

Desarrollo de un Convertidor Matricial desde las fórmulas matemáticas hasta el prototipo físico

Matrix Converter development from the math formulas to the hardware prototype

Presentación: 28/09/2024

Maximiliano Bernardo

UTN FRD

mbernardo@frd.utn.edu.ar

Javier Coky

UTN FRD

jcoky@frd.utn.edu.ar

Luis Perna

UTN FRD

lperna@frd.utn.edu.ar

Eduardo Arostegui

UTN FRD

earostegui@frd.utn.edu.ar

Emiliano Marinucci

UTN FRD

emarinucci@frd.utn.edu.ar

Hernan Martinez Reina

UTN FRD

hmartinezreina@frd.utn.edu.ar

Joel Atia

UTN FRD

jatia@frd.utn.edu.ar

Gabriel Pitter

UTN FRD

gpitter@frd.utn.edu.ar

Resumen

Se presentan aspectos del desarrollo de un Convertidor Matricial con modulación mediante Vector Espacial desde el modelo teórico abstracto representado por expresiones matemáticas hasta la construcción del prototipo. Se presentan las fórmulas básicas, un modelo en Matlab© generado a partir de éstas, que se utilizó para la simulación del proyecto, y la traslación de este modelo de simulación a un programa en C++ que se ejecuta en un microprocesador.

Palabras clave: Convertidor matricial, modulación del vector espacial.

Abstract

This work shows aspects of the development of a Space Vector Modulation Matrix Converter from the theoretical abstract model represented through mathematical formulas up to the construction of a prototype. The basic formulas are shown, a Matlab© model generated from these expressions, which was used for the project simulation, and the translation of this simulation model to a C++ program that is executed in a microprocessor.

Keywords: Matrix converter, space vector modulation.

1-Introducción

El presente trabajo surge como parte de un proyecto en curso en el Grupo de Investigación en Electrónica de Potencia de la Facultad Regional Delta de la Universidad Tecnológica Nacional consistente en el desarrollo de un convertidor matricial de corriente alterna trifásica de frecuencia variable a corriente alterna trifásica de frecuencia fija, con la intención de emplearlo en aerogeneradores eliminando la regulación de velocidad de estos. Al presente el trabajo se encuentra en la fase de construcción de un prototipo, del cual solamente se dispone de los circuitos de control de disparo y las interfases de potencia de excitación de los IGBT's. El desarrollo efectuado hasta el momento ha requerido atravesar distintas etapas, descritas en este trabajo, desde la transformación de conceptos teóricos en programas de simulación y luego la implementación de éstos sobre un microcontrolador. La primera de ellas consistió en partir del modelo matemático de la técnica de Modulación del Vector Espacial, para luego implementarlo en un entorno de Simulación por Software. Se realizó en primer lugar la simulación partiendo de principios totalmente teóricos (modelo de Venturini Alessina) aplicado a un variador de velocidad de un motor asincrónico con carga de ventilador, y luego la misma simulación pero implementando la modulación de vector espacial, ambos presentados oportunamente (Perna et al., 2017, 2022). A partir de este punto se requirió pasar a la etapa siguiente que consiste en transformar este modelo de simulación por software a la implementación en un prototipo funcional que realice la conversión de frecuencias. Como parte del desarrollo se diseñó el circuito de control de conducción de los IGBT y el software de control.

El Convertidor Matricial, si bien es conocido desde hace tiempo, partiendo de los trabajos pioneros de Venturini Alessina (Venturini, Alessina, 1980) pasando por diversos trabajos (Rodriguez et al., 2002, 2012), (Jusilla, 2007), no tiene aún un desarrollo importante en aplicaciones comerciales, destacándose la existencia de variadores de frecuencia Yaskawa basados en este método (Yaskawa Electric Corporation, 2014). También es objeto de tratamiento en libros de texto, aplicados a sistemas de generación eléctrica renovables (Fang, Hong, 2013).

El Convertidor Matricial convierte tensiones y corrientes m -fásicas de entrada a tensiones y corrientes n -fásicas a su salida. Esta facilidad de convertir de m a n fases e incluso variar los niveles de tensión a voluntad mediante la modulación de la conducción de las llaves del convertidor, hace que el Convertidor Matricial sea designado también como "transformador universal".

El funcionamiento del método de Modulación Espacial (SVM) es ampliamente conocido y de aplicación hoy en día prácticamente universal en los variadores de frecuencia comerciales para motores de CA, como por ejemplo en los mandos de Control Digital Directo (DTC) de ABB a partir de rectificación y DC Link. Se lo encuentra desarrollado en la literatura y en textos clásicos desde hace años (Vas, 1998).

La aplicación de un convertidor matricial a un aerogenerador permitiría que, dentro de cierto rango de velocidades del alternador, se pueda convertir directamente de CA trifásica de frecuencia variable a CA trifásica de frecuencia fija. El método tiene la ventaja de eliminar el DC Link, pero tiene también sus inconvenientes, tales como las limitaciones en el rango de tensión en el que es posible la regulación, la imposibilidad de sostener durante un período corto (fracciones de segundos) la tensión de salida ante una desconexión del aerogenerador justamente a causa de la falta del DC link. Esto constituye un inconveniente para la operación en microrredes para cumplir con regulaciones (IEEE Standards Coordinating Committee 21, 2011) tema a estudiar una vez que se tenga un prototipo funcionando.

2-Desarrollo

2-1-Programación

El trabajo que se describe a continuación es la traslación del modelo de simulación del Convertidor matricial realizado con Matlab© Simulink© en un trabajo previo (Perna et al., 2022), a un programa ejecutable en tiempo real sobre un microcontrolador ARM empleando una placa de desarrollo EDU-CIAA-NXP, de la serie Computadora Industrial Abierta Argentina (<https://www.proyecto-ciaa.com.ar/>). Esta placa tiene una gran flexibilidad dado su código y *hardware* abiertos y su velocidad es compatible con la necesaria para poder excitar los elementos de potencia adecuadamente. Posee salidas PWM que son útiles en esta aplicación (Lutenberg et al., 2022) (NXP, 2019).

Esta traslación se realizó empleando el lenguaje de programación C++, que tiene la ventaja de ser de relativamente bajo nivel haciéndolo apto para trabajar en tiempo real, es fácilmente enlazable con lenguaje

ensamblador en caso de requerirse altas velocidades de ejecución y existe una amplia cantidad de bibliotecas disponibles para tareas de tiempo real.

El método de modulación por vector espacial (SVM) utiliza la representación de vectores espaciales de las corrientes (tensiones) m-fásicas de entrada y las corrientes (tensiones) n-fásicas de línea de la salida de un Convertidor Matricial (Rodríguez et al., 2012, Jussila, 2007). En nuestro caso el Convertidor a implementar es trifásico a trifásico (3 entradas a 3 salidas).

Se genera un vector espacial de tensión de salida de referencia que idealmente representa las tensiones de línea deseadas. Luego se transforman las tensiones de entrada mediante el convertidor matricial para aproximar la salida real al vector espacial de referencia.

El Vector Espacial para valores instantáneos de variables trifásicas, corriente o tensión, es definido, en forma genérica, por la expresión siguiente:

$$x = \frac{2}{3}(x_a + ax_b + a^2x_c) \tag{1}$$

donde x es el Vector Espacial, x_a, x_b y x_c son los valores instantáneos de las variables trifásicas y $a = e^{j2\pi/3}$.

Esta ecuación se ha modelado para simulación en el trabajo antes citado según se ilustra en la Figura 1

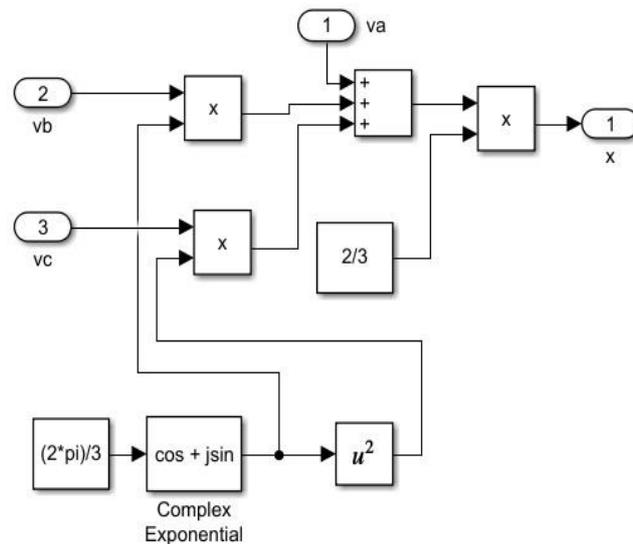


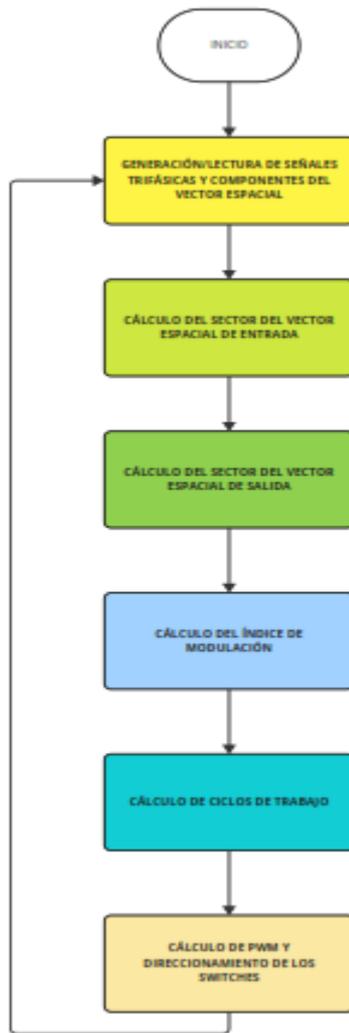
Figura 1. Modelado del Vector Espacial.

En este modelo las entradas v_a, v_b y v_c representan x_a, x_b y x_c de la (1) respectivamente, y la salida x , la variable instantánea x de la (1). El modelo proporciona en cada instante el valor del módulo y el ángulo del Vector Espacial. La Figura 2 presenta el diagrama de flujo simplificado en (a) y el código en (b) implementado con el auxilio de la biblioteca <cmath> que contiene una serie de funciones trigonométricas y exponenciales entre otras.

El ángulo del Vector Espacial entre 0° y 360° se divide en 6 sectores de 60° y se requiere conocer en cada instante el sector donde se encuentra y el ángulo dentro del sector del Vector Espacial de entrada como el de salida.

Esta lógica se modeló oportunamente con Matlab© Simulink© como se presenta en la Figura 3 (a) respondiendo al diagrama vectorial de la Figura 3 (b) para luego codificarla en C++ según la Figura 3 (c).

Los 6 vectores que determinan los sectores de entrada y salida del vector espacial son vectores directrices que describen al vector espacial cuando éste tiene el ángulo coincidente con alguno de ellos. Cuando el vector espacial se encuentra entre dos vectores directrices su determinación es a partir de una combinación de los vectores directrices correspondientes aplicando la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM) (Rodríguez et al., 2012). De esta manera se requiere un ciclo de trabajo para cada vector dentro de un período de muestreo del vector espacial.



a. Diagrama de flujo simplificado

```

#include <cmath>
double va, vb, vc, vre, vim, vmod, vang, vang_s;

vre = ((0.666)*(va-0.5*vb-0.5*vc));
vim = ((0.666)*(((sqrt(3)/2)*vb)-((sqrt(3)/2)*vc)));
vmod = sqrt(vre*vre+vim*vim);
vang = (atan(vim/vre))*(180.0/M_PI);

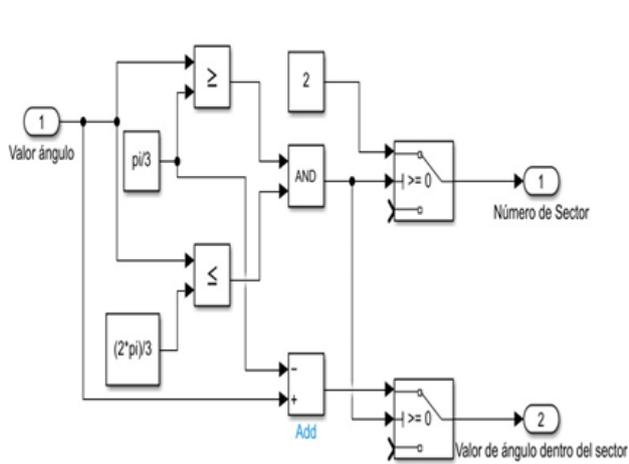
if(vre<0) {
    vang = vang + 180.0;}
if(vre>0 && vim<0){
    vang = vang + 360.0;
}
  
```

b. Código de programación en C++

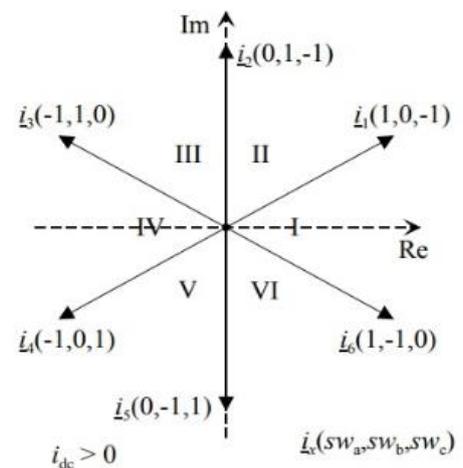
Figura 2. Código C++ para el Vector Espacial

La combinación de los 4 vectores, 2 de salida y 2 de entrada, determina en cada período de muestreo la posición y el ángulo del vector espacial deseado. En algunos períodos es necesario el vector nulo para completar la formación del vector espacial. Los ciclos de trabajo se calculan en la simulación en Matlab© Simulink© y en la programación en C++ utilizando su definición matemática. De acuerdo con el sector donde se encuentra el vector espacial de entrada (I, II, III, IV, V o VI) y al sector donde está el vector espacial de salida (I, II, III, IV, V o VI) queda definida la secuencia de los PWMs y los Transistores Bipolares de Compuerta Aislada (IGBT) que deben ser activados en cada secuencia. Esto nos proporciona cuáles de las 3 fases de entrada se conecta con cada fase de salida y con qué ciclo de trabajo.

El código de control de excitación de las llaves del convertidor se corrió en un simulador Proteus 8 Professional y verificado su correcto funcionamiento se cargó definitivamente en la placa CIAA verificándose el funcionamiento de la secuencia de excitación a los IGBT's, a una frecuencia del PWM de 5 KHz.



a. Modelado con Matlab© Simulink©



b. Diagrama de vectores directrices

```

if (vang >= 330 && vang <= 360) {
    sector_actual = 1;
    ang = vang - 330;
} else if (vang >= 0 && vang < 30) {
    sector_actual = 1;
    ang = vang + 30;
} else if (vang >= 30 && vang < 90) {
    sector_actual = 2;
    ang = vang - 30;
} else if (vang >= 90 && vang < 150) {
    sector_actual = 3;
    ang = vang - 90;
} else if (vang >= 150 && vang < 210) {
    sector_actual = 4;
    ang = vang - 150;
} else if (vang >= 210 && vang < 270) {
    sector_actual = 5;
    ang = vang - 210;
} else {
    sector_actual = 6;
    ang = vang - 270;
}

```

c. Código de programación en C++

Figura 3. Determinación de sector y ángulo del Vector Espacial

2-2- Implementación del Hardware

El programa se montó sobre la placa EDU-CIAA-NXP que posee un procesador ARM Dual Core de 32-bit Cortex-M4F / Cortex-M0 LPC 4337 con frecuencia de reloj de 208 MHz, 1 MB flash y 136 kB SRAM. Se diseñó una interfase para la excitación de cada llave de conmutación de la matriz, denominada Unidad Básica de Disparo (UBD). Esta recibe desde la placa de control la orden de disparo para cada elemento de la llave conmutación, conformada por dos IGBT's en serie con diodos *freewheel* conectados en antiparalelo para conducir en ambos sentidos. La UBD provee señales de realimentación a la placa de control sobre detección de fallas y reset. Cada UBD tiene su propia fuente de alimentación independiente de las restantes debido a que cada uno de los IGBTs se encuentran a distinto potencial. El diseño se basó en el circuito integrado *gate driver* UCC21750 de Texas Instruments, el cual provee, además de la correspondiente aislación galvánica entre control y potencia, protección contra

cortocircuitos a partir del valor de la dV_{ce}/dt de los transistores de potencia. La placa incluye un sensor de corriente de efecto Hall, ACS758, de modo que la UDB provee sendas salidas de control indicando presencia de corriente en uno u otro sentido respectivamente, así como una salida analógica proporcional al valor de corriente en el interruptor.

3-Conclusiones

Hasta este momento del desarrollo hemos verificado que las expresiones matemáticas que establecen el comportamiento del Convertidor Matricial con modulación del Vector Espacial, funcionan correctamente implementadas en un hardware real. En este momento hay más trabajo futuro que conclusiones, ya que se deberá continuar con diversas fases que incluyen el análisis del comportamiento de las llaves con cargas inductivas y eventuales modificaciones al software ya desarrollado para lograr el apagado correcto de las llaves, avanzar en el diseño y construcción de prototipos para prueba del convertidor en modo frecuencia fija a variable con un motor real para recién pasar a realizar ensayos con el mismo funcionando como convertidor de frecuencia variable a fija. En este punto se deberán diseñar e implementar algoritmos de control adecuados para mantener frecuencia y tensión de salida.

4-Referencias

Fang Lin Luo, Hong Ye, (2013) "Renewable Energy Systems, Advanced Conversion Technologies and Applications", CRC Press. Taylor & Francis Group. ISBN: 13: 978-1-4398-9110-0 (eBook - PDF)

IEEE Standards Coordinating Committee 21 on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage (2011) "IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems. IEEE-SA Standards Board

Jussila, M., (2007). "Comparison of Space-Vector-Modulated Direct and Indirect Matrix Converters in Low Power Applications", Thesis (Doctor of Technology), Tampere University of Technology, Tampere Finlandia, 148.

Lutenberg, A., Gomez, P., Pernia, E., (2022). "A Beginner's Guide to Designing Embedded System Applications on Arm® Cortex®-M Microcontrollers", Arm Education Media, 978-1-911531-42-5.

NXP, (2019)"UM10503 - LPC43xx/LPC43Sxx ARM Cortex®-M4/M0 multi-core microcontroller User Manual"

Perna L., Arostegui, E., Marinucci, E., Pitter, G., Bernardo, M., Coky, J., Elias, E., (2017). "Simulación de una aplicación real de un Convertidor Matricial Directo".

Perna L., Arostegui, E., Marinucci, E., Pitter, G., Bernardo, M., Coky, J., Martínez Reina, H., Mezzelani, E., (2022). "Simulación de un Convertidor Matricial utilizando el método de Modulación Espacial".

Rodriguez, J., Silva E., Burgos E., Blaabjerk F., (2002) "Modelling, Analysis and Simulation of Matrix Converters". Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

Rodriguez, J., Rivera, M., Johan W. Kolar, J., Wheeler, P., (2012). "A Review of Control and Modulation Methods for Matrix Converters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 59, (NO. 1), 58-70.

Vas, P. (1998) *Sensorless Vector and Direct Torque Control*. U.S.A. Oxford University Press. ISBN-10: 01-9856-465-1 ISBN-13: 978-01-9856-465-2

Venturini M. and Alesina A., (1980) "The generalized transformer: A new bidirectional sinusoidal waveform frequency converter with continuously adjustable input power factor", Proc. IEEE PESC 80, pp. 242-252.

Yaskawa Electric Corporation. "Low Harmonic Regenerative Drive for Industrial Applications - U1000 Industrial Matrix Drive -Technical Manual Manual" Manual N°. SIEP C710636 04D (2014)

<https://www.proyecto-ciaa.com.ar/> "Página oficial Proyecto CIAA"