

# Control vectorial para motores lineales de una plataforma de nanoposicionamiento

Lucía Díaz Pérez<sup>1</sup>, Marta Torralba<sup>2</sup>, José A. Albajez<sup>1</sup>, José A. Yagüe Fabra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Ingeniería de Fabricación y Metrología Avanzada (GIFMA),  
Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)  
Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.  
Tel. +34-976762707, e-mail: [lcdiaz@unizar.es](mailto:lcdiaz@unizar.es)  
<sup>2</sup>Centro Universitario de la Defensa, Zaragoza, Spain

## Abstract

Una plataforma de posicionamiento en 2D (NanoPla) a resolución nanométrica y con un amplio rango de trabajo ( $50 \times 50 \text{ mm}^2$ ) se está desarrollando. El movimiento en XYRz de la plataforma es realizado por cuatro motores lineales. Este artículo se centra en la implementación del control vectorial en un motor lineal.

## Introducción

La importancia de la nanotecnología y la nanofabricación en las últimas décadas está aumentando. Las plataformas de nanoposicionamiento son fundamentales en aplicaciones como máquinas-herramientas de nanofabricación o máquinas de medición. En esta línea de investigación, la plataforma que está en desarrollo será capaz de proporcionar un posicionamiento efectivo a escala nanométrica con un amplia área de movimiento de  $50 \times 50 \text{ mm}^2$  [1].

La NanoPla consiste en tres etapas: una base fija inferior, una plataforma móvil y una base fija superior. Cuatro motores lineales hechos a encargo mueven la plataforma que levita gracias a rodamientos de aire. Los motores lineales consisten en un estator de tres fases y un camino magnético [2] que están fijos a la plataforma móvil. Cada motor lineal produce una fuerza horizontal (en el plano de movimiento) y otra vertical. Los motores están dispuestos de manera simétrica, para que cada par paralelo genere una fuerza en el eje X e Y, respectivamente. La fuerza vertical generada por los motores debe ser constante. Tres interferómetros láser de espejo plano miden los desplazamientos y la rotación (XYRz) en el plano XY.

Antes de desarrollar el control de los cuatro motores lineales, en este artículo se ha desarrollado la implementación del control vectorial en un motor que se mueve en 1D. En un trabajo anterior [2], el

funcionamiento de los motores fue caracterizado y el bucle de control de la posición en 1D y 2D fue definido. Este trabajo se ha realizado previamente a la implementación de los interferómetros láser, por esta razón se usa un algoritmo *sensorless* que funciona como un sensor de posición.

## Materiales y Metodología

Para realizar el control del motor se ha seleccionado la tarjeta DRV8302-HC-C2-KIT de Texas Instruments, diseñada para trabajar con motores síncronos de imanes permanentes, incluso para aplicaciones en tiempo real.

La validación experimental se ha realizado en una configuración que consiste en una guía lineal en 1D, que ya fue usada en [3] para la caracterización experimental de la función de transferencia del motor (Figura 1).

La estrategia de control tiene como consigna la posición deseada ( $x_{ref}$ ) y un valor constante para la fuerza vertical,  $F_z$ . El controlador principal calcula la fuerza horizontal,  $F_x$ , necesaria para llegar a la posición deseada. El control calcula las tensiones de fase ( $V_{an}^*$ ,  $V_{bn}^*$  and  $V_{cn}^*$ ) necesarias para producir las corrientes de fase ( $I_a$ ,  $I_b$  and  $I_c$ ) que generan las fuerzas horizontal y vertical requeridas, según la ley de conmutación. Las tensiones de fase son generadas por medio de señales PWM. La tarjeta dispone de sensores amplificadores de corriente que leen las intensidades de fase, que son realimentadas al control. Además, las tres fases del motor están conectadas en estrella, lo que fuerza que la suma de las tres intensidades de fase sea nula.

## Ley de Conmutación

Como ya fue explicado en detalle en [3], existe una relación matemática entre las corrientes de fase del motor ( $I_a$ ,  $I_b$  e  $I_c$ ) y las fuerzas horizontal y vertical

generadas ( $F_x$  y  $F_z$ ) que es definida por la ley de conmutación (Ecuación 1):

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \cos(kx_0 + \phi) & \cos\left(kx_0 - \frac{2\pi}{3} + \phi\right) & \cos\left(kx_0 + \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \\ \sin(kx_0 + \phi) & \sin\left(kx_0 - \frac{2\pi}{3} + \phi\right) & \sin\left(kx_0 + \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

Los términos A y k son parámetros constantes del motor y  $x_0$  es el desplazamiento relativo entre estator y el camino magnético a lo largo del eje de movimiento. Varios experimentos se han llevado a cabo para demostrar este comportamiento teórico de los motores lineales. Asimismo, en la caracterización experimental aparece un desfase,  $\phi$ , debido a la posición inicial considerada para  $F_x$  y  $F_z$ .

### Control Vectorial

Según la Ecuación 1, no es posible controlar las fuerzas por separado actuando directamente en las intensidades de fase. Con el fin de desacoplar el control de las dos fuerzas, se ha realizado la descomposición Clarke-Park en las intensidades de fase [4]. Las corrientes ortogonales  $I_d$  y  $I_q$  son definidas por la Ecuación 2:

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(kx_0 + \phi) & \cos\left(kx_0 - \frac{2\pi}{3} + \phi\right) & \cos\left(kx_0 + \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \\ \sin(kx_0 + \phi) & \sin\left(kx_0 - \frac{2\pi}{3} + \phi\right) & \sin\left(kx_0 + \frac{2\pi}{3} + \phi\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

Combinando las Ecuaciones 1 y 2, se obtiene la Ecuación 3:

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} \quad (3)$$

Cuando se realiza una transformada Clarke-Park en motores rotativos,  $I_d$  controla el flujo magnético del motor, mientras  $I_q$  controla el par generado. El motor objeto de este artículo es un motor lineal y la transformada Clarke-Park tiene un efecto distinto: establece una relación lineal entre  $I_d$  y  $F_x$  y  $I_q$  y  $F_z$ . Esto permite controlar cada fuerza por separado en tiempo real, usando dos controladores PI que tendrán como entrada la diferencia entre las corrientes consigna ( $I_{dref}$  y  $I_{qref}$ ) y la corriente leída ( $I_d$  y  $I_q$ ). La salida de los controladores serán las tensiones  $U_d$  y  $U_q$  capaces de producir esas intensidades. Aplicando una transformada Clarke-Park inversa, se obtienen las tensiones de fase correspondientes (ver Figura 2).

### Conclusiones

Este trabajo añade un control vectorial a la estrategia de control presentada en [3] para un motor lineal. Por medio de una transformada Clarke-Park se desacopla el control de las fuerzas verticales y horizontales. Esto permite controlar la fuerza vertical en un bucle independiente, cosa que

no era posible con la estrategia de control previa. Además, se añade un bucle interno al control de la posición, lo que mejora su funcionamiento. Como trabajo futuro, el sensor de posición será integrado en el control y esta estrategia de control deberá ser extendida a los cuatro motores de la NanoPla trabajando conjuntamente.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto del gobierno español DPI2015-69403-C3-1-R y UZCUD2016-TEC-09, con la colaboración de DGA-FSE. El programa FPU del MECD ha patrocinado a la primera autora.

### REFERENCIAS

- [1]. TORRALBA, M., et al. Large range nanopositioning stage design: A three-layer and two-stage platform. *Measurement*. 2016, 89, 55–71.
- [2]. TRUMPER, D., et al. Design and analysis framework for linear permanent magnet machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1996, 32(2), 371–379.
- [3]. TORRALBA, M., et al. Preliminary Modelling and Implementation of the 2D-control for a Nanopositioning Long Range Stage. *Procedia Engineering*. 2015, 132, 824–31.
- [4]. KIM, W., et al. Modeling and Vector Control of Planar Magnetic Levitator. *IEE Transactions on industry applications*. 1998, 34(6), 1254-1262.

### FIGURAS



Figura 1. Configuración experimental con guía lineal

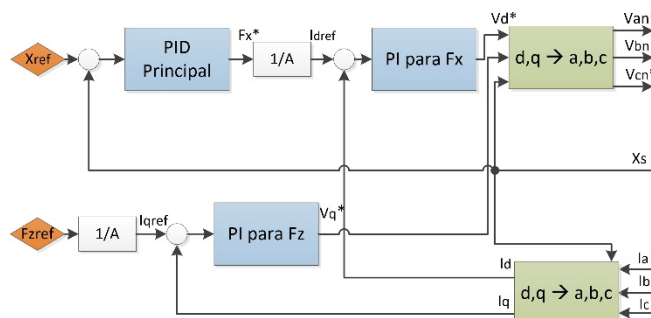


Figura 2. Estrategia de control con control vectorial