

Cuando se habla de motores eléctricos de corriente continua, los motores sin escobillas resaltan por su alto desempeño, siendo la opción obligatoria cuando se trata de autos eléctricos, drones, robótica avanzada y robótica industrial.

Para los motores brushless, existe una gran diversidad de técnicas de control. Algunas de las más relevantes son el control trapezoidal, mayormente utilizado en drones, el control directo de torque (DTC), que se usa principalmente en motores de media-alta potencia, y el control FOC, que es mayormente utilizado en robótica. En este documento, solo se hablará de esta última técnica.

Hay tres aspectos que diferencian cada técnica. Estos son el rizado de torque, el coste computacional y la complejidad del hardware necesario para su ejecución. En estos aspectos, el control FOC es uno de los que produce menor rizado de torque, pero requiere de una mayor cantidad de computación y hardware.

Este proyecto presenta la implementación y validación de un controlador de campo orientado (FOC) para motores sin escobillas de corriente continua (BLDC). Se desarrolló la placa controladora utilizando STM32 y se implementó el algoritmo del control FOC en C.

Marco teórico

0.1. Motores brushless

Los motores brushless (BLDC) o motores sin escobillas de corriente continua son motores donde el embobinado del motor se encuentra en el estátor, mientras que el rotor tiene los imanes.

Estos motores se caracterizan por su mayor densidad de potencia en comparación con los motores con escobillas. Sin embargo, esto también lleva a una mayor complejidad al requerir un controlador que realice la conmutación del embobinado para generar el giro del rotor.

Al tener tres fases que se pueden energizar de forma positiva o negativa, esto da ocho posibles configuraciones de polarización, de las cuales dos son nulas, dando así seis formas de polarización útiles para el control del giro. Esto es lo que da origen a uno de los métodos de control más simples, que es el control trapezoidal o control de seis pasos, que simplemente se limita a ejecutar estas seis polarizaciones en secuencia para completar un giro, pero sacrificando eficiencia y agregando un rizado en el torque bastante importante.

0.2. Motivación

Este proyecto nace de la necesidad de un controlador para motores brushless adecuado para su uso en robots de competencia en la categoría de robot sumo autónomo. En esta categoría, este tipo de motores no son normalmente utilizados debido a las limitaciones de los controladores comerciales y los riesgos que conlleva la sobrecarga de los motores en periodos cortos de acción, ya que los controladores comerciales no están pensados para esto.

$$\begin{aligned}i_{\alpha} &= i_a \\i_{\beta} &= \frac{i_a + 2i_b}{\sqrt{3}}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}i_d &= i_{\alpha} \cos(\theta) + i_{\beta} \sin(\theta) \\i_q &= -i_{\alpha} \sin(\theta) + i_{\beta} \cos(\theta)\end{aligned}$$

$$V_{\alpha} = V_d \cos(\theta) - V_q \sin(\theta)$$

$$V_{\beta} = V_d \sin(\theta) + V_q \cos(\theta)$$

$$i_{\alpha} - i_{\beta} - i_a - i_b - i_c - \theta$$

$$V_{\alpha} - V_{\beta} - i_d - i_q - V_d - V_q$$

$$t_a - t_b - t_c$$

$$t_1 \vec{V}_1$$

$$t_2 \vec{V}_2$$

$$\mathbf{j}^{\beta}$$

$$\alpha$$

$$\vec{V}_{\text{ref}} = V_{\alpha} + jV_{\beta}$$

$$\vec{V}_{\text{ref}} = \vec{V}_n t_n + \vec{V}_{n+1} t_{n+1}$$

$$V_{\alpha} + jV_{\beta} = \vec{V}_n t_n + \vec{V}_{n+1} t_{n+1}$$

$$V_{\alpha} = \vec{V}_{n,\alpha} t_n + \vec{V}_{n+1,\alpha} t_{n+1}$$

$$V_{\beta} = \vec{V}_{n,\beta} t_n + \vec{V}_{n+1,\beta} t_{n+1}$$

$$\vec{V}_1 = 1\angle 0^{\circ} \quad = \quad 1 + j0 \tag{1}$$

$$\vec{V}_2 = 1\angle 60^{\circ} \quad = \quad \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{2}$$

$$\vec{V}_3 = 1\angle 120^{\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{3}$$

$$\vec{V}_4 = 1\angle 180^{\circ} = -1 + j0 \tag{4}$$

$$\vec{V}_5 = 1\angle 240^{\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{5}$$

$$\vec{V}_6 = 1\angle 300^{\circ} = \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \tag{6}$$

$$\vec{V}_0(000) \ \vec{V}_1(100) \ \vec{V}_2(110)$$

$$\vec{V}_3(010) \ \vec{V}_4(011) \ \vec{V}_5(001)$$

$$\vec{V}_6(101) \ \vec{V}_7(111)$$

Sector 1 Sector 2 Sector 3 Sector 4 Sector 5 Sector 6

Cuadro 1: Secuencia de Conmutación de Siete Segmentos

Sector	1	2	3	4	5	6	7
I	$\vec{V}_0(000)$	$\vec{V}_1(100)$	$\vec{V}_2(110)$	$\vec{V}_7(111)$	$\vec{V}_2(110)$	$\vec{V}_1(100)$	$\vec{V}_0(000)$
II	$\vec{V}_0(000)$	$\vec{V}_3(010)$	$\vec{V}_2(110)$	$\vec{V}_7(111)$	$\vec{V}_2(110)$	$\vec{V}_3(010)$	$\vec{V}_0(000)$
III	$\vec{V}_0(000)$	$\vec{V}_3(010)$	$\vec{V}_4(011)$	$\vec{V}_7(111)$	$\vec{V}_4(011)$	$\vec{V}_3(010)$	$\vec{V}_0(000)$
IV	$\vec{V}_0(000)$	$\vec{V}_5(001)$	$\vec{V}_4(011)$	$\vec{V}_7(111)$	$\vec{V}_4(011)$	$\vec{V}_5(001)$	$\vec{V}_0(000)$
V	$\vec{V}_0(000)$	$\vec{V}_5(001)$	$\vec{V}_6(101)$	$\vec{V}_7(111)$	$\vec{V}_6(101)$	$\vec{V}_5(001)$	$\vec{V}_0(000)$
VI	$\vec{V}_0(000)$	$\vec{V}_1(100)$	$\vec{V}_6(101)$	$\vec{V}_7(111)$	$\vec{V}_6(101)$	$\vec{V}_1(100)$	$\vec{V}_0(000)$

Cuadro 2: Secuencia de Conmutación de Siete Segmentos

Sextante	1	2	3	4	5	6	7
I	\vec{V}_0	\vec{V}_1	\vec{V}_2	\vec{V}_7	\vec{V}_2	\vec{V}_1	\vec{V}_0
A	0	1	1	1	1	1	0
B	0	0	1	1	1	0	0
C	0	0	0	1	0	0	0
II	\vec{V}_0	\vec{V}_3	\vec{V}_2	\vec{V}_7	\vec{V}_2	\vec{V}_3	\vec{V}_0
A	0	0	1	1	1	0	0
B	0	1	1	1	1	1	0
C	0	0	0	1	0	0	0
III	\vec{V}_0	\vec{V}_3	\vec{V}_4	\vec{V}_7	\vec{V}_4	\vec{V}_3	\vec{V}_0
A	0	0	0	1	0	0	0
B	0	1	1	1	1	1	0
C	0	0	1	1	1	0	0
IV	\vec{V}_0	\vec{V}_5	\vec{V}_4	\vec{V}_7	\vec{V}_4	\vec{V}_5	\vec{V}_0
A	0	0	0	1	0	0	0
B	0	0	1	1	1	0	0
C	0	1	1	1	1	1	0
V	\vec{V}_0	\vec{V}_5	\vec{V}_6	\vec{V}_7	\vec{V}_6	\vec{V}_5	\vec{V}_0
A	0	0	1	1	1	0	0
B	0	0	0	1	0	0	0
C	0	1	1	1	1	1	0
VI	\vec{V}_0	\vec{V}_1	\vec{V}_6	\vec{V}_7	\vec{V}_6	\vec{V}_1	\vec{V}_0
A	0	1	1	1	1	1	0
B	0	0	0	1	0	0	0
C	0	0	1	1	1	0	0

Cuadro 3: Secuencia de Conmutación de Siete Segmentos

Sextante		1	2	3	4	5	6	7
I		\vec{V}_0	\vec{V}_1	\vec{V}_2	\vec{V}_7	\vec{V}_2	\vec{V}_1	\vec{V}_0
	A	0	1	1	1	1	1	0
	B	0	0	1	1	1	0	0
	C	0	0	0	1	0	0	0
		\vec{V}_0	\vec{V}_3	\vec{V}_2	\vec{V}_7	\vec{V}_2	\vec{V}_3	\vec{V}_0
II	A	0	0	1	1	1	0	0
	B	0	1	1	1	1	1	0
	C	0	0	0	1	0	0	0
		\vec{V}_0	\vec{V}_3	\vec{V}_4	\vec{V}_7	\vec{V}_4	\vec{V}_3	\vec{V}_0
	A	0	0	0	1	0	0	0
III	B	0	1	1	1	1	1	0
	C	0	0	1	1	1	0	0
		\vec{V}_0	\vec{V}_5	\vec{V}_4	\vec{V}_7	\vec{V}_4	\vec{V}_5	\vec{V}_0
	A	0	0	0	1	0	0	0
	B	0	0	1	1	1	0	0
IV	C	0	1	1	1	1	1	0
		\vec{V}_0	\vec{V}_5	\vec{V}_6	\vec{V}_7	\vec{V}_6	\vec{V}_5	\vec{V}_0
	A	0	0	1	1	1	0	0
	B	0	0	0	1	0	0	0
	C	0	1	1	1	1	1	0
V		\vec{V}_0	\vec{V}_1	\vec{V}_6	\vec{V}_7	\vec{V}_6	\vec{V}_1	\vec{V}_0
	A	0	1	1	1	1	1	0
	B	0	0	0	1	0	0	0
	C	0	0	1	1	1	0	0
		\vec{V}_0	\vec{V}_1	\vec{V}_6	\vec{V}_7	\vec{V}_6	\vec{V}_1	\vec{V}_0
VI	A	0	1	1	1	1	1	0
	B	0	0	0	1	0	0	0
	C	0	0	1	1	1	0	0
		\vec{V}_0	\vec{V}_1	\vec{V}_6	\vec{V}_7	\vec{V}_6	\vec{V}_1	\vec{V}_0
	A	0	1	1	1	1	1	0