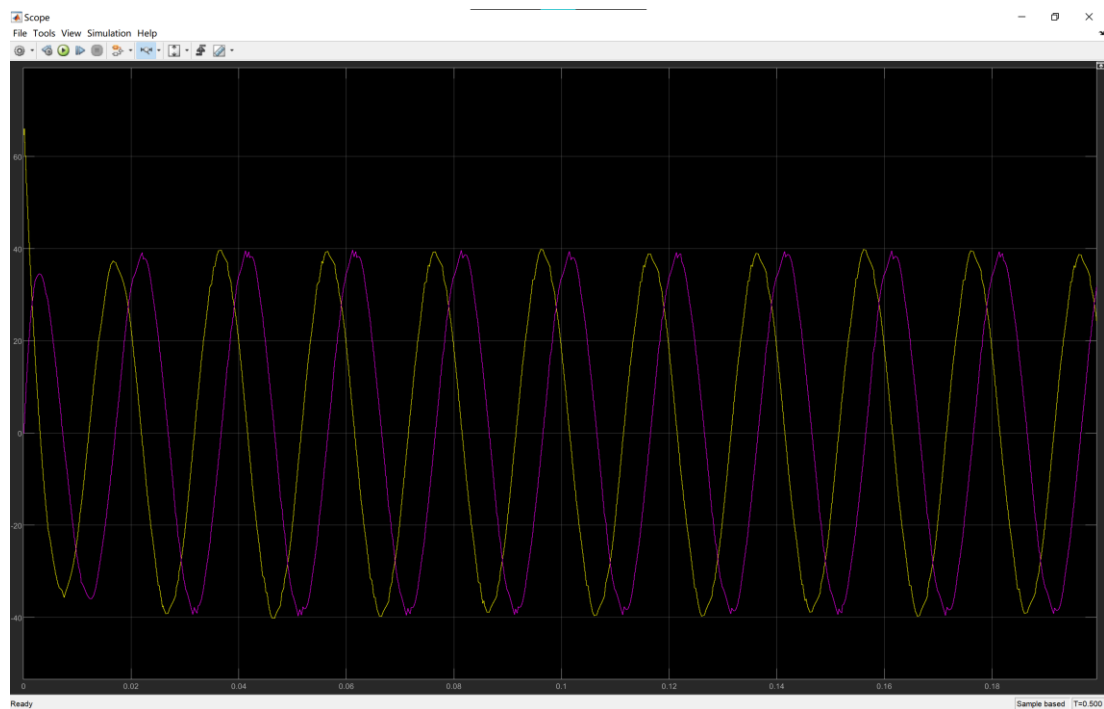
Ud 与 Uq 电压曲线



Us 电压曲线

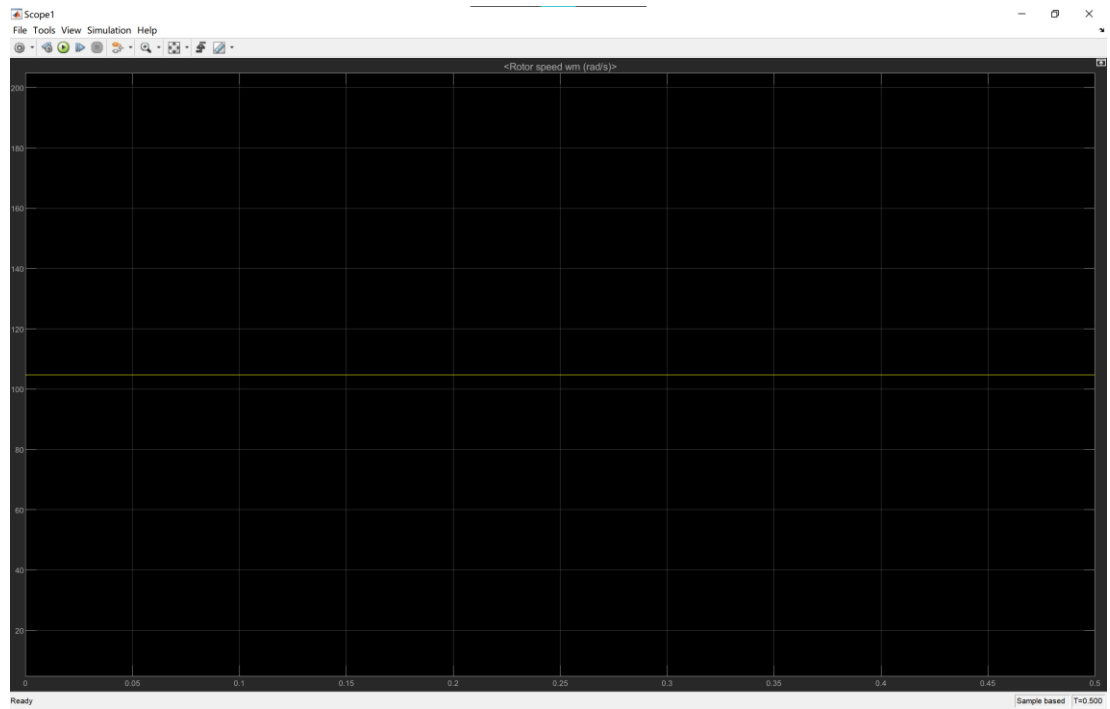


静止坐标系下的电压设定 (u_α 、 u_β)

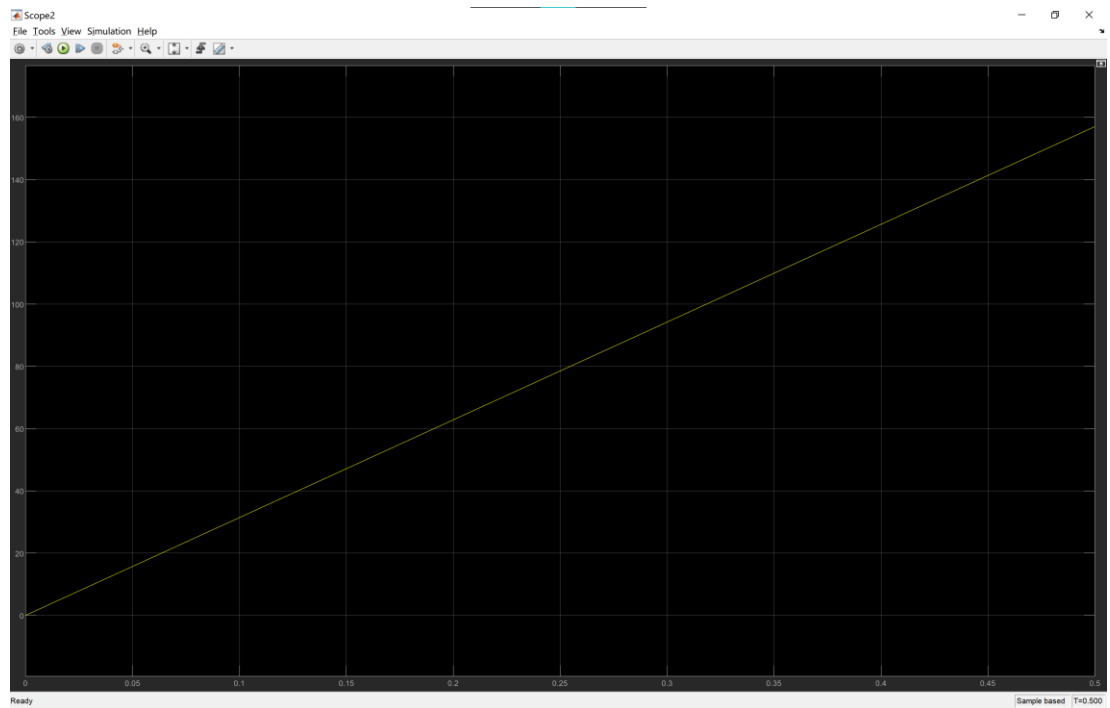


d) 其他曲线

转子转速



转子电角度



2) 弱磁区的转矩、电流、电压等结果（固定转速）：

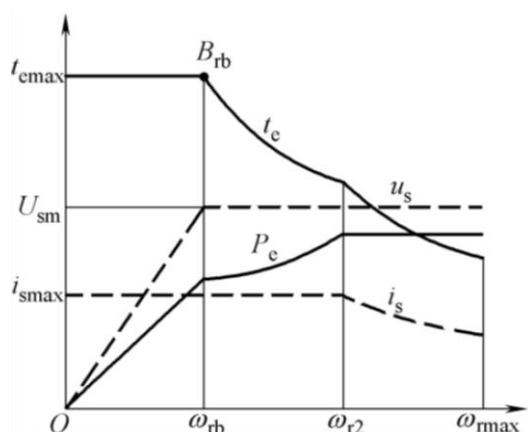


图5-16 恒转矩与恒功率运行(外特性) 曲线

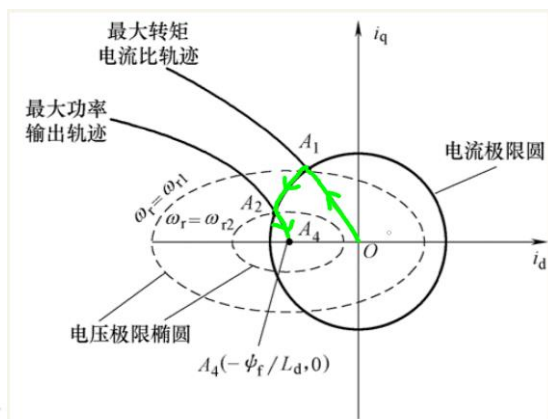
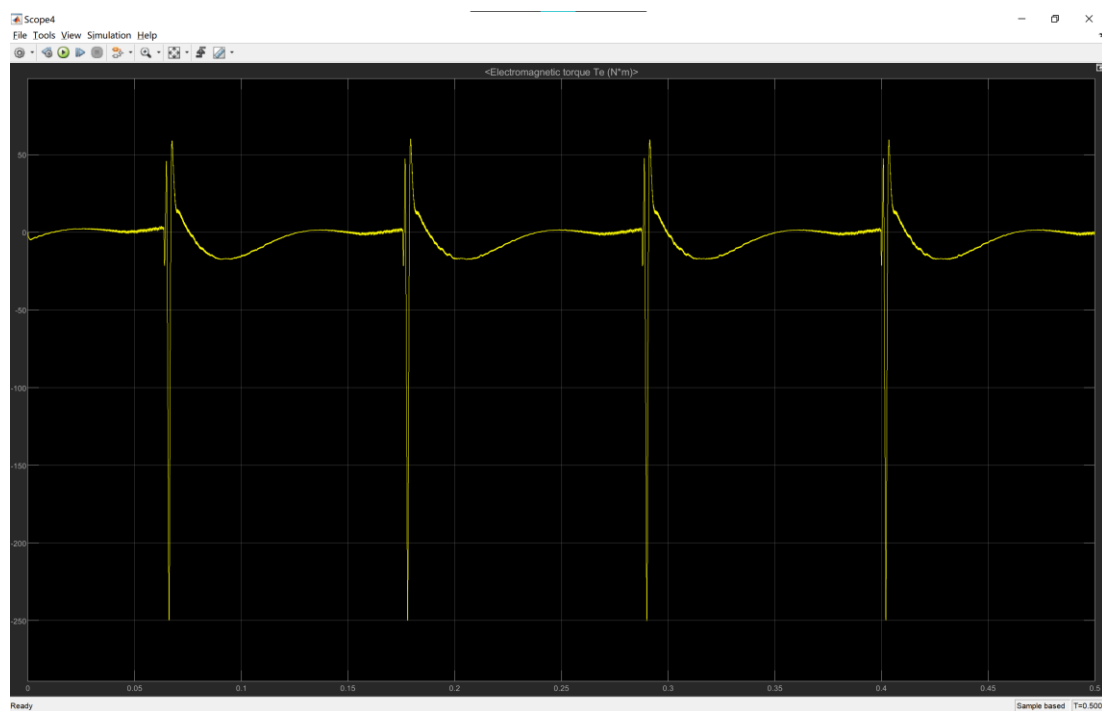


图5-17 弱磁控制与定子电流最优控制

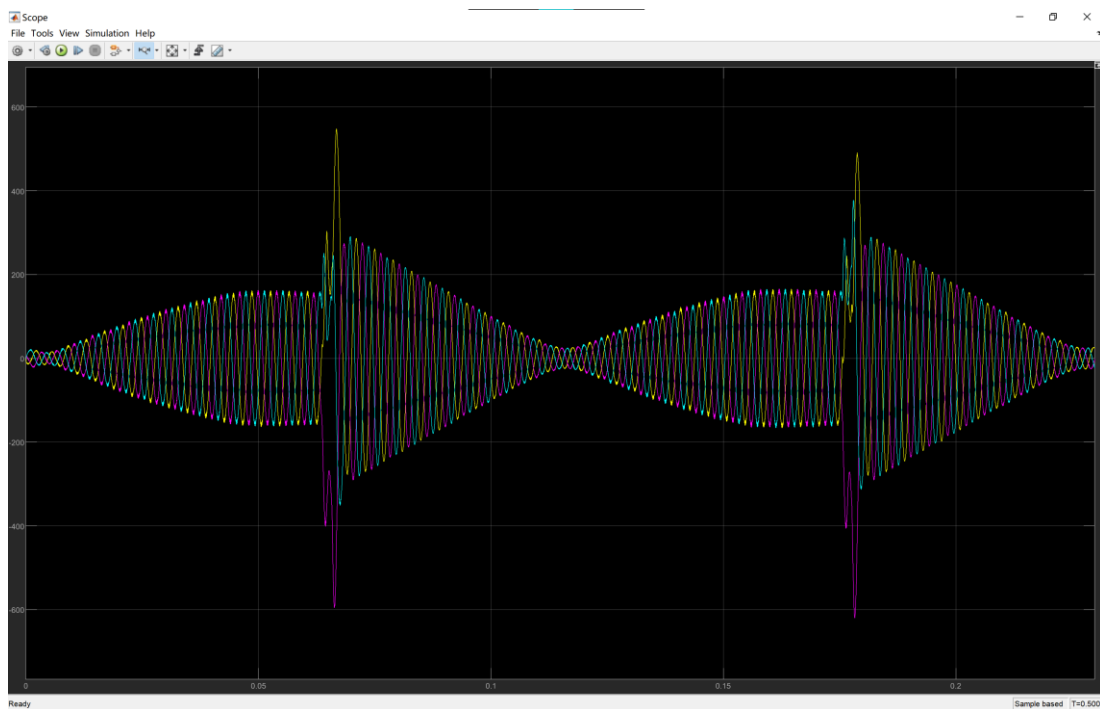
将电机的转速由 $1000/60 \times 2\pi$ 逐渐调高至 $5000/60 \times 2\pi$ ，电机从基速区进入弱磁区。

a) 转矩曲线

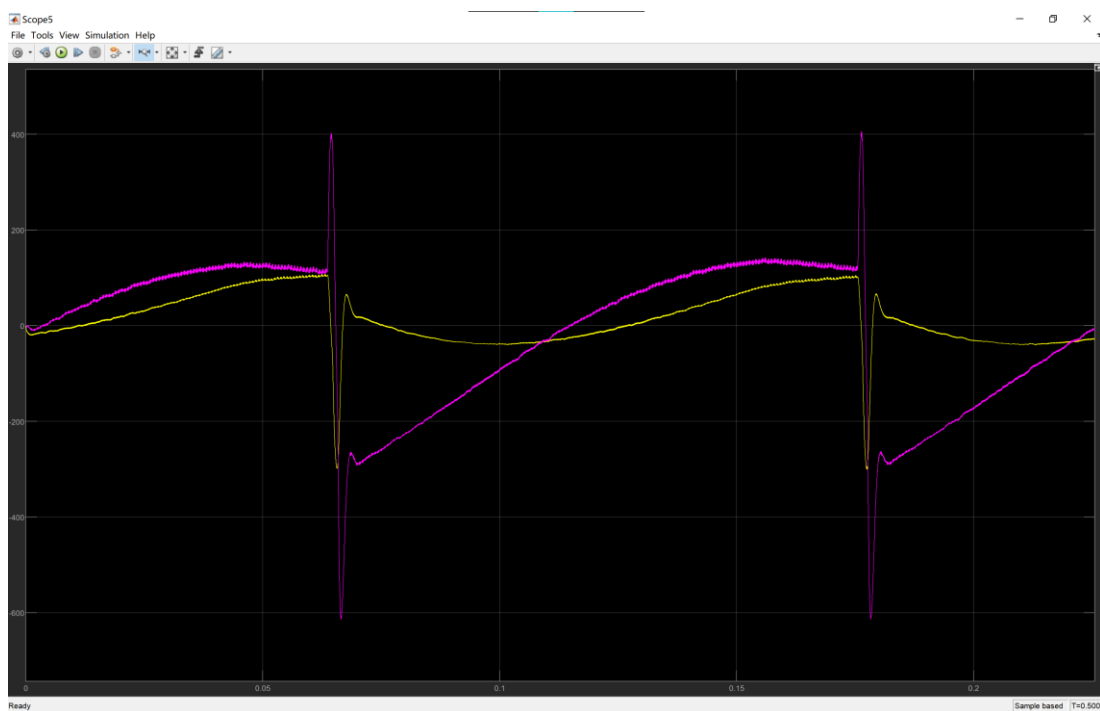


b) 电流曲线

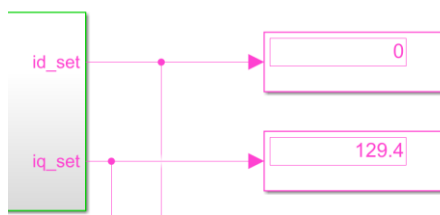
ABC 电流曲线



DQ 电流曲线

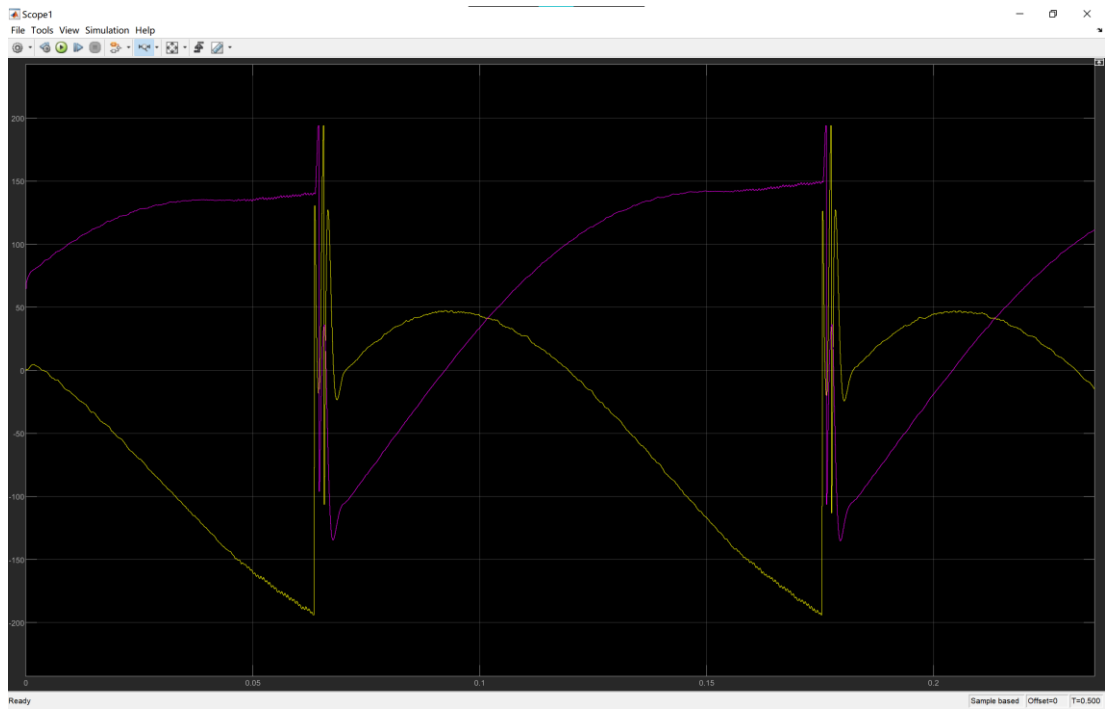


DQ 电流设定值

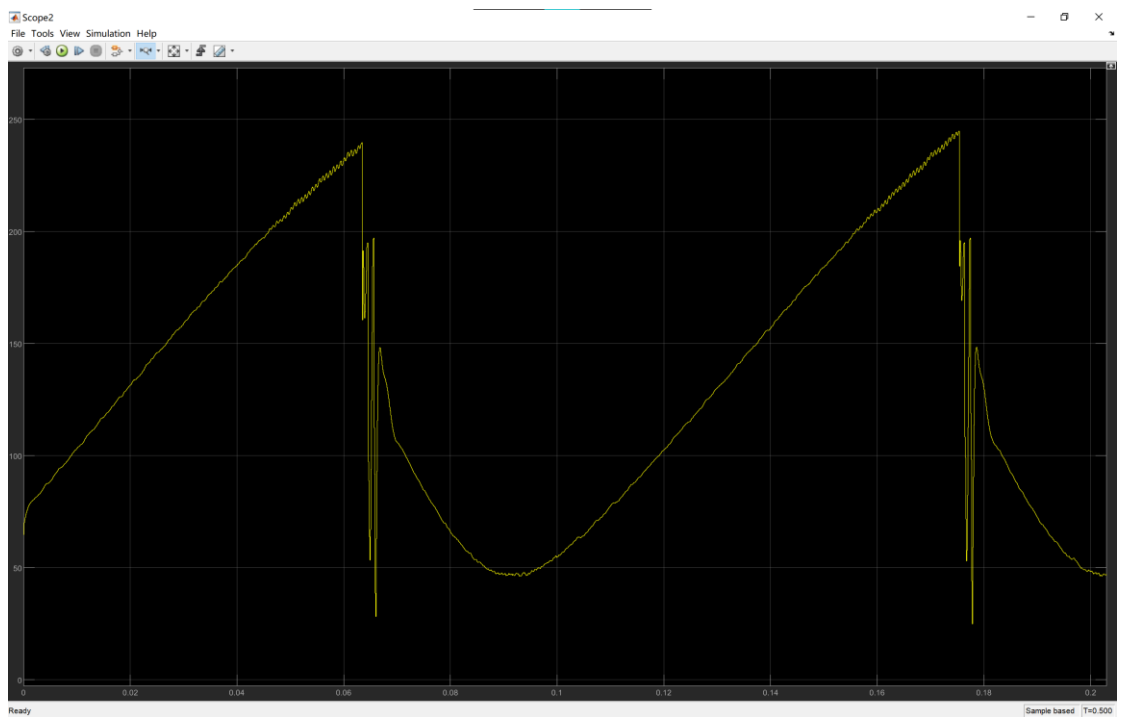


c) 电压曲线

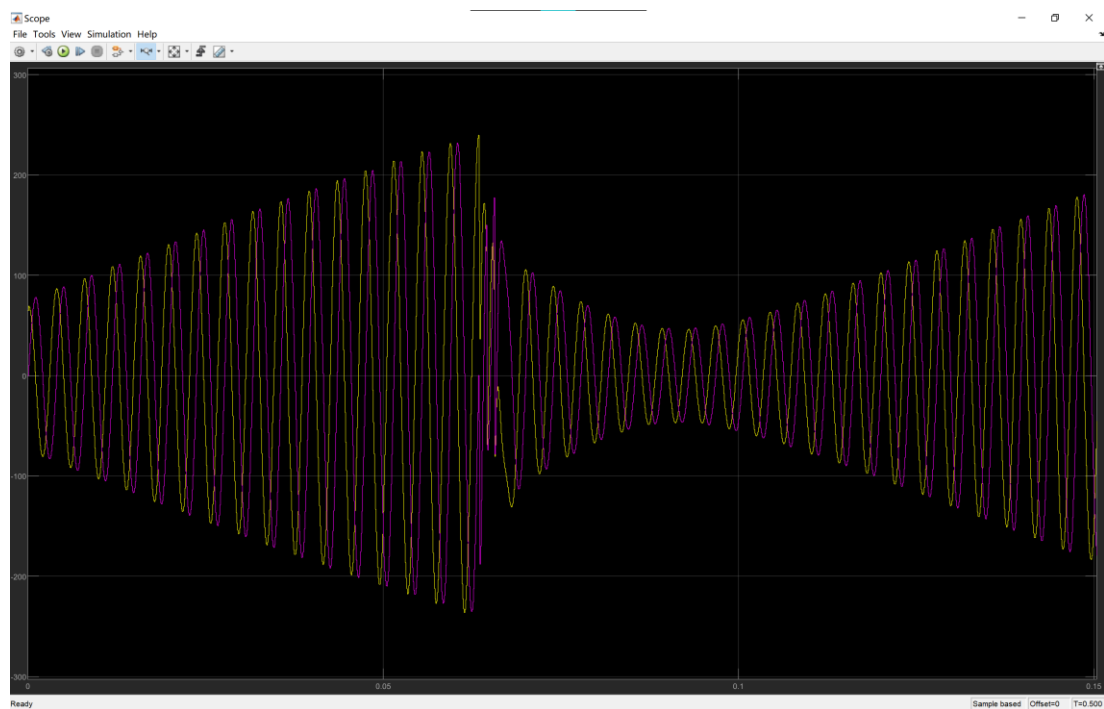
Ud 与 Uq 电压曲线



Us 电压曲线

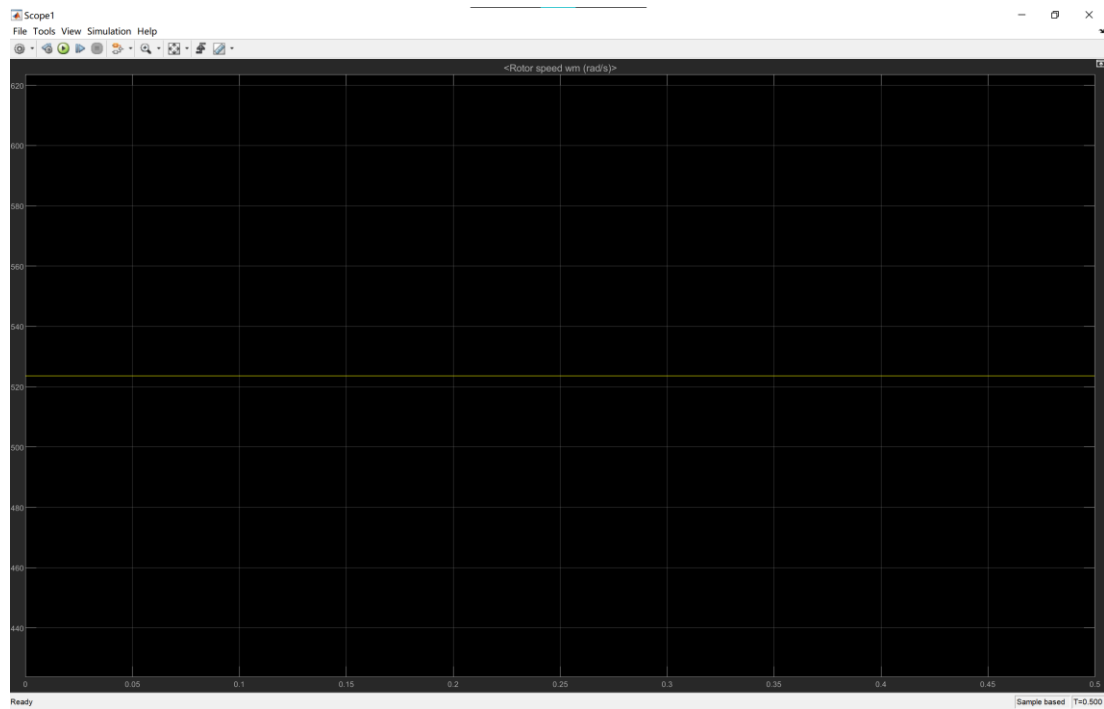


静止坐标系下的电压设定 (u_α 、 u_β)

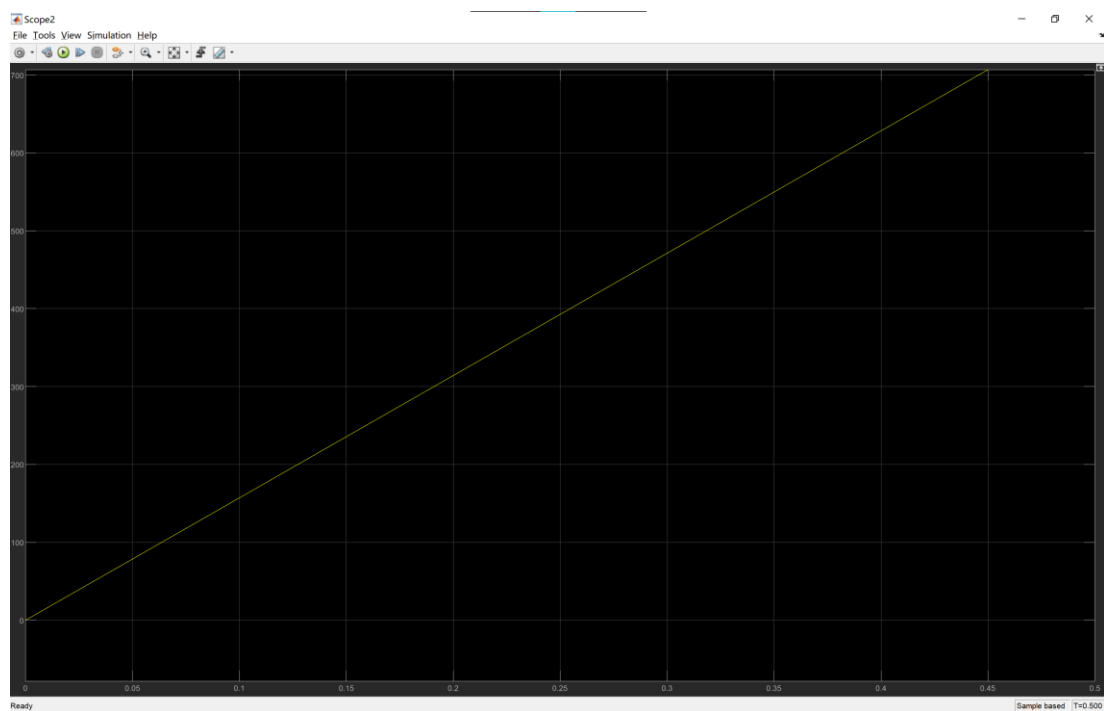


d) 其他曲线

转子转速



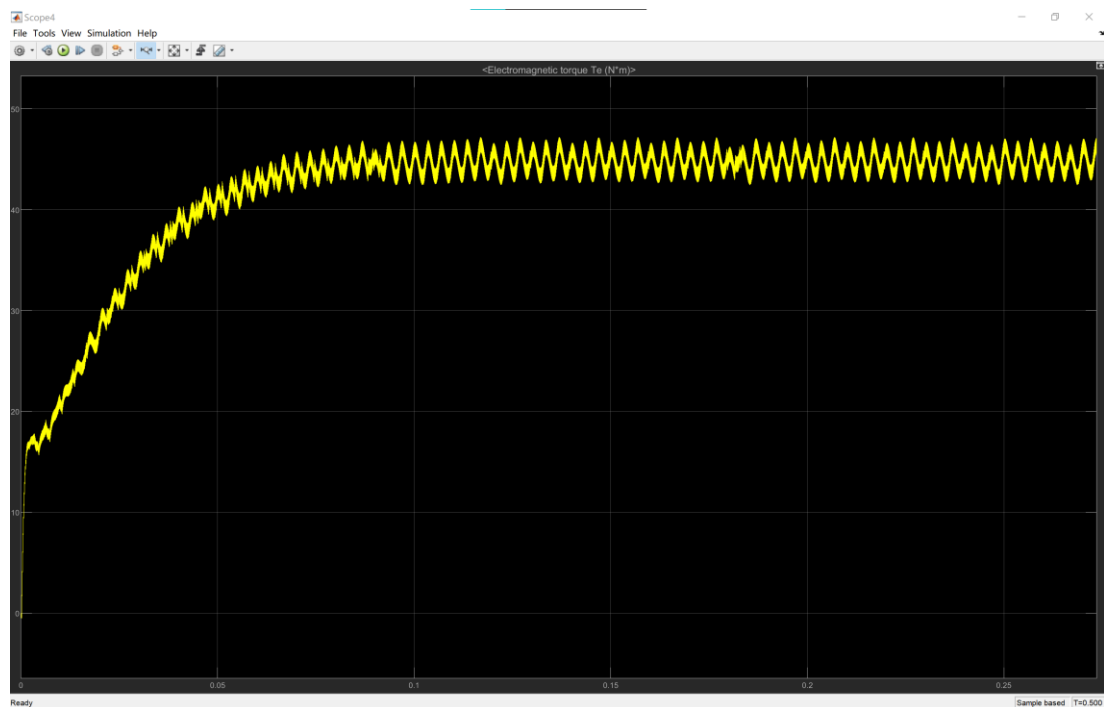
转子电角度



3) 其他测试结果

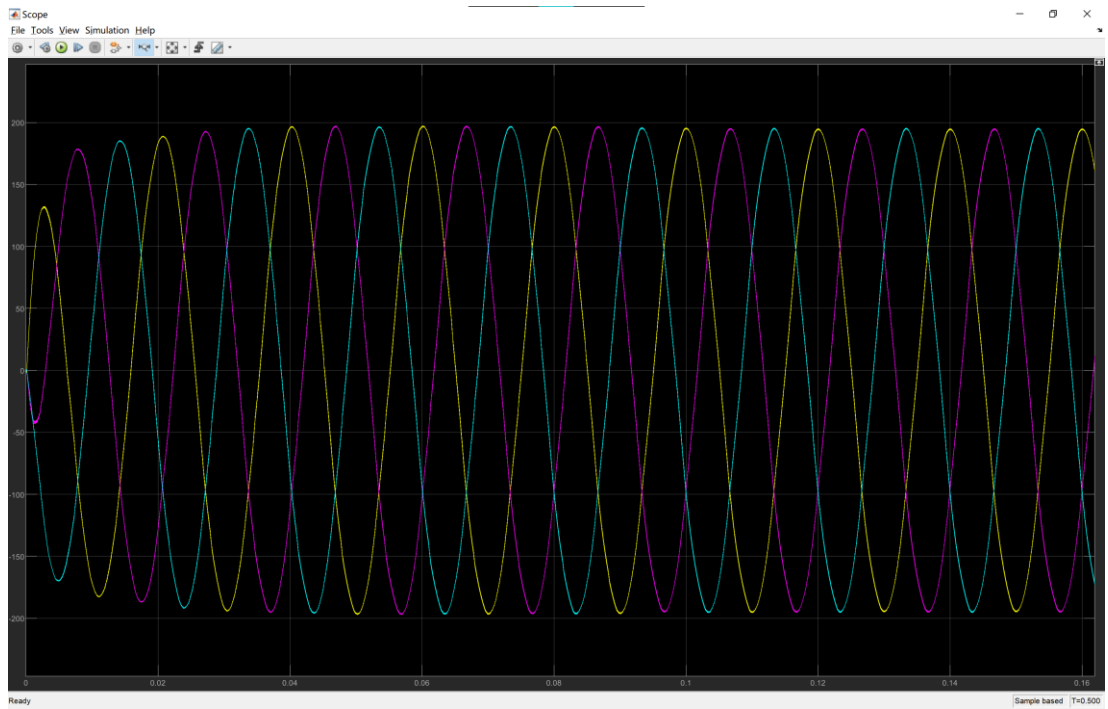
转速为 $1000/60 \times 2\pi$ 时，电机的目标转矩 T_{eDes} 由 30 变为 45Nm。

a) 转矩曲线

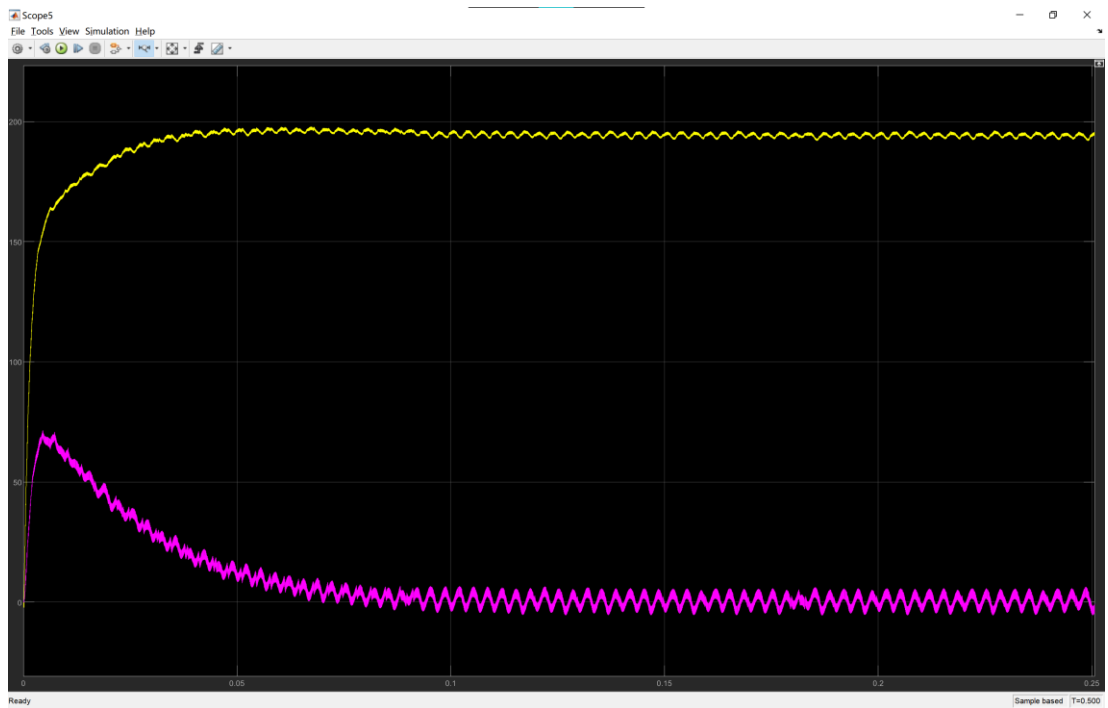


b) 电流曲线

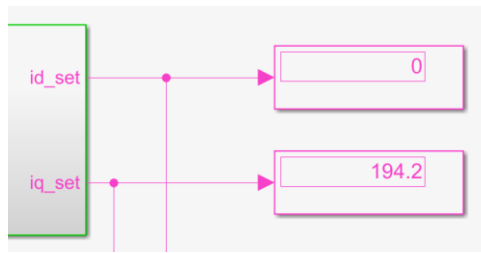
ABC 电流曲线



DQ 电流曲线

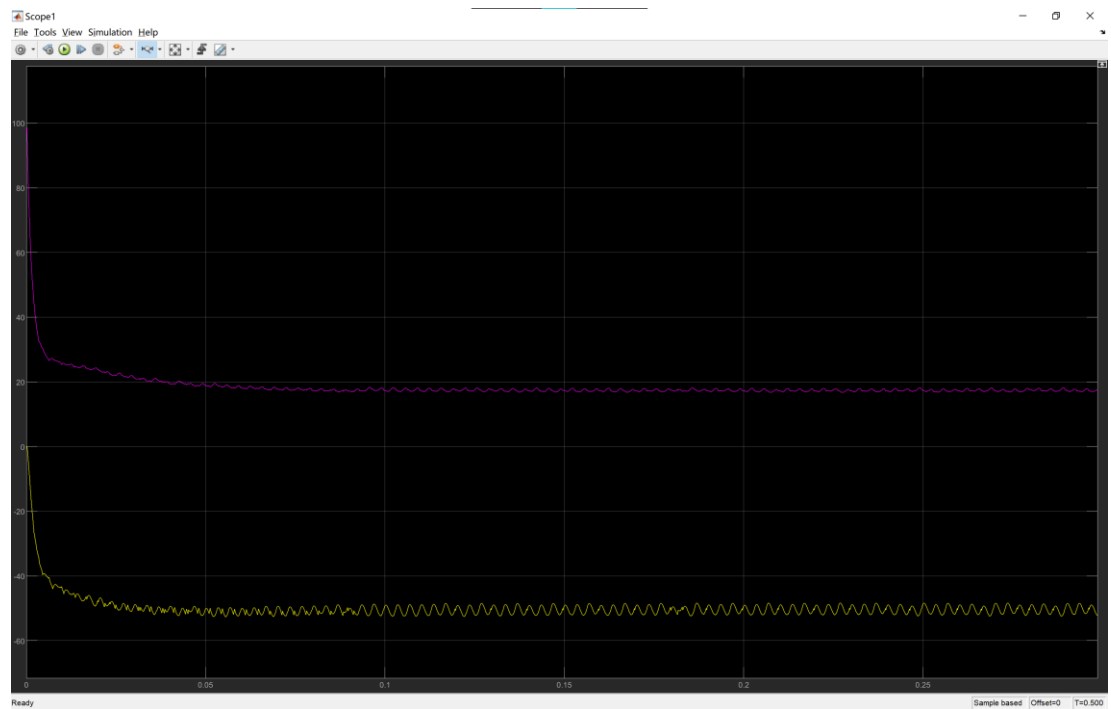


DQ 电流设定值

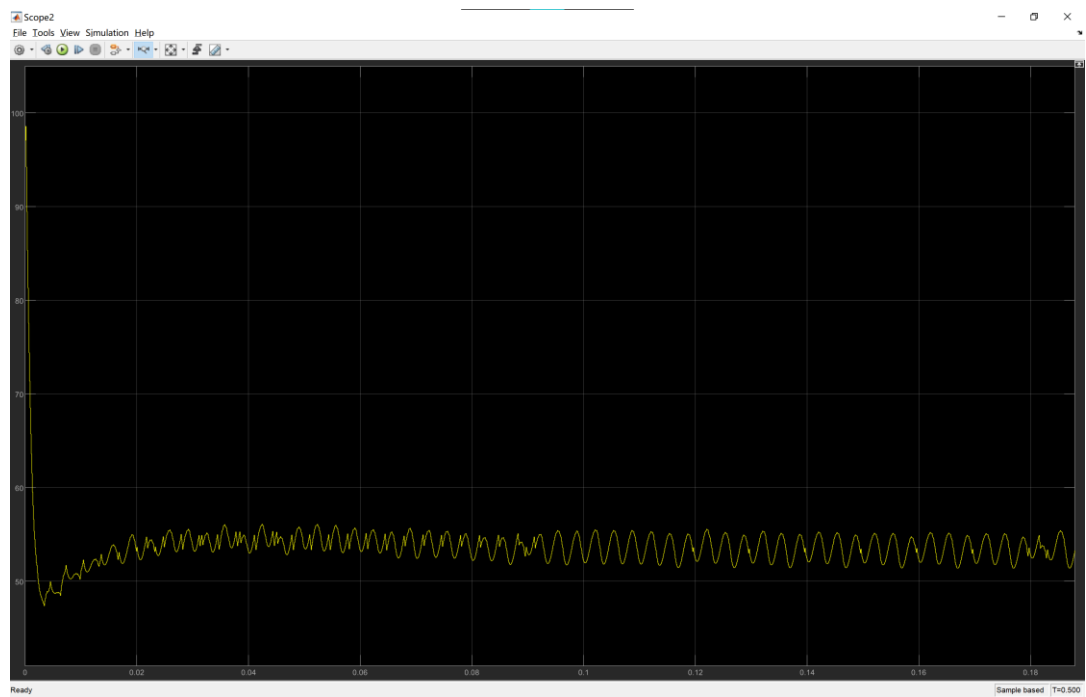


c) 电压曲线

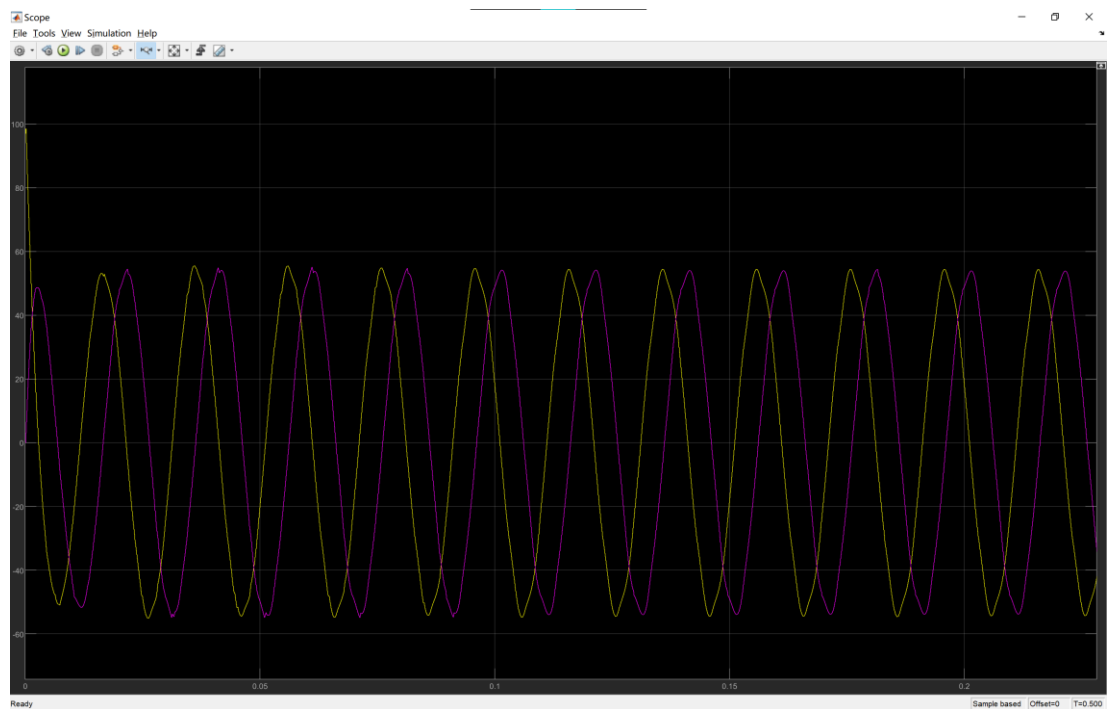
Ud 与 Uq 电压曲线



Us 电压曲线

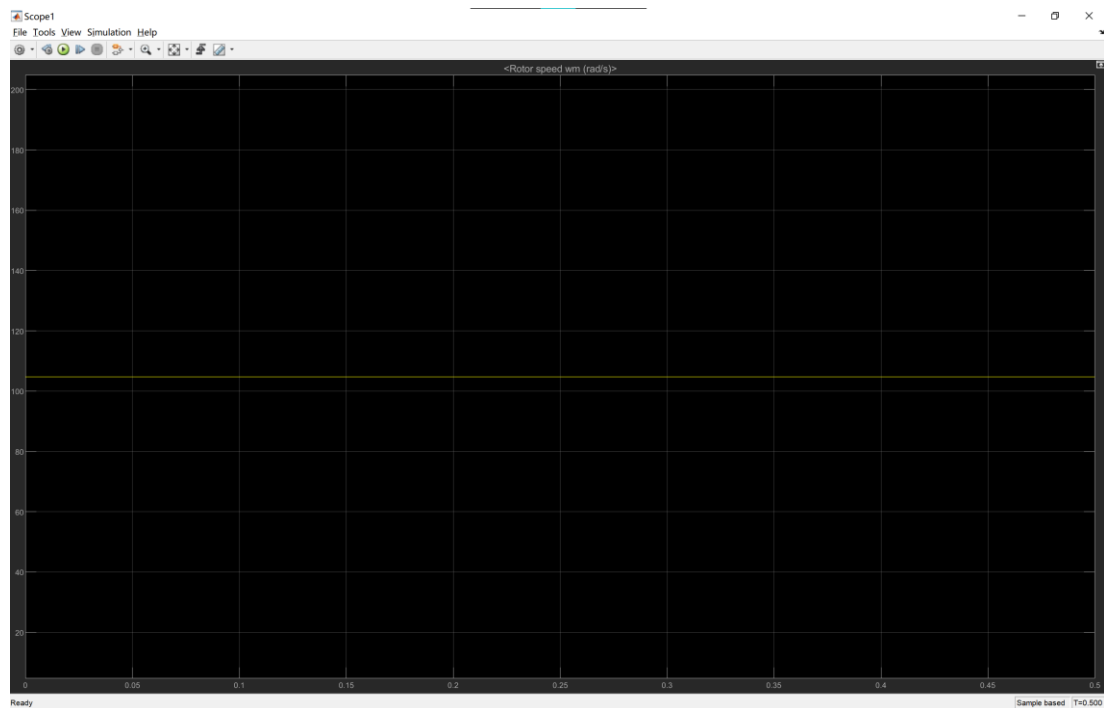


静止坐标系下的电压设定 (u_α 、 u_β)

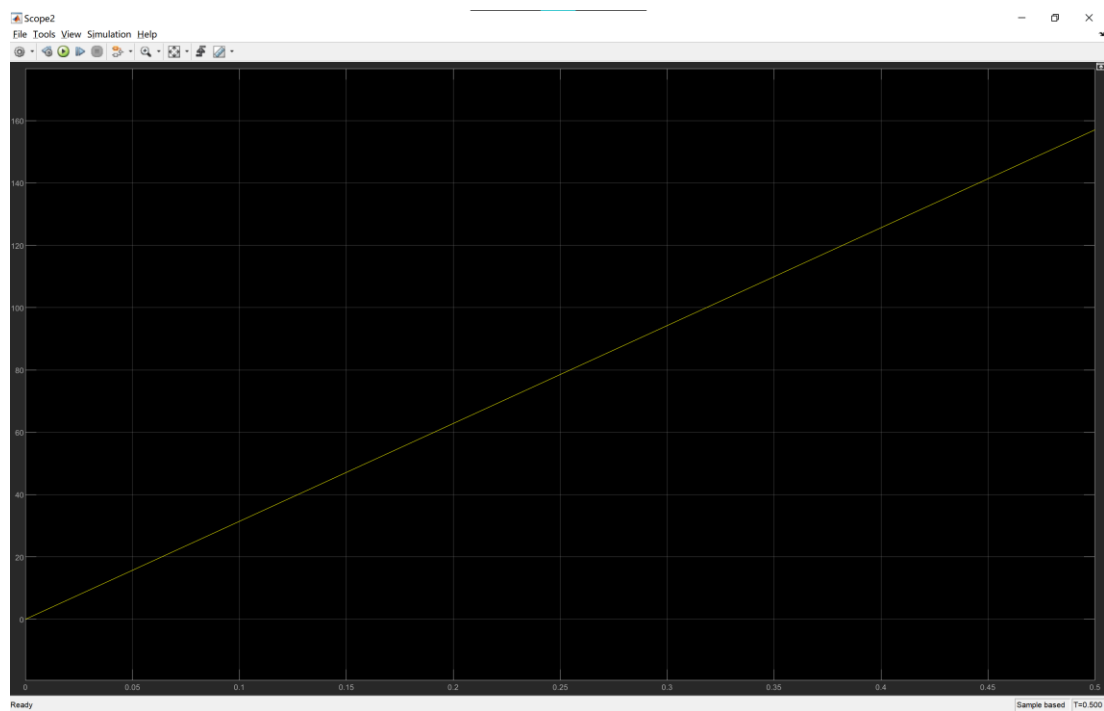


d) 其他曲线

转子转速



转子电角度



五、 个人感受和所得

本文首先基于电机控制系统框图的基本结构,建立了车用永磁同步电机矢量

控制的数学模型，使用 MATLAB/Simulink 进行仿真分析，先后对电机转速变化（在基速区和弱磁区）、目标转矩变化时的转矩电压等电流性能进行仿真求解分析，在实验过程中加深了对矢量控制概念和原理的理解。

通过对车用永磁同步电机矢量控制仿真分析的研究，详细分析电机在固定转速下基速区、弱磁区的转矩、电流、电压等性能变化曲线，将已经学完的《车用电机原理及控制技术》课程知识应用于自身专业实践，扩展了思维，提高了动手能力，对计算机工具 MATLAB/Simulink 的运用更加熟练，加强了课程交叉意识，并对车辆工程本身专业有了进一步了解，之后可以进行更详细、更有创新的模型建立和性能分析。