

CONTROL VECTORIAL DE LA MAQUINA DE INDUCCION.

Vector Control of the Induction Machine

RESUMEN

Este artículo presenta las ventajas de los sistemas de control vectorial por campo orientado aplicados a las máquinas rotativas. La técnica de control vectorial indirecto es aplicada al modelo de la máquina de inducción para obtener un desacople del flujo y el par y así poder realizar un control a través de las corrientes de eje directo y cuadratura. Las pruebas realizadas sobre la máquina muestran la funcionalidad de la estrategia de control presentada ante variaciones en la velocidad y el torque en el eje de la máquina de inducción.

PALABRAS CLAVES: Control Vectorial Indirecto, Máquina de Inducción.

ABSTRACT

This article presents the advantages of the vector control systems on rotative electrical machines. The indirect vector control technique is used over the induction machine model in order to obtain a decoupling relationship between the flux and the torque. Thus we can make the control of the machine through the direct and quadrature currents. The results show the behavior of the control strategy when variations in the speed and the torque are presented.

KEYWORDS: *Indirect Vector Control, Induction Machine.*

ALFONSO ALZATE GOMES

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
alalzate@utp.edu.co

ANDRES ESCOBAR MEJIA

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
Estudiante Ph.D
University of Arkansas EE. UU
andreses1@utp.edu.co

CARLOS ANDRES TORRES

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Estudiante Ph.D
Universitat Rovira I Virgili España
carlosandrestorresp@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

A nivel industrial es bien conocido que la máquina rotativa más empleada para el manejo de procesos a velocidad constante es la máquina de inducción jaula de ardilla dado que es altamente eficiente, libre de mantenimiento, sencilla, robusta y económica.

El avance en la electrónica de potencia ha facilitado la implementación de accionamientos eléctricos que permiten ajustar y variar la velocidad en el eje de la máquina de inducción logrando ejercer un control sobre el par y la velocidad, a su vez que se logra mantener el comportamiento dinámico de la misma en valores deseados [1], [2].

En la actualidad entre las técnicas que permiten el control independiente de la velocidad y del par en la máquina de inducción son el control directo del par y el control de campo orientado denominado control vectorial, las cuales logran el desacoplamiento que existe entre las bobinas de estator y del rotor, y que impide un comportamiento similar al de la máquina de corriente continua.

El control directo del par es una técnica poco utilizada debido a que se necesita estimar el flujo y el torque en la máquina, además de un control sobre cada una de estas variables, haciendo que la técnica se vuelva más compleja representando mayores costos. El control

vectorial por el contrario es más utilizado debido a su simplicidad, dentro de este, en el método indirecto solamente se requiere estimar la posición angular de la máquina, la cual se obtiene de integrar la velocidad instantánea en el eje de la misma [3].

Para realizar el estudio de la máquina de inducción es necesario utilizar un modelo matemático que represente su funcionamiento, para este caso se hará uso del modelo obtenido a partir del circuito equivalente presentado en [4], el cual se encuentra en términos de los flujos de enlace. Este modelo está referido a los ejes en cuadratura q y directo d , por tal motivo es necesario realizar el proceso de transformación de variables trifásicas a ejes d - q y viceversa [5]. Debido a que es posible realizar la transformación de variables, es muy común encontrar el sistema de ecuaciones que describen el funcionamiento de la máquina de inducción en términos bien sea de corrientes, flujos o tensiones, dependiendo de la necesidad y el uso que se le dese dar.

Al modelo aquí utilizado le se aplicará la técnica de control vectorial indirecto, alimentando la máquina mediante voltajes trifásicos que varían según las entradas que se tengan como referencia en el controlador [6]. Para el cumplimiento de los objetivos se pretende realizar una comparación del comportamiento de la máquina con y sin control, para lo cual se hará uso del estudio matemático desarrollado y de una herramienta de

simulación, la cual permitirá de manera práctica modelar y representar los resultados obtenidos mediante diagramas de bloques.

2. MODELO MATEMATICO DE LA MAQUINA DE INDUCCION

La máquina de inducción, debido a sus características constructivas y su naturaleza de funcionamiento, es un sistema de gran complejidad; lo que lo hace difícil de analizar y modelar. Algunos modelos encontrados se basan en diversas idealizaciones con el objetivo de obtener un modelo de orden reducido. La desventaja con esta metodología es que con los modelos reducidos no puede describir por completo el sistema a controlar. Con este mismo objetivo, son también utilizados cambios de variables que permiten obtener modelos más simples para el motor de inducción, sin implicar idealizaciones de la máquina.

En la literatura donde se estudia problemas del control de motor de inducción, el modelo es presentado de diversas formas distintas, ya sea en términos de los flujos de enlace [3], corrientes [4], voltajes [5]. Estas diferentes formas de presentación del modelo del motor de inducción se relacionan entre sí por cambios de variables y se pueden obtener fácilmente una de otras.

2.1 Ecuaciones de la Máquina

Con el fin de establecer las distintas estrategias que permiten el control de los motores de inducción, se muestran de forma sistemática las ecuaciones que rigen el funcionamiento de estas máquinas eléctricas, estas son las ecuaciones de tensión y par en términos de las variables de la máquina expresadas en los ejes de referencia variable.

Como se acostumbra en la determinación de modelos matemáticos, se asumirán las condiciones ideales presentadas en [7] y las cuales facilitan el desarrollo del modelo sin afectar de manera significativa las variables.

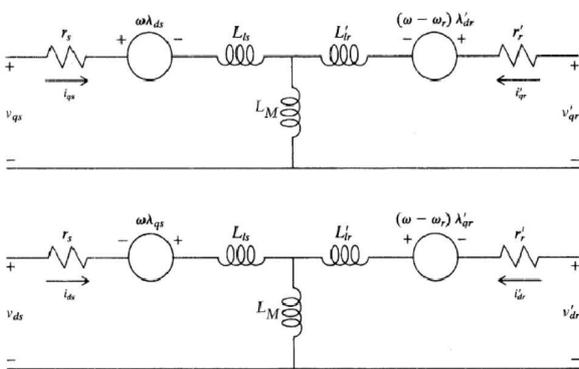


Figura 1. Circuito equivalente d-q de la máquina de inducción.

El modelo, que es obtenido a partir del circuito dinámico equivalente para la maquina (Figura 1), es el modelo de Krause presentado en [3]. De acuerdo a este modelo las ecuaciones en términos de los enlaces de flujo son:

$$\frac{d\varphi_{qs}}{dt} = \omega_b \left[V_{qs} - \frac{\omega_e}{\omega_b} \varphi_{ds} + \frac{R_s}{X_{ls}} (\varphi_{mq} + \varphi_{qs}) \right] \quad (1)$$

$$\frac{d\varphi_{ds}}{dt} = \omega_b \left[V_{ds} + \frac{\omega_e}{\omega_b} \varphi_{qs} + \frac{R_s}{X_{ls}} (\varphi_{md} + \varphi_{ds}) \right] \quad (2)$$

$$\frac{d\varphi_{qr}}{dt} = \omega_b \left[V_{qr} - \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \varphi_{dr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (\varphi_{mq} - \varphi_{qr}) \right] \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi_{dr}}{dt} = \omega_b \left[V_{dr} + \frac{(\omega_e - \omega_r)}{\omega_b} \varphi_{qr} + \frac{R_r}{X_{lr}} (\varphi_{md} - \varphi_{dr}) \right] \quad (4)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) \frac{1}{\omega_b} (\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds}) \quad (5)$$

Las ecuaciones 1 a 5 describen los enlaces de flujo de la máquina y el toque electromagnético de la misma en términos de las variables de estado voltaje y corriente.

3. CONTROL VECTORIAL

En los últimos años el estudio de técnicas de control que permiten el manejo de la velocidad de la máquina de inducción ha sido ampliamente estudiado.

Con la introducción de la teoría del control de campo orientado [1], o FOC (*field oriented control*) y los aportes presentados en [2] con el control directo del par o DTC (*direct torque control*) los esfuerzos de los investigadores se han centrado en mejorar las prestaciones dinámicas de la máquina de inducción. La modulación vectorial o control vectorial aplicado al control de la máquina de inducción, constituye un conjunto de estrategias que mejora el rendimiento de la máquina controlando el torque, la velocidad y la posición del eje de la máquina.

3.1 Características del control vectorial por campo orientado

Esta técnica se basa en extrapolar la técnica de control de motores de corriente continua al ámbito de los motores de inducción. Para ello y debido a que una máquina de corriente alterna carece de dos bobinados desacoplados se recurre al expediente de referenciar el sistema trifásico alterno de corrientes estáticas a un sistema de coordenadas no estacionario que gira sincrónicamente

con el campo magnético rotórico. En este nuevo sistema de referencia las corrientes estáticas pueden ser tratadas como vectores rotantes, de ahí el nombre de control vectorial o también control de campo orientado [4].

Como condiciones para realizar el control vectorial se requiere que el vector del flujo del rotor referido sea posicionado sobre el eje real logrando que la componente en el eje real sea igual al valor total del mismo y que la componente en el eje q sea cero.

De igual forma se debe mantener constante el flujo de manera que el par sea proporcional a la variación de la corriente en el eje q , obteniéndose así una ecuación similar a la del motor de CD [4].

Existen básicamente dos técnicas diferentes de control vectorial; estas son: directa e indirecta. El control vectorial directo se implementa a partir de la medición directa del módulo y la posición del vector espacial de flujo que se seleccione como referencia, mientras que el método indirecto hace uso de un modelo de la máquina que depende de sus parámetros, los que a su vez dependen de parámetros tales como la temperatura, la frecuencia y la saturación.

3.1.1 Control vectorial directo

El control vectorial directo se basa en el modelo del motor en ejes de flujo de rotor, a través de un cambio de variable no lineal, las ecuaciones de estado de la máquina, que originalmente son no lineales y dependientes del tiempo, se transforman en lineales e independientes del tiempo. El sistema lineal resultante se controla utilizando técnicas de control lineal clásico. La técnica seleccionada busca que realice una linealización entrada-estado.

La diferencia entre estos controladores radica en que en el controlador vectorial directo sólo se incluyen en las ecuaciones de linealización los términos no lineales y dependientes del tiempo de las ecuaciones de estado de las variables eléctricas de la máquina, considerándose la velocidad mecánica como un parámetro. De hecho la ecuación del par es una relación no lineal entre el flujo y la corriente de par de la máquina, por lo que para realizar un control desacoplado del par y del flujo, es necesario mantener este último constante.

Por el contrario, la linealización exacta sistemática realiza una transformación no lineal del sistema completo reduciéndolo a un sistema lineal en forma normal, es decir, incluye tanto los términos lineales como los no lineales en las ecuaciones de transformación, resultando como sistema lineal equivalente una cadena de integradores.

Este hecho hace que las ecuaciones de la transformación no lineal para linealizar el sistema sean mucho más complejas que las utilizadas en el control vectorial directo. Esta complejidad hace que si en la implantación en tiempo discreto no se tienen en cuenta los efectos del muestreo en dichas ecuaciones no lineales, el error cometido al mantenerlas constantes durante todo el

periodo de muestreo es mucho mayor en el caso de la linealización sistemática del controlador vectorial, dando lugar a un peor comportamiento del sistema [6].

3.1.2 Control vectorial indirecto

Un método de control de la máquina de inducción muy utilizado en la práctica debido a su facilidad de implantación es el control vectorial indirecto. En este controlador tanto el flujo de rotor como el par son controlados en bucle abierto, existiendo sólo un bucle de control en lazo cerrado para la velocidad de giro de la máquina.

En este controlador no es preciso estimar el vector de flujo de rotor. En su lugar se estima sólo la posición de dicho vector, lo cual se hace integrando su velocidad de giro, que se calcula a partir de la velocidad del rotor y la de deslizamiento [6].

En la figura 2 representa la idea básica del control vectorial indirecto en lazo cerrado integrado por un controlador PID convencional para regular la respuesta, un control por voltaje donde se determinan las corrientes de referencia y el modelo matemático que simula el comportamiento de un motor de inducción.

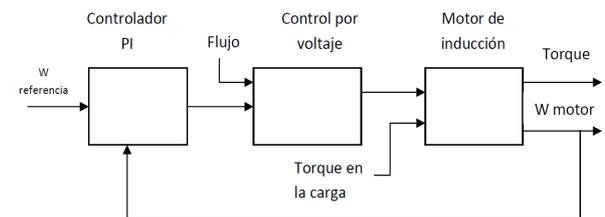


Figura 2. Esquema de control vectorial indirecto.

Cuando el problema es regular la salida de un proceso alrededor de un valor de referencia, es natural tomar el error como una entrada, igualmente, su derivada e integral también pueden ser tenidas en cuenta como otras entradas adicionales. Entre los métodos más conocidos para el ajuste de los controladores PID convencionales están el de Ziegler-Nichols, ubicación de polos, optimización, o autoajustados.

Si se puede obtener un modelo matemático de una planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones en estado transitorio y en estado estable del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un enfoque analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, se debe recurrir a los enfoques experimentales para la sintonización de los controladores PID.

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de desempeño se

conoce como sintonización del controlador. Ziegler y Nichols sugirieron más reglas para sintonizar los controladores PID (lo cual significa establecer Kp, Ti y Td) con base en las respuestas escalón experimentales o basadas en el valor de Kp que se produce en la estabilidad marginal cuando sólo se usa la acción de control proporcional. Las reglas de Ziegler-Nichols son muy convenientes cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas [8].

Para determinar los parámetros del controlador se debe:

- Hacer cero los valores de las constantes Ki y Kd.
- Incrementar la ganancia proporcional hasta que el sistema oscile. Este valor es llamado Kcr.
- Obtener el tiempo entre picos para ese punto. Este periodo medido es llamado Δt.
- Aplicar los criterios dados en la tabla 1 para obtener los valores aproximados de los parámetros del controlador.

CONTROLADOR	KP	Ti	Td
P	0.5Kcr		
PI	0.45Kcr	Δt/1.2	
PID	0.6Kcr	Δt/2	Δt/8

Tabla 1. Reglas de Ziegler Nicholls

La ganancia de un controlador PID está dada por:

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad (6)$$

4. SIMULACION DEL CONTROL VECTORIAL DIRECTO

Para el análisis de resultados se simuló el modelo del motor siguiendo las ecuaciones planteadas en el numeral 2.1, en el marco de referencia de sincronismo, por presentar la importante propiedad de representar las variables sinusoidales del sistema de coordenadas trifásico en valores constantes, trayendo consigo mayor estabilidad numérica al solucionar el sistema de ecuaciones diferenciales no lineales, propias del modelo del motor de inducción.

La implementación completa en simulink® del modelo del motor de inducción se realiza con base en las ecuaciones del modelo (para mayor información ver [6]) y su modelo se presenta en la figura 3.

Como variables de entrada se tienen: Vqs, Vds, We, TL y como parámetros de salida: iqs, ids, iqr, idr, Te, Wr.

Ahora bien, debido a que el modelo está en un sistema de ejes en cuadratura y directo, es necesario llevar las tensiones trifásicas al sistema de dos ejes. Para llevar el sistema de tensiones a dos ejes estacionarios en el estator, se utiliza la siguiente matriz de transformación:

$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

En donde el superíndice “s” hace referencia a un marco de referencia estacionario.

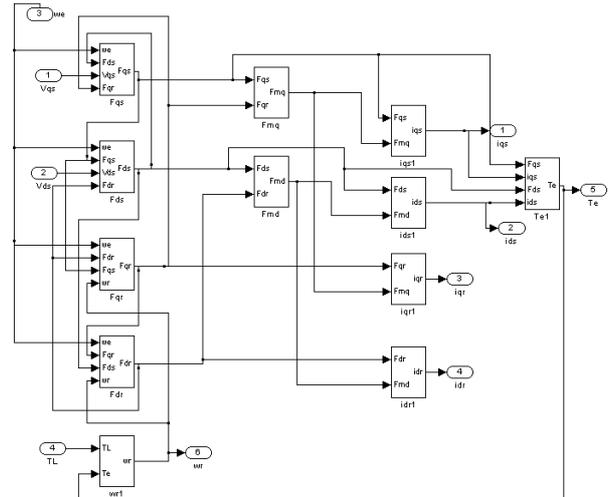


Figura 3. Modelo matemático del motor de inducción

Ahora bien el esquema completo para la simulación de la máquina aplicando la técnica de control vectorial indirecto es:

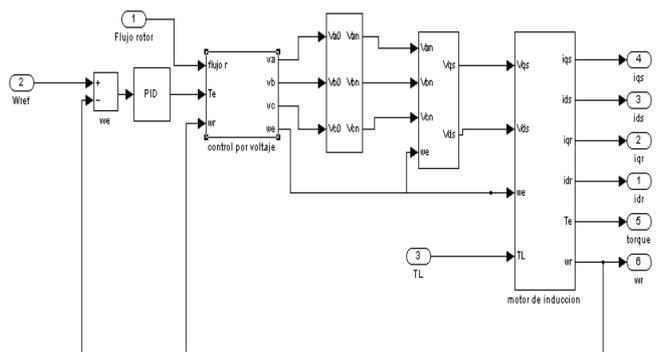


Figura 4. Modelo completo para la simulación del control vectorial indirecto

5. PRUEBAS REALIZADAS

Aplicando una carga de 20 N·m. en el eje del motor a los 2 segundos, se observa como el torque electromagnético obtenido a la salida del motor corresponde al de la carga aplicada (figura 5), mientras que la velocidad debido al

acoplamiento existente, presenta una caída de 8.8 rad/s respecto al valor de referencia a partir del momento en el cual es aplicada la carga (figura 6), justificando el hecho de que tanto el torque como la velocidad no se controlan de manera independiente.

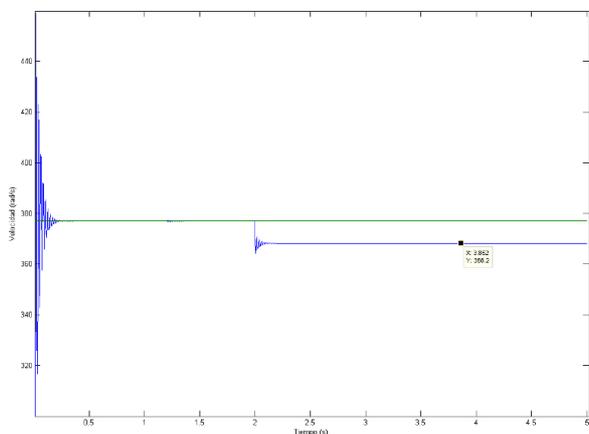


Figura 5. Velocidad en el eje del motor bajo carga

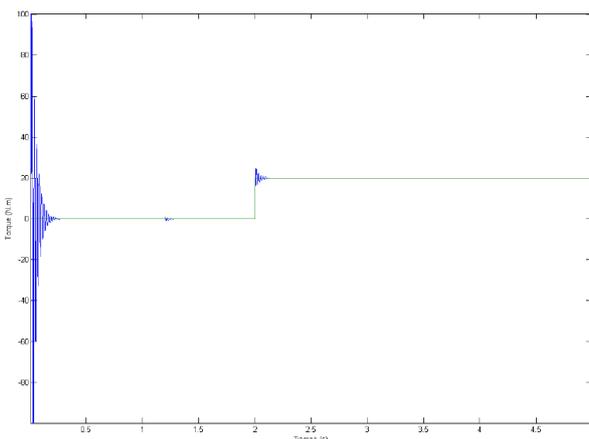


Figura 6. Torque electromagnético en el eje bajo carga

Ahora bien, con el fin de evitar los fenómenos asociados al cambio de velocidad en el eje dada una variación en la carga, se implementa la estrategia del control vectorial indirecto, analizando las respuestas de forma tal que se logre controlar de manera independiente tanto el torque como la velocidad.

Para el ajuste del controlador PI propuesto se aplicara el método de Ziegler-Nichols descrito anteriormente.

Ingresando las constantes respectivas al controlador PI, se definen las demás entradas del sistema y se muestran los resultados para un tiempo de simulación de 10 segundos.

La velocidad inicial es de 377 rad/s y se realizara un cambio a los 6 segundos hasta alcanzar 600 rad/s.

El torque en la carga inicial tendrá un valor de 5 N·m, 3 segundos más tarde alcanza un valor de 50 N·m.

El valor del flujo constante en el rotor se asume de 1 Wb, valor promedio para motores de inducción.

Los resultados obtenidos sobre el modelo desarrollado y con las condiciones presentadas son:

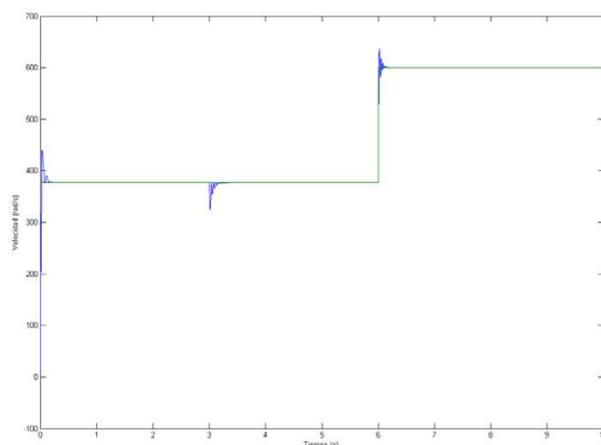


Figura 7. Cambio en la velocidad en el eje de la máquina

Ahora bien el comportamiento del torque en el eje del motor se presenta en la figura 8.

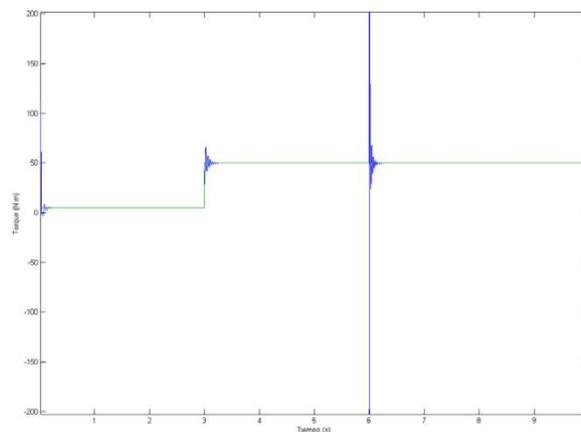


Figura 8. Cambio en torque en el eje de la máquina

Se observa como entonces el controlador logra ubicar los parámetros de salida del motor de inducción en los valores deseados, quiere decir esto que ante variaciones en la carga en el eje, la velocidad permanece constante y ante variaciones en la velocidad el torque permanece constante.

Ahora bien, con el propósito de comparar los datos obtenidos en las simulaciones entre el modelo del motor de inducción funcionando con y sin control en el

momento del arranque y teniendo en cuenta que estos son medidos sobre el segundo pico del transitorio ya que el primero puede presentar errores debidos al modelo y al método de solución del programa en sí. Los datos comparativos se presentan en la tabla 2.

SIMULACION MODELO		OSCILACIONES PARA LA ESTABILIZACION	MAXIMO SOBREPASO
Sin control	Velocidad	10	81.80
	torque	10	96.50
Con control	Velocidad	3	13.10
	torque	4	3.38

Tabla 2. Análisis comparativo

6. CONCLUSIONES

El modelo del motor de inducción se puede llevar a un sistema desacoplado de control del flujo y par por medio de la transformación a los ejes directo y de cuadratura en donde se puede aplicar la técnica de control vectorial, ofreciendo la posibilidad al motor de inducción de operar de manera similar al motor de corriente continua, manteniendo las ventajas que ofrece sobre este último, tales como constructivas, operacionales, económicas, entre otras.

Al desarrollar la técnica de control vectorial indirecto en el motor de inducción se obtuvo una mejora en la respuesta respecto al funcionamiento del modelo matemático sin control. Los resultados obtenidos muestran que el tiempo que tarda en estabilizarse el sistema se encuentra alrededor de 26 milisegundos tanto para el motor en lazo abierto como bajo la acción del control. Por otro lado se puede apreciar que la estabilidad se ve mejorada en un 70% para la velocidad y de un 80% para el torque debido a la técnica de control vectorial aplicada, además se obtiene una disminución en los valores de amplitud del transitorio de 96.5 N·m para el modelo sin control a 3.38 N·m bajo la acción del control para el torque.

En los controladores PID, la componente proporcional reduce el tiempo de subida pero no elimina el error en régimen permanente. La componente integral elimina el error en régimen permanente pero genera oscilaciones en la respuesta transitoria. Para determinar las óptimas componentes se utilizó como alternativa el método de Ziegler - Nichols obteniendo una mejora en la velocidad del 21.6% al 3.4% en el estado transitorio.

En el momento en que se realiza un incremento en la carga de 45 N·m, a los 3 s. el torque electromagnético presenta una oscilación de 25 milisegundos con una máxima diferencia en amplitud de 16.36 N·m obteniéndose un 52% menos, respecto al arranque. Este incremento produce en la velocidad una oscilación de 26 milisegundos y 13.7% de diferencia en amplitud, lo que

demuestra el buen funcionamiento del control vectorial para efectos de cambios en la carga.

En el momento en que se realiza una variación de la velocidad de 377 rad/s a 600 rad/s, esta muestra una oscilación de 20 milisegundos y 5.9% de sobrepaso en amplitud y el torque presenta una oscilación de 17.5 milisegundos y un sobrepaso de 17.8 N·m, donde se establece el funcionamiento del control para cambios tanto en la velocidad como en el torque en la carga.

La aplicación Simulink, usada para la simulación facilita el análisis del comportamiento del motor bajo las diferentes condiciones, debido a sus numerosas herramientas para el diseño en diagramas de bloques y el análisis de resultados gráficos, además ofrece el acceso a la totalidad de las variables del modelo, teniendo en cuenta el uso de los elementos adecuados de la librería, ya que estos en algunos diseños alteran el resultado esperado.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Blaschke, "The principle of Field Orientation as applied to the new Transvector-Closed Loop Control Systems for Rotating Field Machines", Siemens Review, 1972.
- [2] I. Takahashi, T. Noguchi, "A New Quick Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor", IEEE Transaction on Industry Application, Vol 22, No 5, 820-827, September/October 1986.
- [3] P. Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Ed. Oxford University Press, 1998.
- [4] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, "Analysis of Electrical Machines and Drive Systems", IEEE Press Power Engineering Series, 2002.
- [5] J. Vidal, "Estudio del Modelo Matemático del Motor de Inducción Trifásico. Simulación en Régimen Dinámico", Escola técnica superior enginyeria Universitat Rovira I Virgili, Junio 2002.
- [6] S. Sánchez, "Diseño de Técnicas de Control No Lineal Clásica, Inteligentes y Lineal Sobre el Motor de Inducción", tesis de maestría Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- [7] D. A. Zamora, J. S. Rendon, "Aplicación del Control Vectorial a la Máquina de Inducción Utilizando Simulink como Herramienta de Simulación", Tesis de Pregrado Universidad Tecnológica de Pereira, 2009.
- [8] K. Ogata, "Ingeniería de Control Moderna", Prentice Hall, 1998.