



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“Implementación de un Controlador FOC para Motores Brushless con Encoder Utilizando STM32”

AUTOR:
RODRIGO FUENTES PEDREROS

SEMINARIO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO DE EJECUCIÓN EN ELECTRÓNICA

CONCEPCIÓN – CHILE
AÑO 2024



UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPTO. INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

“Implementación de un Controlador FOC para Motores Brushless con Encoder Utilizando STM32”

AUTOR

RODRIGO FUENTES PEDREROS

PROFESOR GUÍA:

ANGEL ERNESTO RUBIO

PROFESORES GUÍA ADJUNTO:

PEDRO MELIN COLINA

Índice

Objetivos	5
Resumen	6
Introducción	7
1 Estado del Arte	8
1.1 Control Trapezoidal	8
1.2 Control Directo de Torque (DTC)	9
1.3 Control FOC	9
1.4 Fundamentos del Control FOC	9
1.4.1 Transformada Clarke	10
1.4.2 Transformada Park	10
1.4.3 Controladores PI	10
1.4.4 Transformada Park Inversa	10
1.4.5 Modulacion de Espacio Vectorial	10
1.5 Análisis de Proyectos Existentes	11
1.5.1 Odrive	11
1.5.2 Vesc project	12
1.5.3 SimpleFOC	12
2 Diseño de Hardware para el Controlador FOC	13
2.1 Parametrización del Hardware para el Controlador FOC	13
2.1.1 Sensores de Corriente	13
2.1.2 Puente MOSFET	13
2.2 Implementación del Diseño Electrónico	13
3 Configuración del STM32 con STM32CubeMX	14
4 Implementación del Algoritmo de Control FOC	15
5 Validación y Pruebas de Control FOC	16
Comentarios y Conclusiones	17

Bibliografía	18
Anexos	20
Anexo A	20

Objetivos

Objetivo General

Implementar un controlador de tipo FOC (Control de Campo Orientado) para motores brush-less con encoder, utilizando un microcontrolador STM32, que sirva de base para un driver especializado en la robótica competitiva.

Objetivos Especificos

- Estudiar los principios del Control de Campo Orientado (FOC) y la modulación de espacio vectorial (SVM) para aplicarlos en el diseño del controlador.
- Diseñar el hardware para el controlador FOC, con los componentes mínimos necesarios para validar el funcionamiento.
- Configurar y programar el microcontrolador para el algoritmo FOC, utilizando las librerías HAL de STM32
- Validar el funcionamiento del controlador y proponer posibles mejoras para su aplicación en robótica competitiva.

Resumen

Introducción

Capítulo 1

Estado del Arte

1.1. Control Trapezoidal

El control trapezoidal, también llamado control de 6 pasos, es sin duda alguna el control más sencillo en términos de complejidad de algoritmo y requerimientos de hardware para el control de motores BLDC.

Este control se basa en seguir una secuencia de 6 pasos. En cada paso de la secuencia se polariza solo uno de los devanados del estator. Es decir, se deja una fase polarizada en positivo, una fase polarizada en negativo y otra fase apagada o en alta impedancia. Esta distribución es la que da origen a los 6 pasos. Cada paso se mantiene por 60 grados de giro y cada fase se mantiene polarizada por 120 grados [1].

Para realizar el cambio de fase, lo más común es el uso de las señales BEMF (Back Electromotive Force o fuerza electromotriz de retorno, por sus siglas en inglés). A esta forma de control trapezoidal se le denomina sensorless o sin sensor. Las señales de BEMF son relativamente sencillas de obtener utilizando una serie de resistencias en estrella para obtener un neutro virtual del bobinado y comparadores de voltaje para la detección del pulso en cada fase [2]. La desventaja es que estos pulsos a bajas velocidades son demasiado tenues para ser detectados, por lo que el motor debe realizar un arranque en lazo abierto para llegar a la velocidad mínima necesaria para tener pulsos de BEMF detectables de forma estable y desde ahí poder hacer el control en lazo cerrado, dando como resultado que estos motores tengan un casi nulo torque para el arranque, además de tiempos de arranque bastante altos [3].

Como solución a esto, se puede agregar el uso de sensores Hall ubicados estratégicamente frente a los imanes del rotor, con el fin de poder identificar en qué paso de la secuencia se encuentra el rotor. A esta configuración se le denomina sensed o con sensor, aunque es posible volver al uso de las señales BEMF después de cierta velocidad, ya que estas señales sufren menos latencia a alta velocidad que los sensores Hall.

De forma opcional, este control puede tener medición de corriente de la fuente de alimentación. Aunque esta medición solo se usa con fines de protección contra sobrecorriente y no tiene ningún efecto sobre el control de lazo cerrado estando dentro del límite establecido.

La mayor desventaja del control trapezoidal es su alto rizado en el torque del motor, lo que da como resultado un motor con baja eficiencia y precisión. Pero su sencillez y bajo coste lo hace ideal para su uso en radio controlados de pequeña escala como drones o autos [4].

1.2. Control Directo de Torque (DTC)

El control de torque directo (DTC) es una de las técnicas avanzadas de control para motores de corriente alterna, incluyendo los motores BLDC. Este método se caracteriza por su simplicidad en el algoritmo de control, fácil implementación digital y operación robusta. El principio del DTC se basa en controlar directamente el torque electromagnético y el flujo del estator del motor al ajustar el ángulo entre los vectores de flujo del estator y del rotor [5].

En el DTC, la magnitud del torque puede ser controlada directamente mediante el ángulo de torque, el cual es el ángulo entre el vector de flujo del estator y el vector de flujo del rotor. El principal objetivo es controlar el vector de flujo del estator ajustando la tensión del estator mediante vectores de tensión específicos seleccionados por el inversor. Esta técnica no requiere información sobre la velocidad o posición del rotor, lo que la hace inherentemente un método sin sensores [6].

El DTC se diferencia del control orientado al campo (FOC) en que no necesita modulaciones de ancho de pulso (PWM) complejas ni sensores de velocidad. En su lugar, utiliza una tabla de búsqueda y comparadores de histéresis para seleccionar los vectores de tensión adecuados en cada instante de tiempo. Los comparadores de histéresis tienen bandas de tolerancia que determinan cuándo incrementar o disminuir el flujo del estator y el torque [7].

Sin embargo, una de las desventajas del DTC es la presencia de altos niveles de rizado en el torque y en el flujo del estator, especialmente a bajas velocidades. Esto puede limitar su uso en aplicaciones que requieran alta precisión. Para mitigar estos efectos, se han desarrollado variantes como el DTC con modulación de vector espacial (DTC-SVM), que utiliza técnicas de PWM para generar la tensión, mejorando así la suavidad del control y reduciendo el rizado del torque y del flujo [7].

En resumen, el control DTC ofrece una alta respuesta dinámica y simplicidad en la implementación, pero presenta desafíos en términos de precisión y rizado del torque, lo que ha llevado al desarrollo de variantes más avanzadas para aplicaciones que demandan mayor exactitud.

1.3. Control FOC

1.4. Fundamentos del Control FOC

El control FOC es solo uno de los diversos técnicas de control para motores brushless o BLDC, existen otras técnicas como el control de 6 pasos, que es más usado en controladores ESC de drones por su simplicidad tanto de algoritmo como de hardware, ya que no requiere de un encoder para el feedback de posición y velocidad ni tampoco requiere estrictamente una medición de corriente, aun que los ESC de media-alta gama incorporan medición de corriente de bus para protección del motor. también existe el control directo de torque, que es más común su uso en

motores de media alta potencia, aun que existen algunos trabajos respecto a su aplicacion de motores brushless y BLCD, los cuales resaltan su beneficio en tiempos de respuesta y mayor simplicidad de algoritmo, no existen placas comerciales que implemente esta estrategia de control para su aplicacion en robotica.

1.4.1. Transformada Clarke

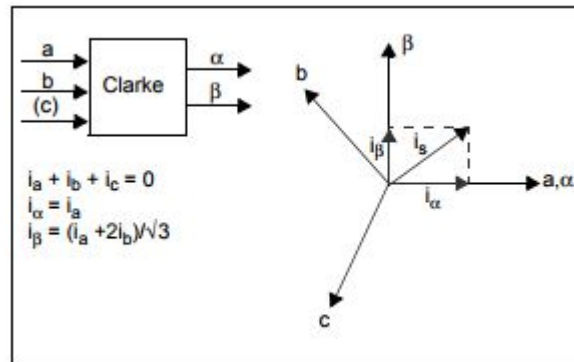


Figura 1.1: Transformada Clarke.

1.4.2. Transformada Park

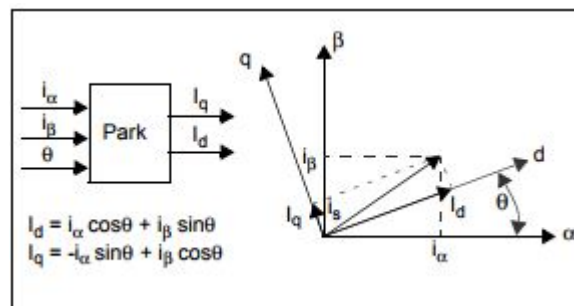


Figura 1.2: Transformada Park.

1.4.3. Controladores PI

1.4.4. Transformada Park Inversa

1.4.5. Modulacion de Espacio Vectorial

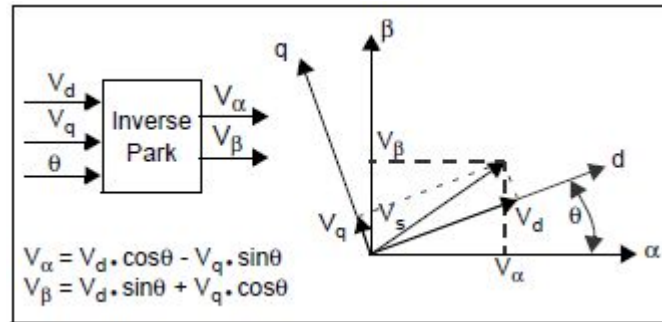


Figura 1.3: Transformada Park Inversa.

1.5. Análisis de Proyectos Existentes

1.5.1. Odrive

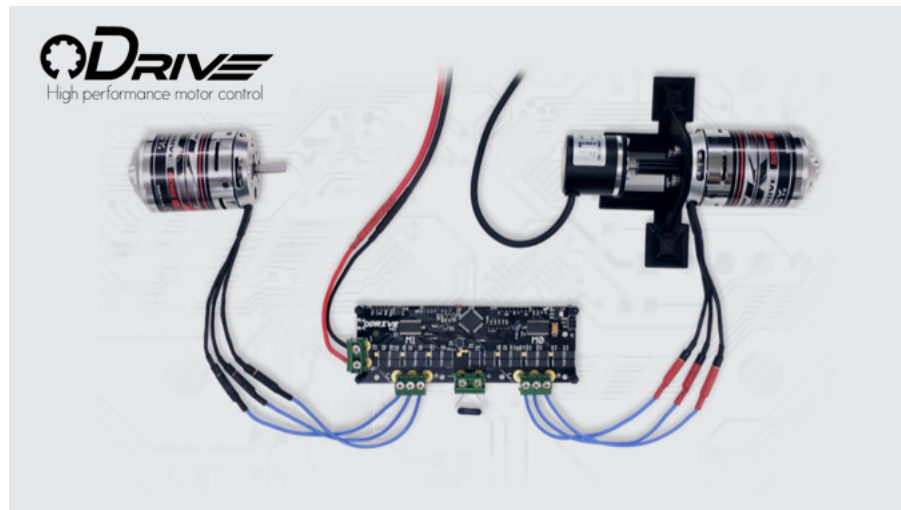


Figura 1.4: Odrive 3.6

Odrive es uno de los controladores FOC comerciales mas populares para su uso en robotica por su gran versatilidad en sus ajustes y un desempeño excelente para la mayoría de usos. internamente tiene opciones para control de torque, velocidad y posicion.

la version mas popular y generalmente usada es Odrive 3.6, puede controlar 2 motores de forma simultanea, con hasta 56V y 70A continuos por motor, su codigo es open source, aun que solo hasta la version 3.5 mantuvo el open hardware, pero actualmente estas versiones estan discontinuadas, ya que el desarrollador esta trabajando en la version Odrive PRO.

aun que Odrive tiene un pequeño problema en su forma de operar internamente y es que su bucle se ejecuta a 8000hz, con un PWM de 24.000hz, esto principalmente limita la electrica maxima que el motor puede controlar a un aproximado de 80.000 ERPM, lo que corresponde a 6 ciclos del bucle por cada giro electronico

1.5.2. Vesc project



Figura 1.5: Vesc 6

1.5.3. SimpleFOC



Figura 1.6: SimpleFOC

SimpleFOC [8] es una librería Open Source para implementar controladores FOC utilizando Arduino IDE o PlatformIO para compilar, este proyecto tiene como foco principal la facilidad de uso, siendo su principal uso en motores de tipo gimbal de baja potencia.

Capítulo 2

Diseño de Hardware para el Controlador FOC

2.1. Parametrización del Hardware para el Controlador FOC

2.1.1. Sensores de Corriente

2.1.2. Puente MOSFET

2.2. Implementación del Diseño Electrónico

Capítulo 3

Configuración del STM32 con STM32CubeMX

Capítulo 4

Implementación del Algoritmo de Control FOC

Capítulo 5

Validación y Pruebas de Control FOC

Este es un documento de ejemplo. Aquí hay una referencia a un libro [5, p 200].

Este es un documento de ejemplo. Aquí hay una referencia a un libro [9, p 200].

Este es un documento de ejemplo. Aquí hay una referencia a un libro [10].

Comentarios y Conclusiones

Bibliografía

- [1] Patrick Fisher. «High Performance Brushless DC Motor Control». Final year research project report submitted in partial fulfillment of the coursework requirements for the degree of Bachelor of Engineering. Bachelor of Engineering Thesis. School of Engineering & Technology, CQUniversity Australia, mayo de 2014, pág. 3. URL: <https://www.ti.com/lit/an/sprt703/sprt703.pdf>.
- [2] Jianwen Shao. «Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives». Tesis de maestría. Blacksburg, Virginia: Virginia Polytechnic Institute y State University, 2003, págs. 11-16. URL: <http://educyclopedia.karadimov.info/library/T.pdf>.
- [3] Matias Gualtieri Lara. «Sensorless Brushless DC Motors. Development and comparison of different fault tolerant control algorithms». Relatore: Prof. Paolo Maggiore. Tesi di Laurea Magistrale. Corso di laurea magistrale in Ingegneria Aerospaziale: Politecnico di Torino, mar. de 2018, págs. 26-28. URL: <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/6891>.
- [4] Roger Juanpere Tolrà. *Técnicas de control para motores Brushless: Comparativa entre conmutación Trapezoidal, conmutación Sinusoidal y Control Vectorial*. C./Llacuna 162, Barcelona - Spain: ingenia-cat - Motion Control Department. URL: https://www.motronic.es/upfiles/taller_img/files/mantenimiento-y-reparacion-de-servomotores-es_2595.pdf.
- [5] Bin Wu. *High-Power Converters and AC Drives*. 1.^a ed. Hoboken, NJ: Wiley-IEEE Press, 2006, págs. 310-314. ISBN: 978-0471731719. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=5237895>.
- [6] Patrick Fisher. «High Performance Brushless DC Motor Control». Final year research project report submitted in partial fulfillment of the coursework requirements for the degree of Bachelor of Engineering. Bachelor of Engineering Thesis. School of Engineering & Technology, CQUniversity Australia, mayo de 2014, págs. 5-8. URL: <https://www.ti.com/lit/an/sprt703/sprt703.pdf>.
- [7] Vladislav M. Bida, Dmitry V. Samokhvalov y Fuad Sh. Al-Mahturi. «PMSM Vector Control Techniques — A Survey». En: *2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. Moscow y St. Petersburg, Russia: IEEE, 2018, págs. 1-4. DOI: 10.1109/EIConRus.2018.8317164.
- [8] Antun Skuric et al. «SimpleFOC: A Field Oriented Control (FOC) Library for Controlling Brushless Direct Current (BLDC) and Stepper Motors». En: *Journal of Open Source Software* 7.74 (jun. de 2022), pág. 4232. DOI: 10.21105/joss.04232. URL: <https://doi.org/10.21105/joss.04232>.

- [9] Microchip Technology Inc. *Sensored (Encoder-Based) Field Oriented Control of a Three Phase Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM)*. AN2757. Abr. de 2018. URL: <https://www.microchip.com/en-us/application-notes/an2757>.
- [10] Oskar Weigl. *ODrive Firmware*. <https://github.com/odriverobotics/ODrive/blob/fw-v0.5.6/Firmware/MotorControl/utils.cpp>. Función SVM, líneas 10-123, TAG:fw-v0.5.6.

Anexo A