

# Điều khiển động cơ đồng bộ nam châm vĩnh cửu theo nguyên lý vector

---

**Giảng viên hướng dẫn: TS: Vũ Hoàng Phương**

**Sinh viên thực hiện:**

- Lê Quang Linh - 20174016**
- Nguyễn Tiến Huy Công - 20173689**

# Mục lục

---

1

**Đặt vấn đề**

---

2

**Mô hình động cơ PMSM trong không gian vector**

---

3

**Phương pháp điều khiển động cơ tựa từ thông roto (FOC)**

---

4

**Mô phỏng kiểm chứng**

---

5

**Nhận xét**

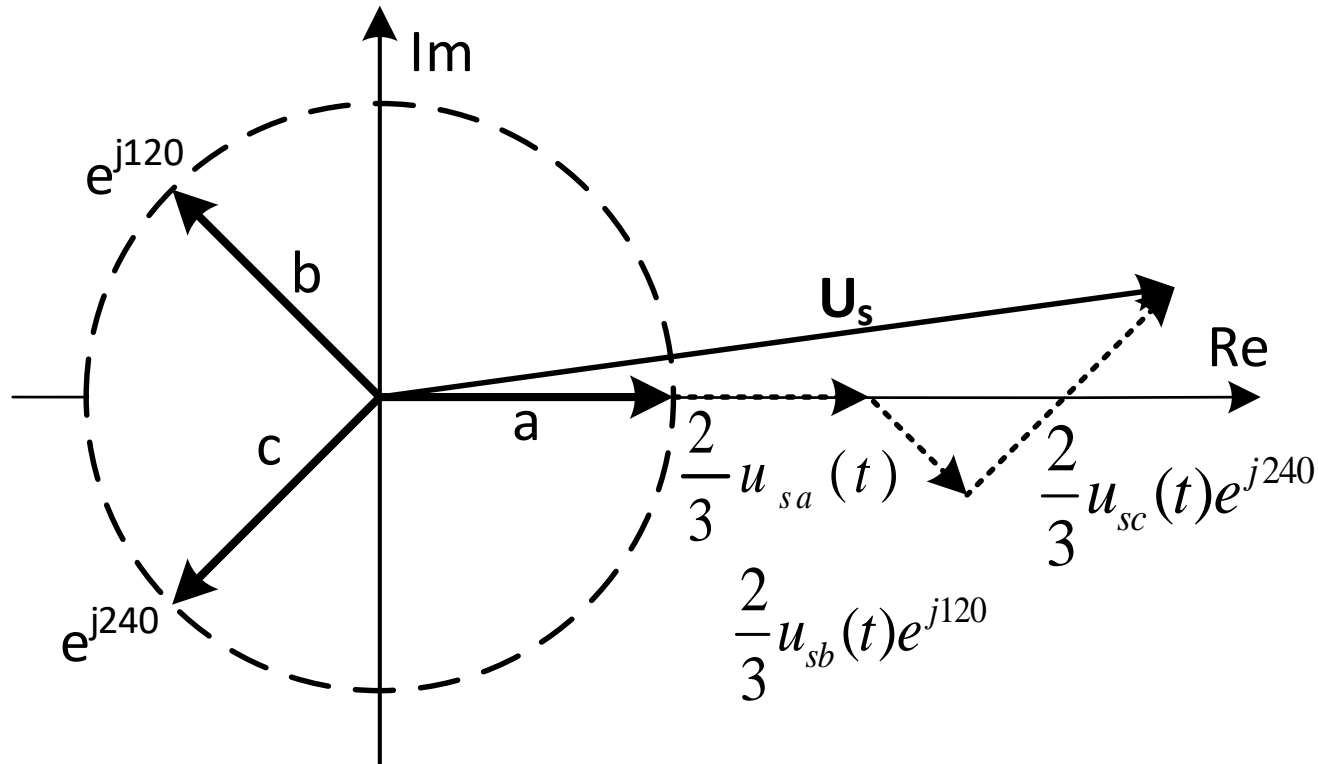
---

6

**Tài liệu tham khảo**

---

## 2.1: Mô hình động cơ đồng bộ kích từ nam châm vĩnh cửu trong không gian vector



Hình 2.1: biểu diễn 3 dòng pha dưới dạng vector phức

$$\vec{u}_s = \frac{2}{3} \left[ u_{sa}(t) + u_{sb}(t)e^{j120} + u_{sc}(t)e^{j240} \right]$$

## 2.1: Mô hình động cơ đồng bộ kích từ nam châm vĩnh cửu trong không gian vector

❖ Mỗi quan hệ giữa các đại lượng vector trong hệ tọa độ dq

▪ Phương trình điện áp

$$\begin{cases} u_{sd} = L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} + R_s i_{sd} - \omega_e L_{sq} i_{sq} \\ u_{sq} = L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + R_s i_{sq} + \omega_e L_{sd} i_{sd} + \omega_e \psi_f \end{cases}$$

▪ Phương trình mô tả từ thông và tốc độ động cơ

$$\begin{cases} M_{dc} = \frac{3}{2} p_p [\psi_f i_{sq} + (L_{sd} - L_{sq}) i_{sd} i_{sq}] = M_{db} + M_a \\ \frac{d\omega_e(t)}{dt} = \frac{Z_p}{J_m} (M_{dc} - \frac{B_v}{Z_p} \omega_e(t) - T_l) \end{cases}$$

## 3.1: Phương pháp điều khiển vector tựa từ thông rotor (FOC)

- ❖ Khi động cơ hoạt động ở chế độ xác lập, các vector từ thông, điện áp, dòng điện đều quay với tốc độ  $\omega_s$ . Vì vậy các thành phần chiếu lên 2 trục d và q là các thành phần 1 chiều.
- ❖ Nếu chọn trục d trùng với trục từ thông rotor thì ta sẽ thu được các kết quả sau:

$$\psi'_{rd} = |\overrightarrow{\psi_{rdq}}|; \psi'_{rq} = 0$$

- Momen động cơ

$$m_M = \frac{3}{2} P_c \cdot \psi_p \cdot i_{sq} \quad \psi_p \text{ Từ thông kích từ}$$

- ❖ Nhận xét: Nếu ta giữ được biên độ vector từ thông rotor không đổi thì momen của động cơ chỉ phụ thuộc vào  $i_{sq}$ .
- ❖ Sử dụng phương pháp Tustin để tính toán các bộ điều khiển trên miền rời rạc.

## 3.1: Phương pháp điều khiển vector tựa từ thông rotor (FOC)

❖ Vì  $\psi'_{rq} = 0$  nên hệ phương trình mô hình động cơ được rút gọn lại như sau:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{sd} i_{sd} + \psi_p \\ \psi_{sq} = L_{sq} i_{sq} \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + L_{sd} \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s L_{sq} i_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + L_{sq} \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s L_{sd} i_{sd} + \omega_s \psi_p \end{cases}$$

$$m_M = \frac{3}{2} P_c \psi_p i_{sq}$$

## 3.2. Tại sao có cấu trúc điều khiển FOC cho PMSM, IM

- Động cơ điện xoay chiều được sử dụng rộng rãi trong nhiều ứng dụng khác nhau.
- Tuy nhiên, việc sử dụng động cơ cảm ứng ở hiệu quả cao nhất là một nhiệm vụ đầy thách thức vì mô hình toán học phức tạp và đặc điểm phi tuyến tính của chúng trong quá trình bão hòa.
- Những yếu tố này làm cho việc kiểm soát động cơ cảm ứng trở nên khó khăn, dẫn đến sự ra đời của các thuật toán điều khiển hiệu suất cao như điều khiển vector.
- Phương pháp điều khiển vô hướng U/f có những hạn chế về mật hiệu suất, momen xoắn sinh ra có dao động.

## 3.2. Tại sao có cấu trúc điều khiển FOC cho PMSM, IM

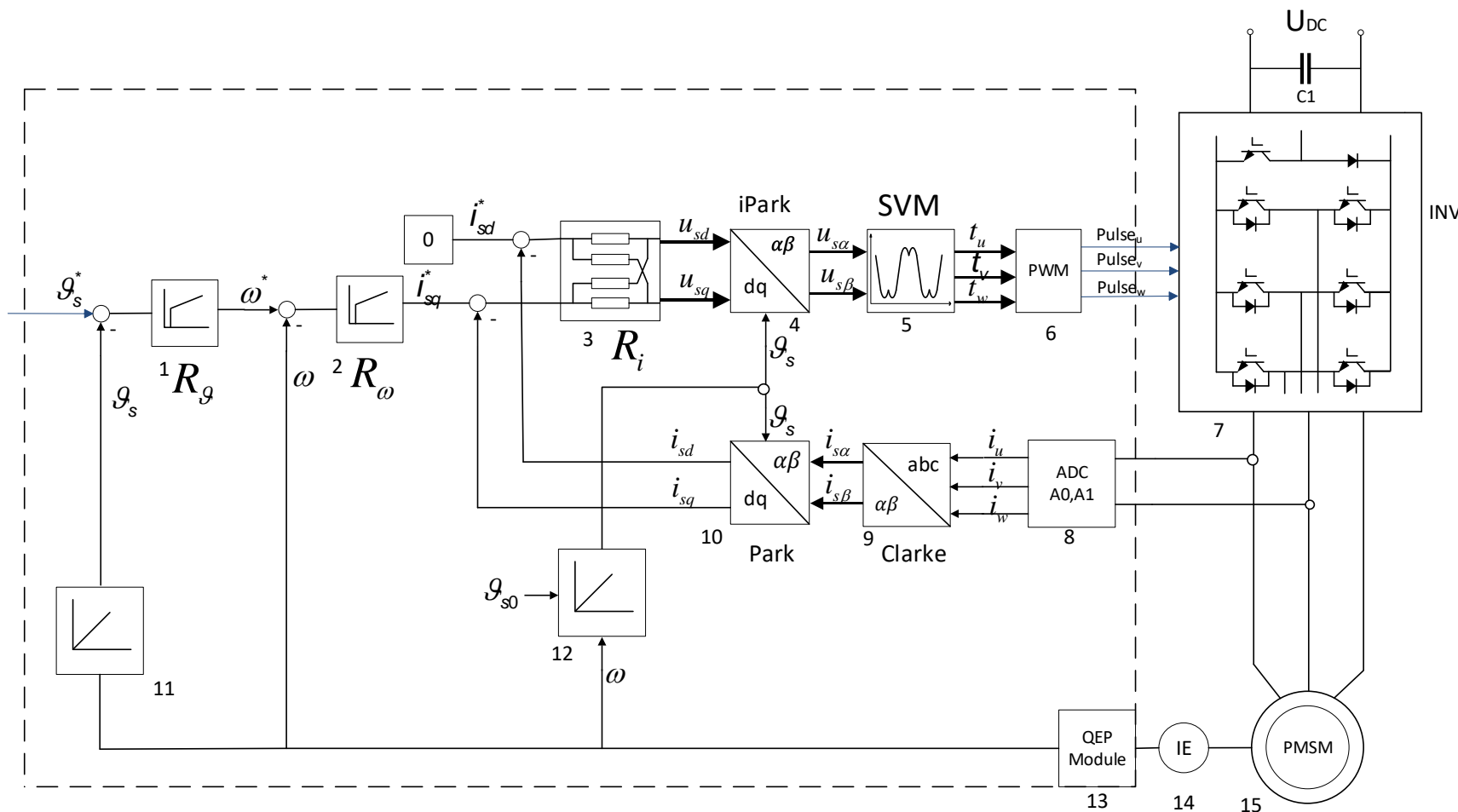
- Do đó, để đạt được hiệu suất cao hơn, cần sử dụng một phương pháp điều khiển khác.
- Sự phát triển của ngành công nghiệp bán dẫn cũng như các vi điều khiển, các bộ xử lý tín hiệu số (DSP) và FPGA đã tạo điều kiện để các phương pháp điều khiển phức tạp hơn như FOC có thể thực hiện được
- Phương pháp điều khiển động cơ tựa từ thông rotor (FOC) tách biệt thành phần sinh momen xoắn và thành phần sinh từ thông của động cơ xoay chiều, giúp mô hình hóa động cơ điện xoay chiều giống với động cơ điện 1 chiều để áp dụng các nguyên lý điều khiển của động cơ điện 1 chiều vào động cơ điện xoay chiều.



## 3.2. Tại sao có cấu trúc điều khiển FOC cho PMSM, IM

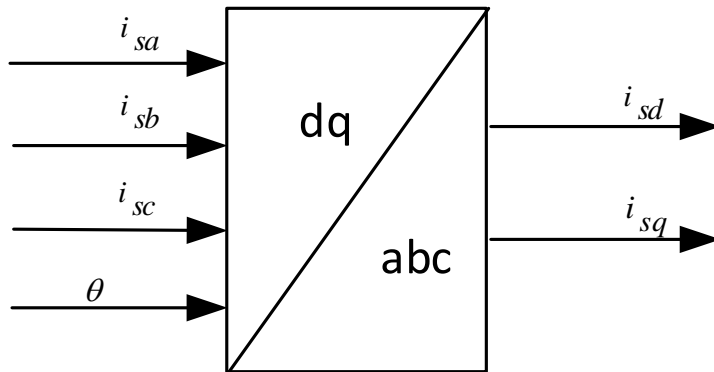
### ➤ Ưu điểm của phương pháp FOC

- ✓ Giảm sự dao động của momen xoắn sinh ra
- ✓ Dải điều chỉnh tốc độ lớn
- ✓ Điều khiển tốc độ chính xác
- ✓ Hoạt động được ở trong cả 4 góc phần tư.



Mô hình bộ điều khiển tựa từ thông rotor

## 3.3: Khổi chuyển hệ tọa độ

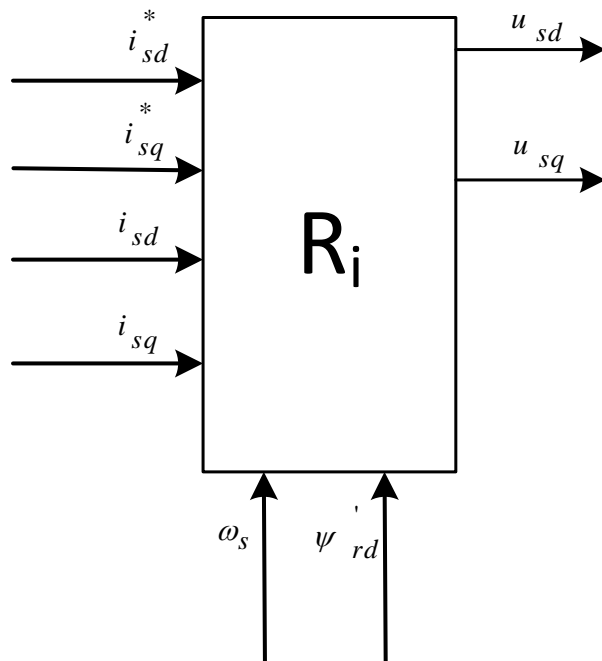


- Khổi chuyển hệ tọa độ nhận giá trị về dòng điện  $i_{sa}$ ,  $i_{sb}$ ,  $i_{sc}$  và góc tựa từ thông rotor để chuyển dòng điện stator ở hệ trục tọa độ dq

- Điều này giúp ta tính toán cho động cơ xoay chiều như tính toán với động cơ 1 chiều.

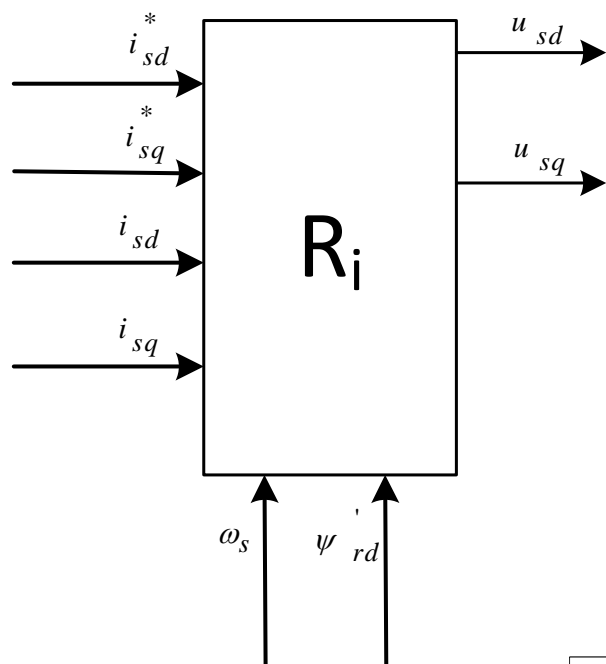
$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{2}{3} \left( i_{sa} \cdot \cos(\theta) + i_{sb} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{sc} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \\ i_{sq} = \frac{2}{3} \left( -i_{sa} \cdot \sin(\theta) - i_{sb} \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - i_{sc} \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right) \end{cases}$$

## 3.3: Bộ điều chỉnh dòng điện ( $R_i$ )



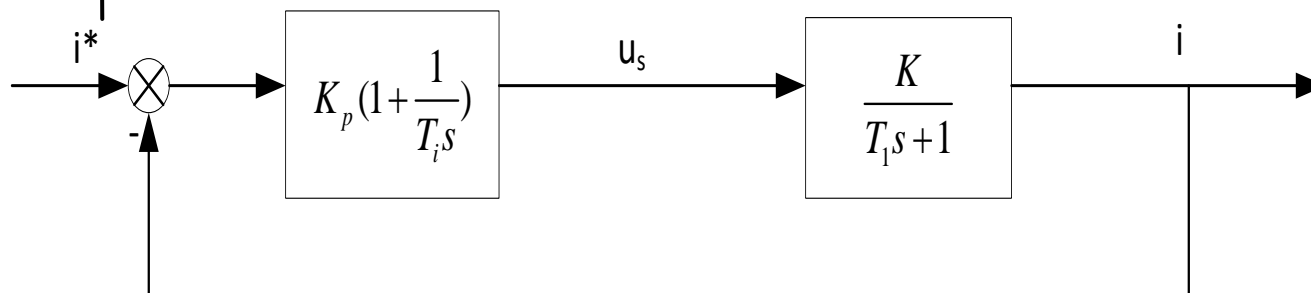
- Bộ điều chỉnh  $R_i$  làm tăng chất lượng dòng điện stator bằng việc điều chỉnh hai dòng điện quy đổi  $i_{sd}$  và  $i_{sq}$ .
- Nếu ta giữ nguyên được  $i_{sd}$  và  $i_{sq}$  thì Momen động cơ sinh ra ổn định.
- Đầu ra của  $R_i$  là  $u_{sd}$  và  $u_{sq}$ , được sử dụng để phục vụ khâu điều chế SVM
- Lượng đặt cho dòng điện là  $i_{sq}^*$  được tính toán từ hai bộ điều chỉnh tốc độ

## 3.3: Bộ điều chỉnh dòng điện (Ri)

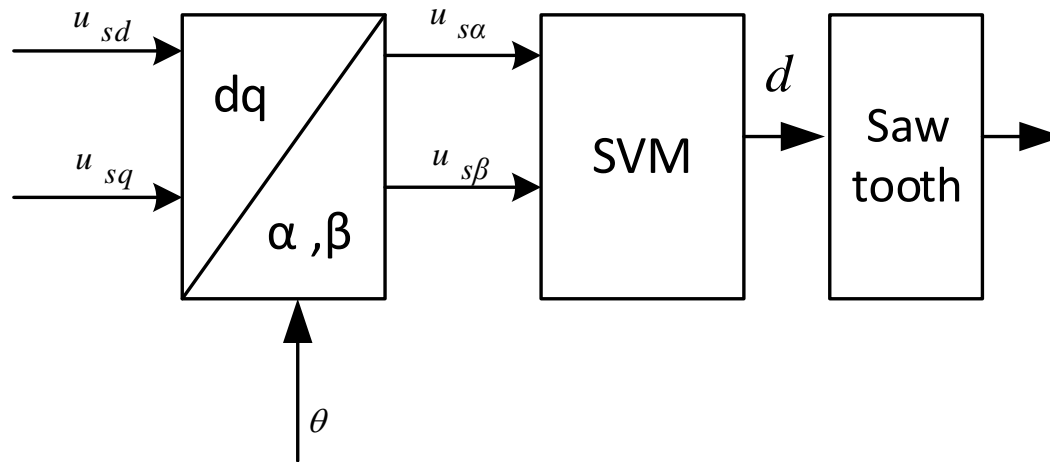


- Từ mô hình dòng điện ta thấy có thành phần xen kênh. Vì vậy khi thiết kế bộ điều khiển ta phải khử thành phần xen kênh này.

- Sau cùng, ta thấy quan hệ giữa  $i_{sd}$  và  $u_{sd}$ ,  $i_{sq}$  và  $u_{sq}$  là khâu quán tính bậc nhất. Ta thiết kế bộ điều khiển PI dựa theo mô hình sau:



## 3.4: Khâu SVM



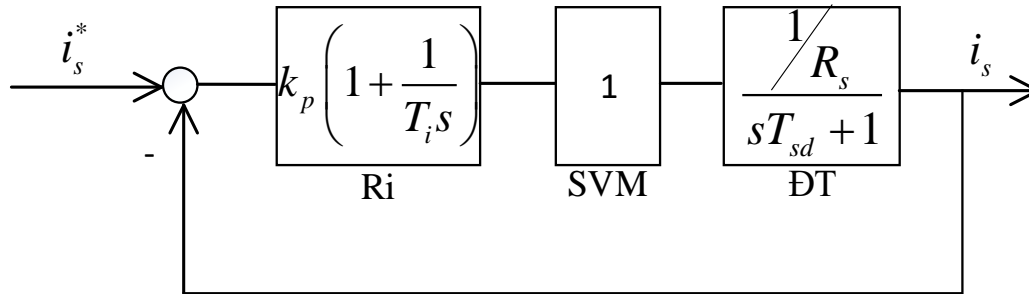
Khối SVM sử dụng phương pháp điều chế SVM để phát xung điều khiển van bán dẫn của mạch nghịch lưu nguồn áp.

Đầu vào của khối SVM là điện áp  $u_{s\alpha}$  và  $u_{s\beta}$  được tính toán từ đầu ra của bộ điều chỉnh dòng điện.

Đầu ra là duty cycle rồi so sánh với khâu răng cưa để phát xung cho van.

## 3.5: Thiết kế các bộ điều chỉnh

### 3.5.1: Bộ điều chỉnh dòng điện



Để đơn giản cho cách thiết kế bộ PI, ta thực hiện như sau:

- Bỏ qua thành phần đàn kên
- Coi SVM là khâu có hàm truyền bằng 1
- Khi đó :

$$\begin{cases} u_{sd} \approx R_s \cdot (1 + p.T_{sd}) \cdot i_{sd} \\ u_{sq} \approx R_s \cdot (1 + p.T_{sq}) \cdot i_{sq} \end{cases} \quad G_{isd}(s) = \frac{1}{\frac{R_s}{1 + s.T_{sd}}}$$

## 3.5: Thiết kế các bộ điều chỉnh

### 3.5.1: Bộ điều chỉnh dòng điện

Ta chọn  $T_{id} = T_{sd}$  để triệt tiêu hằng số thời gian của đối tượng, khi đó ta có hàm truyền hệ hở có dạng :

$$G_{hd}(s) = G_{Risid}(s) \cdot G_{isd}(s) = \frac{k_{pd}}{R_s \cdot T_{sd}} \cdot \frac{1}{s} = k_d \cdot \frac{1}{s}$$

Với:

$$k_d = \frac{k_{pd}}{R_s \cdot T_{sd}} = \frac{k_{pd}}{R_s \cdot \frac{L_{sd}}{R_s}} = \frac{k_{pd}}{L_{sd}}$$

Ta lựa chọn hằng số thời gian của hàm truyền hệ kín bằng số nguyên lần chu kỳ phát xung

$$T_{id} = n \cdot T_s \Leftrightarrow \frac{L_{sd}}{k_{pd}} = n \cdot T_s \Leftrightarrow k_{pd} = \frac{L_{sd}}{n \cdot T_k} \quad \text{Thông số bộ PI} \quad \begin{cases} T_{id} = T_{sd} = \frac{L_{sd}}{R_s} \\ k_{pd} = \frac{L_{sd}}{n \cdot T_k} \end{cases}$$



## 3.5: Thiết kế các bộ điều chỉnh

### 3.5.2: Bộ điều chỉnh tốc độ

Xuất phát từ phương trình chuyển động:

$$\left\{ m_M - m_L = J \frac{d\omega}{dt}; \quad m_L = 0 \right\} \Rightarrow \frac{3}{2} P_c \cdot \psi_p \cdot i_{sq} = J \frac{d\omega}{dt}$$

Chuyển về miền ảnh laplace ta được :

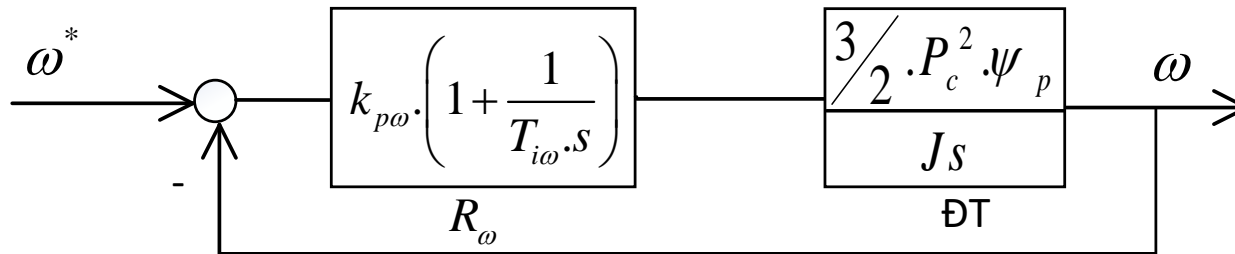
$$\frac{3}{2} P_c \cdot \psi_p \cdot i_{sq}(s) = Js\omega(s) \Leftrightarrow \frac{\omega(s)}{i_{sq}(s)} = \frac{\frac{3}{2} \cdot P_c \cdot \psi_p}{Js} \Leftrightarrow \frac{\omega(s)}{i_{sq}(s)} = \frac{\frac{3}{2} \cdot P_c^2 \cdot \psi_p}{Js}$$

Hàm truyền đối tượng:  $G_{dt\omega}(s) = \frac{\frac{3}{2} \cdot P_c^2 \cdot \psi_p}{Js}$

Với  $\psi_p$  là từ thông roto được tính :  $\psi_p = \frac{2}{3} \frac{m_N}{\sqrt{2} \cdot P_c \cdot I_N}$

## 3.5: Thiết kế các bộ điều chỉnh

### 3.5.2: Bộ điều chỉnh tốc độ



Ta có hàm truyền hệ hở:  $G_{h\omega}(s) = G_{R\omega}(s) \cdot G_{dt\omega}(s) = k_{p\omega} \cdot \left(1 + \frac{1}{T_{i\omega} \cdot s}\right) \cdot \frac{\frac{3}{2} P_c^2 \cdot \psi_p}{J \cdot s}$

$$= \frac{k_{p\omega} \cdot \frac{3}{2} P_c^2 \cdot \psi_p}{T_{i\omega} \cdot J} \cdot \frac{1 + T_{i\omega} \cdot s}{s^2} = k \cdot \frac{1 + T_{i\omega} \cdot s}{s^2}; \quad k = \frac{k_{p\omega} \cdot \frac{3}{2} P_c^2 \cdot \psi_p}{T_{i\omega} \cdot J}$$

Hàm truyền hệ kín:

$$G_{k\omega}(s) = \frac{G_{h\omega}(s)}{1 + G_{h\omega}(s)} = \frac{k \cdot \frac{1 + T_{i\omega} \cdot s}{s^2}}{1 + k \cdot \frac{1 + T_{i\omega} \cdot s}{s^2}} = \frac{k \cdot (1 + T_{i\omega} \cdot s)}{s^2 + k \cdot (1 + T_{i\omega} \cdot s)} = \frac{k \cdot T_{i\omega} \cdot s + k}{s^2 + k \cdot T_{i\omega} \cdot s + k}$$

## 3.5: Thiết kế các bộ điều chỉnh

### 3.5.2: Bộ điều chỉnh tốc độ

Theo dạng chuẩn ta có :  $G_{k\omega}(s) = \frac{2.\xi_w.\omega_{nw}.s + \omega_{nw}^2}{s^2 + 2.\xi_w.\omega_{nw}.s + \omega_{nw}^2}$

$\omega_{nw}$  tần số giao động riêng,  $0 < \xi_w < 1$  hệ số giao động tắt dần

$$\Rightarrow \begin{cases} k = \omega_{nw}^2 \\ k.T_{i\omega} = 2.\xi_w.\omega_{nw} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k = \frac{k_{p\omega} \cdot \frac{3}{2} P_c^2 \cdot \psi_p}{T_{i\omega} \cdot J} = \omega_{nw}^2 \\ T_{i\omega} = \frac{2.\xi_w.\omega_{nw}}{\omega_{nw}^2} = \frac{2.\xi_w}{\omega_{nw}} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} k_{p\omega} = \frac{\omega_{nw}^2 \cdot T_{i\omega} \cdot J}{\frac{3}{2} P_c^2 \cdot \psi_p} \\ T_{i\omega} = \frac{2.\xi_w}{\omega_{nw}} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} k_{p\omega} = \frac{2.\xi_w.\omega_{nw} \cdot J}{\frac{3}{2} P_c^2 \cdot \psi_p} \\ T_{i\omega} = \frac{2.\xi_w}{\omega_{nw}} \end{cases}$$

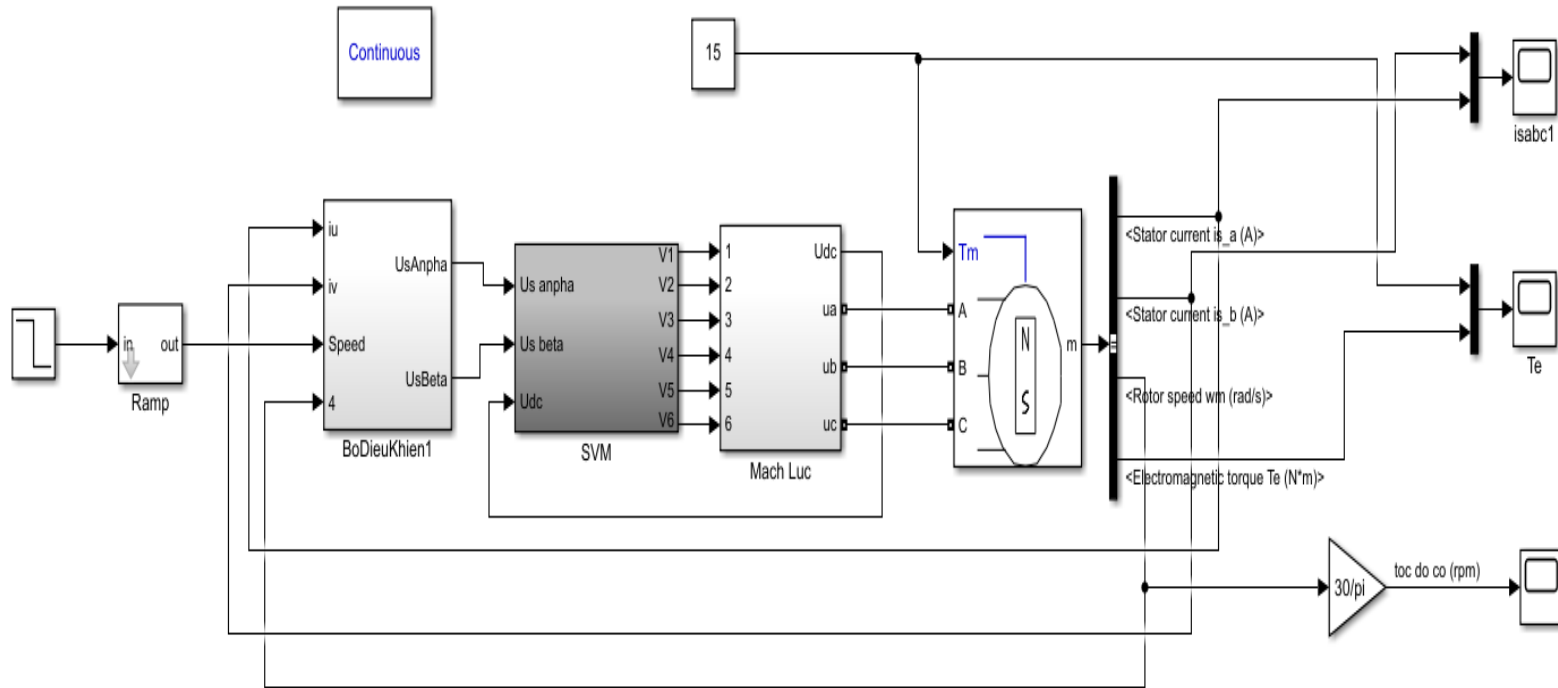
Theo tài liệu ta chọn:  $\xi_w = 0.71$  tương ứng với độ quá điều chỉnh 5%,  $t_s = 1s$

$$\begin{cases} \xi_w = 0.71 \\ \omega_{nw} = \frac{4}{\xi_w * t_s} \end{cases}$$

- ❖ Mô phỏng kiểm chứng phương pháp điều khiển FOC trên MATLAB và Bộ Typhoon HIL 402
- ❖ Sử dụng bộ điều khiển PI rời rạc theo phương pháp Tustin
- Điện áp một chiều đầu vào nghịch lưu:  $U_{dc} = 600V$ .
- Thông số động cơ:

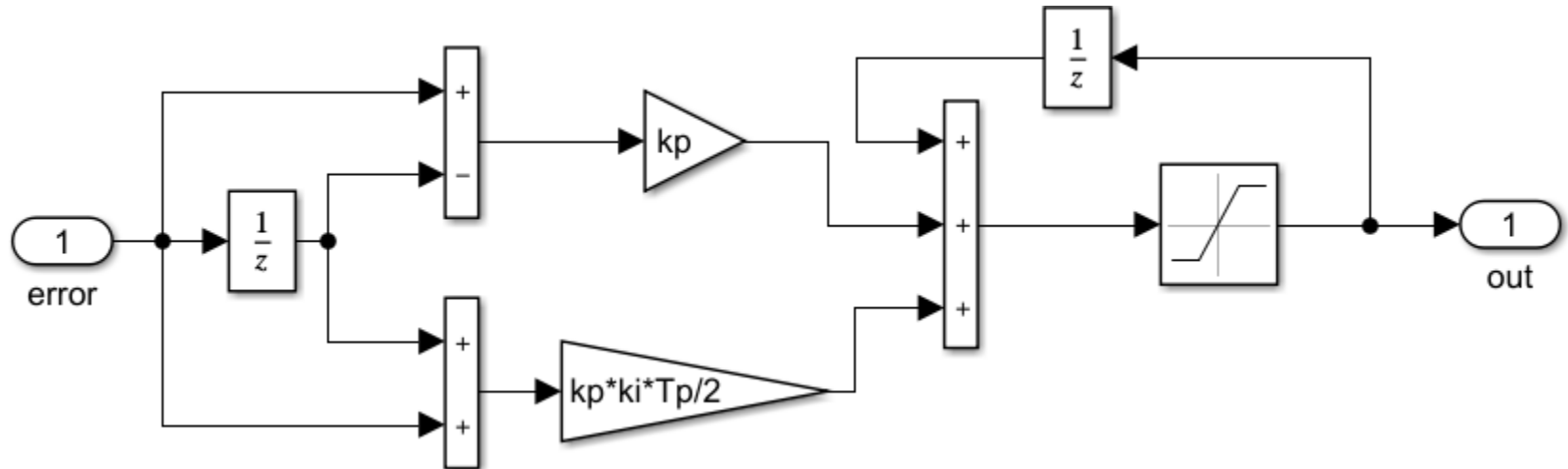
<b>Điện cảm dọc trục:</b>	$L_{sq} = 0.0022 \text{ H}$
<b>Điện cảm ngang trục:</b>	$L_{sd} = 0.0022 \text{ H}$
<b>Điện trở stator:</b>	$R_s = 0.5 \text{ } \Omega$
<b>Số cặp cực:</b>	$Z_p = 4$
<b>Momen quán tính:</b>	$J = 3.24e-3 \text{ Kg.m/s}^2$

- Tần số đóng cắt  $f_{sw} = 10\text{kHz}$
- Tần số trích mẫu bộ điều khiển dòng điện là  $10\text{kHz}$
- Lượng đặt Momen cản là  $15\text{Nm}$
- thời gian mô phỏng  $5\text{s}$



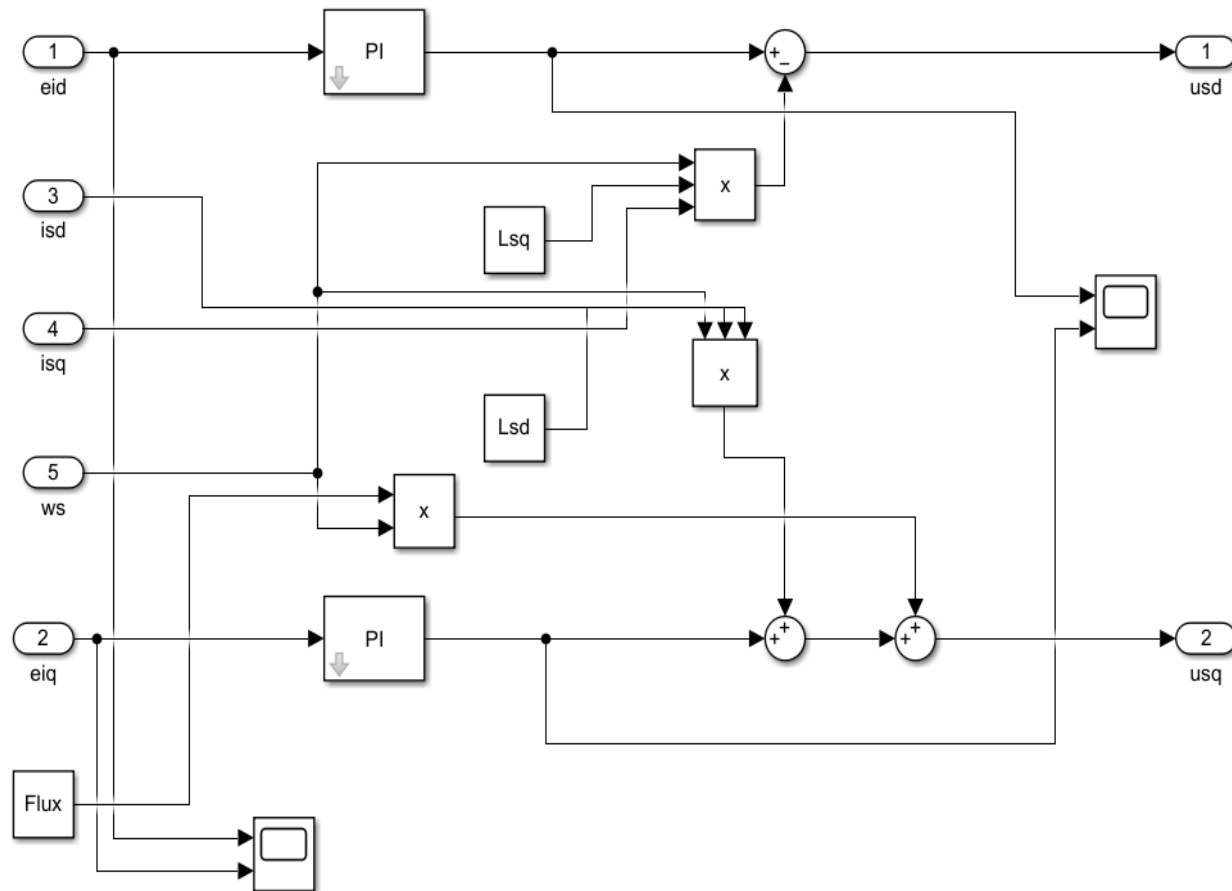
## Hình ảnh mô phỏng trên MATLAB

## 4.1: Mô phỏng trên MATLAB



Bộ điều chỉnh PI rời rạc

## 4.1: Mô phỏng trên MATLAB

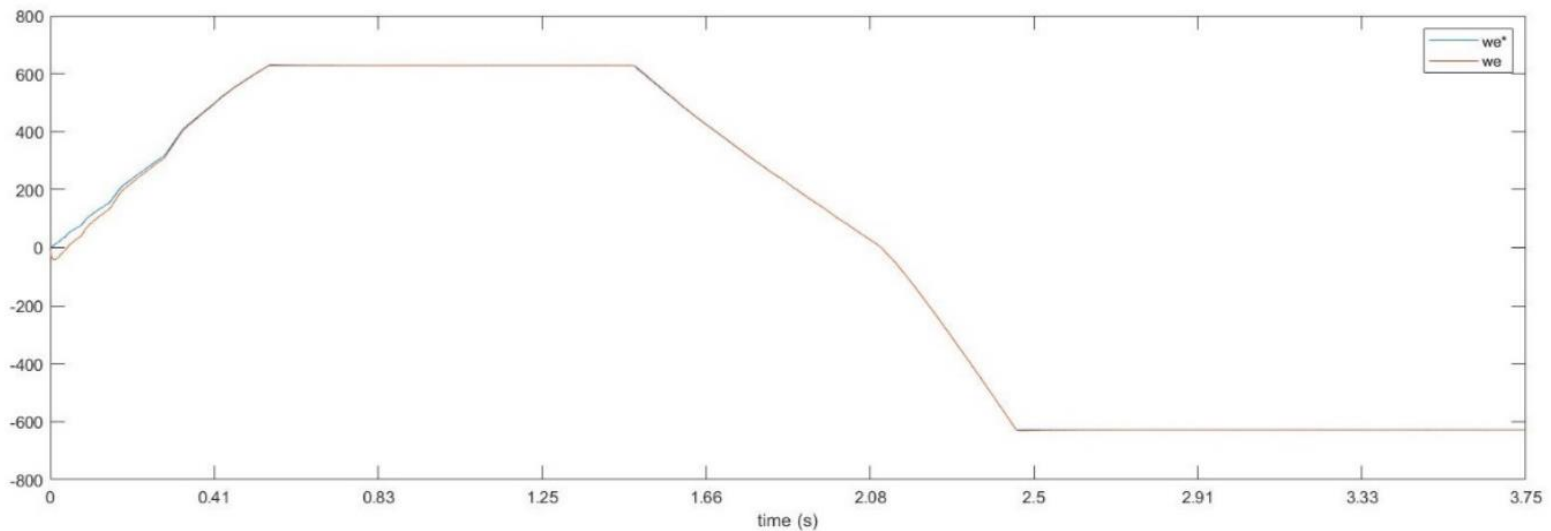


Bộ điều chỉnh dòng điện



## 4.1: Mô phỏng trên MATLAB

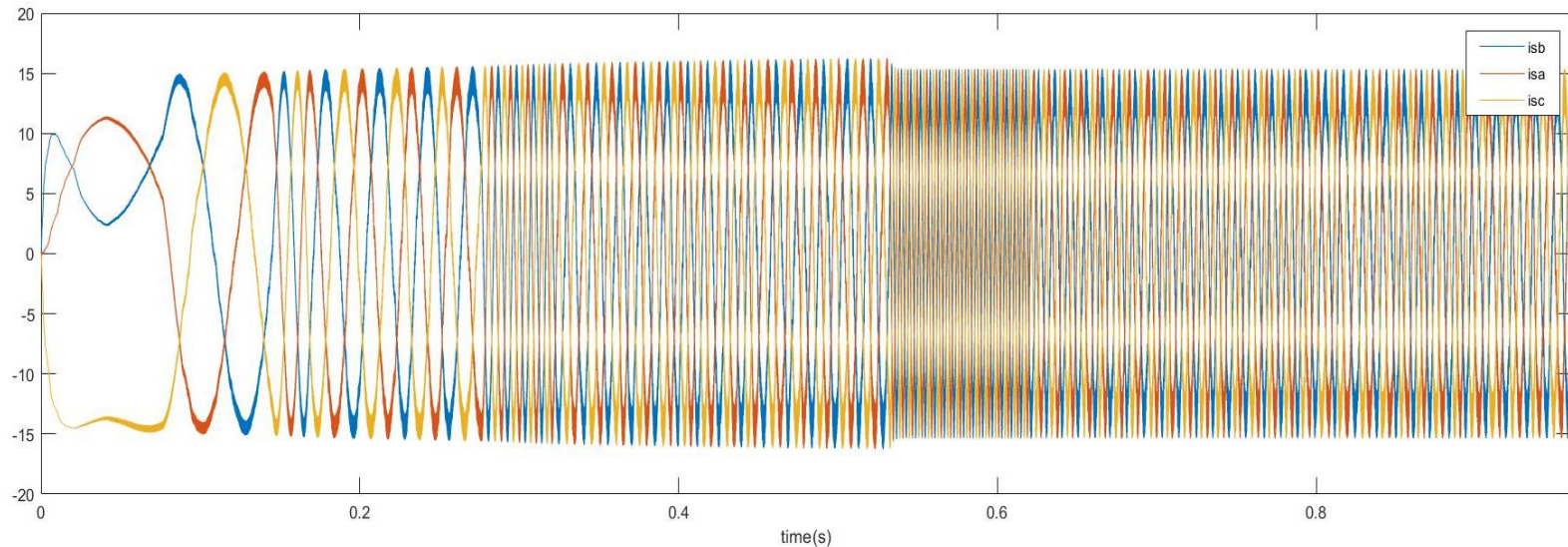
### ❖ Đồ thị tốc độ quay của rotor



- *Nhận xét* : Tốc độ động cơ bám theo lượng đặt, vì hàm truyền hệ kín của mạch vòng tốc độ có dạng khâu dao động bậc 2 nên ta có thể thấy tốc độ động cơ có dao động trước khi xác lập hoặc thay đổi momen cản nhưng không đáng kể.

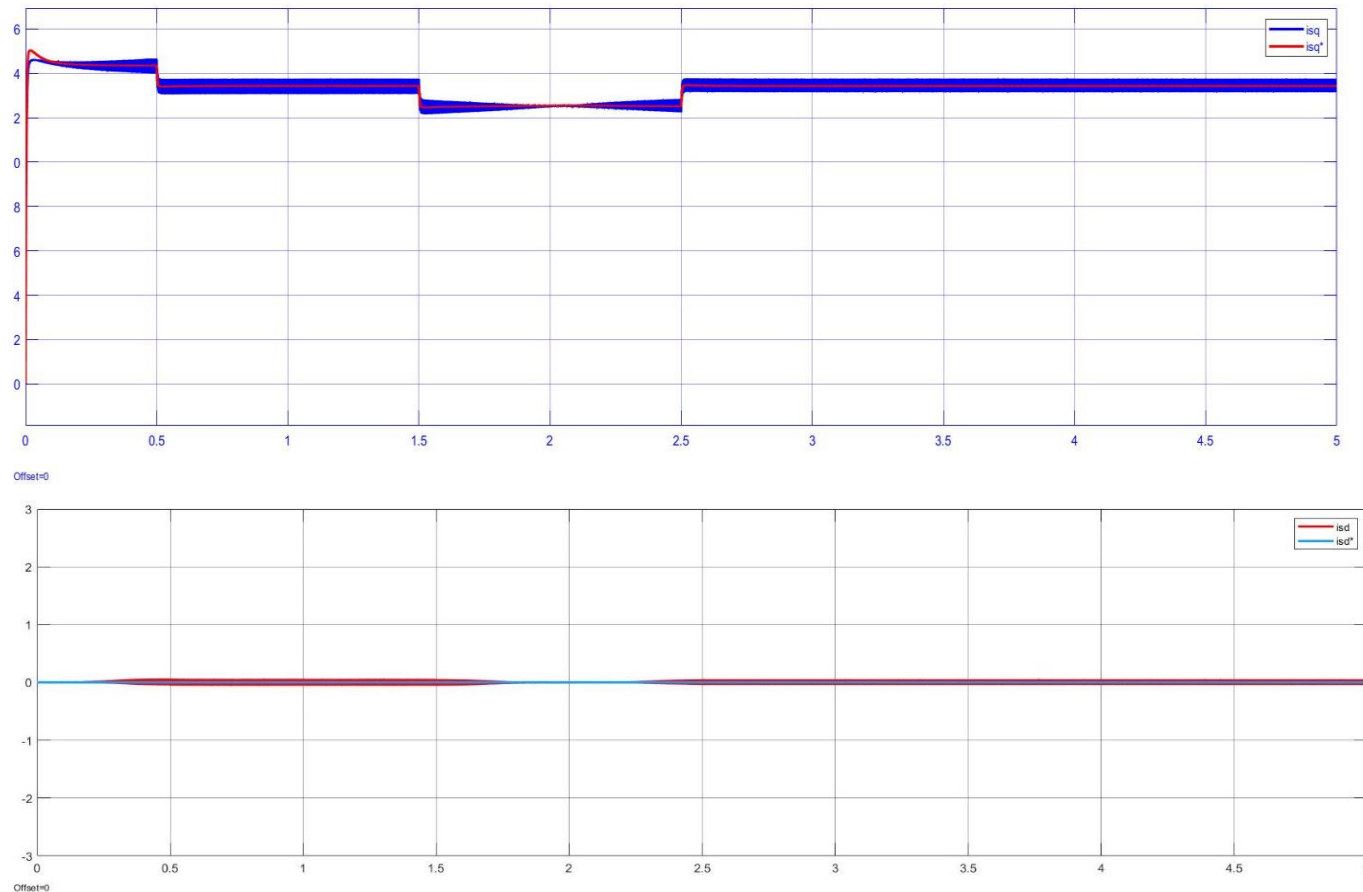
## 4.1: Mô phỏng trên MATLAB

### ❖ Đồ thị dòng điện stator



- Nhận xét: Dòng điện pha phía stator có dạng hình sin thể hiện bộ điều khiển dòng điện đáp ứng được yêu cầu. Biên độ dòng điện stator khi động cơ chạy ổn định là 15.2A, dòng điện lớn nhất trong quá trình tăng tốc là 16.25A, gấp 1.07 lần dòng điện khi động cơ chạy ổn định

Hai dòng điện quy đổi  $i_{sq}$  và  $i_{sd}$



- ✓ Mô phỏng thuật toán FOC trên matlab cho ra kết quả đúng
- ✓ Chạy thành công thuật toán điều chế vector không gian SVM và mạch vòng điều chỉnh dòng điện trong cấu trúc điều khiển FOC trên card FPGA
- ✓ Vấn đề chưa giải quyết được: khi chạy mạch vòng tốc độ động cơ tăng mômen bằng với mômen tải sau đó tốc độ không thay đổi không bám lượng đặt:  
những nguyên nhân có thể xảy ra:
  - + sai sót về phần code
  - + sai khi nối các khối trên fpga
- ✓ Hướng phát triển:
  - Hoàn thiện thuật toán FOC trên FPGA , bổ thêm nguyên lý điều khiển để tăng tính bền vững của hệ
  - So sánh hiệu năng giữa FPGA và DSP
  - tăng tần số làm việc của hệ

- Sách: Điều khiển Vector truyền động điện xoay chiều ba pha (Tác giả: Nguyễn Phùng Quang, Nhà xuất bản Bách Khoa Hà Nội)
- Cơ sở truyền động điện (Tác giả: Bùi Quốc Khánh, Nguyễn Văn Liễn, Nhà xuất bản Khoa học và kỹ thuật)
- Giáo trình điện tử công suất (Tác giả: Trần Trọng Minh, Nhà xuất bản giáo dục)
- FPGA Realization of a High-performance Servo Controller for PMSM - Zhaoyong Zhou and Tiecai Li, Toshio Takahashi and Eddy Ho
- FPGAs Enable Energy-Efficient Motor Control in Next Generation Smart Home Appliances – Altera Corporation
- FPGA-Based High Performance AC Drives

# Trân trọng cảm ơn!



**TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI**  
HANOI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

**SEE**  
School of Electrical Engineering



**ICEA**  
Institute for Control  
Engineering and Automation