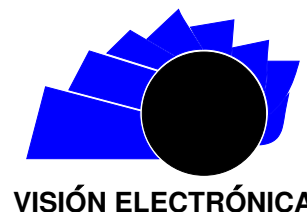




Visión Electrónica

Más que un estado sólido

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/visele/index>



VISIÓN DE CASO

Control de velocidad de motor de inducción usando DTC y un controlador p-difuso

Speed control of induction motor using DTC and fuzzy-p controller

Camilo Barriga Turriago^a, Cesar Andrey Perdomo Charry^b

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Historia del artículo:

Enviado: Diciembre de 2014

Recibido: Enero de 2015

Aceptado: Febrero de 2015

Palabras clave:

Control directo de par

Lógica difusa

Motor de inducción

Simulación

Inversor trifásico



Keywords:

Direct torque control

Fuzzy Logic

Induction motor

Simulation

Three-phase inverter

RESUMEN

Recientemente, se ha incrementado considerablemente la utilización de la lógica difusa, como herramienta de la inteligencia artificial, en los campos de la electrónica de potencia y los sistemas de control de velocidad de motores. Por lo anterior, el presente artículo describe los resultados de investigación que soportan la implementación, por simulación, de un controlador inteligente para el control de velocidad de un motor de inducción (IM) con rotor jaula de ardilla utilizando control directo del par (DTC). Se describe el DTC y su integración con un controlador difuso proporcional. El desempeño del control propuesto se ha presentado y analizado bajo diferentes escenarios en el motor: arranque en vacío con el controlador y variaciones de carga; aumento y liberación repentina de carga; aumento de carga y seguimiento de un perfil de velocidad.

ABSTRACT

Recently, it has greatly increased the use of fuzzy logic as a tool of artificial intelligence in the fields of power electronics and control systems motor speed. Therefore, this article describes research findings that support the implementation by simulation, an intelligent controller for speed control of an induction motor (IM) squirrel cage rotor using Direct Torque Control (DTC). DTC and its integration with a proportional fuzzy controller is described. The performance of the proposed control has been presented and analyzed under different scenarios on the engine: load starting with the controller and load variations; increase and sudden release of load; increased load and speed profile tracking.

^aIngeniero y tecnólogo electricista, Universidad Francisco José de Caldas, Colombia. Especialista en Informática y Automática Industrial, Universidad Francisco José de Caldas, Colombia. Double E Colombia S.A.S, Colombia. e-mail: cbarriga@ee-co.com

^bIngeniero Electrónico, Universidad Surcolombiana, Colombia. Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. e-mail: cperdomo@udistrital.edu.co

1. Introducción

Los motores de inducción son de gran importancia y de extendido uso en la industria por sus múltiples ventajas: su fiabilidad, bajo costo, una estructura simple, un mantenimiento práctico y su larga vida. Aunque estos motores tienen muchas características favorables, también poseen no linealidad e interacciones dinámicas que varían en el tiempo [1]. Una gran parte de los equipos utilizados en la industria manufacturera moderna como por ejemplo bombas, ventiladores, elevadores y máquinas-herramientas, entre otros, no sólo utilizan motores de inducción, sino que deben funcionar a velocidades variables. Para alcanzar un buen desempeño de estos sistemas se hace necesario que las velocidades variables sean controladas de una manera adecuada.

El control y los drives o variadores de corriente alterna AC (altern current), en general, son mucho más complejos que los drives de corriente continua DC (direct current), y esta complejidad aumenta considerablemente si se exige un gran desempeño. Las principales razones de esta complejidad son: la necesidad de frecuencia variable; el suministro, armónicamente óptimo, de potencia; la dinámica de las máquinas de corriente alterna; las variaciones de los parámetros de la máquina; y las dificultades de procesamiento de señales de retroalimentación en presencia de armónicos.

Este artículo se basa en el algoritmo de control DTC difuso publicado en el artículo "Starting an induction motor with a fuzzy controller" [2] mostrando resultados enfocados al control de velocidad y su desempeño bajo diferentes escenarios de cambios de carga en el motor.

El documento se organiza de la siguiente manera. En el apartado 2, materiales y métodos, considerando el control directo del par (DTC) difuso; en el apartado 3, de pruebas y resultados; en el 4 de resultados.

2. Métodos y materiales

La lógica difusa o teoría de conjuntos difusos ha emergido como una herramienta provechosa para el control de procesos industriales complejos, sistemas de diagnóstico y otros sistemas expertos. Fue introducida en 1965 por Lofti Zadeh, en la universidad de Berkeley, como una herramienta matemática para tratar sistemáticamente las incertidumbres.

La teoría difusa provee un mecanismo para representar conceptos lingüísticos tales como "Mucho", "poco", "mediano", "bastante". En general, la lógica difusa suministra una estructura de inferencia que permite apropiarse las capacidades del razonamiento humano [3].

Para establecer un control difuso, es necesario interpretar reglas que son basadas en la experiencia, como la símil causa y efecto en una acción. Estas reglas dan valores de entrada y salida correspondientes a situaciones de

interés. Mediante sentencias "SI... ENTONCES...", estas reglas son incorporadas.

Cuando se habla de Protocolo Lingüístico en un control difuso se habla de las sentencias o reglas que nos dan una descripción cualitativa del proceso, usando variables lingüísticas en vez de variables numéricas. El proceso de convertir una variable numérica a una variable lingüística (número difuso) se denomina fuzziificación.

La forma de obtener estas reglas depende del proceso y el conocimiento que se tenga acerca de este. Por ejemplo, una regla de control podría ser: Si la salida es más baja que el requerimiento y está cayendo moderadamente entonces la entrada al sistema debe incrementarse gradualmente.

El proceso inverso de fuzziificación se denomina defuzziificación. El uso de controladores difusos proporciona una salida mediante una variable lingüística.

Acorde con el requerimiento del mundo real, las variables lingüísticas tienen que ser transformadas a salidas numéricas, uno de los métodos de defuzziificación más conocidos es el denominado: "centro de gravedad".

2.1. Control directo del par (DTC) difuso

Un control avanzado de máquinas eléctricas requiere un control independiente del flujo magnético y del par. El control directo de par se caracteriza por su fácil implementación y una respuesta dinámica rápida. Además, el inversor es directamente controlado por el algoritmo mismo sin necesidad de emplear una técnica de modulación. El diagrama de bloques del control propuesto se muestra en la Figura 1. Este incorpora un controlador difuso para controlar la velocidad en el esquema básico del control directo del par (DTC).

A. Principio de operación

La idea básica del DTC es calcular los valores instantáneos del par y del flujo, a partir de las variables del estator de la máquina. Estas variables de voltaje y corriente del estator son transformadas de coordenadas a-b-c a un modelo referido a dos ejes ortogonales q-d mediante (1):

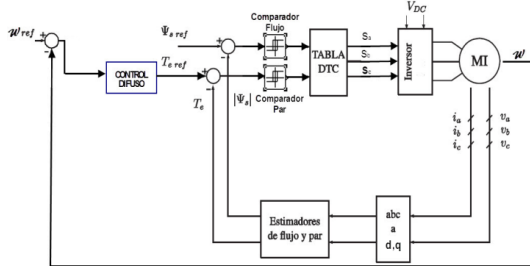
$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

El par y el flujo se controlan directamente y de forma independiente mediante la selección óptima de los estados de conmutación del inversor y limitando los errores del flujo y del par mediante controladores histéresis del flujo y del par,[4].

La estrategia del DTC es clara: el par del motor se controla efectivamente con la rotación del vector del flujo

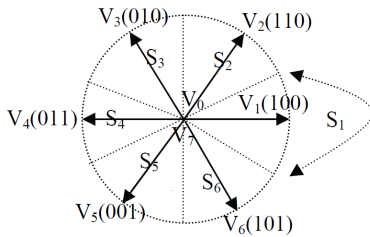
del estator utilizando estados de conmutación adecuados. En el mismo tiempo se controla la magnitud del vector del flujo del estator de la misma manera, es decir, con la utilización de estado de conmutación del inversor. Este valor se puede cambiar según los requisitos de la consigna del flujo. Los detalles del funcionamiento se pueden obtener con la ayuda de las figuras 1 y 2.

Figura 1. Sistema de control propuesto DTC difuso.



Fuente: [5].

Figura 2. Definición de los vectores espaciales de voltaje.



Fuente: elaboración propia.

Según la figura 1, los valores calculados del par y del flujo se comparan con sus consignas. Los errores entran en los controladores de histéresis. Sus salidas son señales lógicas de valores discretos 1,0 que se aplican a la tabla de conmutación, Tabla 1, que elige uno de los ocho estados posibles del vector espacial de la tensión del inversor [4].

Tabla1. Tabla de conmutación del inversor.

TABLA DE CONMUTACIÓN							
ψ	T	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6
1	1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4
	0	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
0	1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_6
	0	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1

Fuente: Elaboración propia.

B. Estimadores de par y flujo

El flujo del estator (ψ_s) desarrollado por el motor de inducción se estima mediante las ecuaciones (2), (3) y el par electromagnético (T_{em}) se estima mediante la ecuación (4), [5].

$$\psi'_{sd} = \int_0^t (\dot{V}'_{sd} - R_s I'_{sd}) dt \quad (2)$$

$$\psi'_{sq} = \int_0^t (\dot{V}'_{sq} - R_s I'_{sq}) dt \quad (3)$$

$$T_{em} = p (\psi_{sd} I_{sd} - \psi_{sq} I_{sq}) \quad (4)$$

Donde, R_s es la resistencia del estator y p es el número de pares de polos del motor.

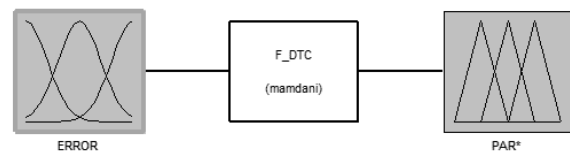
C. Control Difuso

El interés de incorporar un controlador difuso en el esquema de control directo de par principalmente está en la facilidad de su implementación y que brinda un mejor desempeño que un control convencional PID [6].

Cuando el problema es regular la salida de un proceso alrededor de una referencia, es natural considerar el error como una entrada así como la derivada del error y/o la integral del error, para esta aplicación un controlador proporcional P difuso basto para regular las no linealidades donde es más frecuente y difícil decir el efecto que tiene la ganancia del controlador, en el tiempo de subida, el sobre impulso y el tiempo de establecimiento.

En la figura 1 se describe la acción de control que se debe realizar para controlar el proceso. Primero se sensa una variable para realimentarla al controlador; en este caso la variable medida es la velocidad del rotor, que se convierte en la variable del proceso ω (PV). A la referencia o Set Point ω_{ref} (SP) se le resta la variable de proceso sin hacer ninguna modificación sobre esta. En la figura 3 se muestran las entradas y salidas del controlador difuso propuesto

Figura 3. Propuesta de controlador difuso.



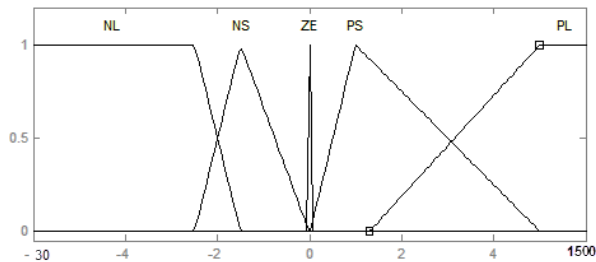
Fuente: elaboración propia.

Para la señal de entrada del controlador se tomó el error entre la referencia de velocidad y la velocidad del motor, fijándose para ésta tres funciones de pertenencia triangulares ZE (error cero), NS (error negativo pequeño), PS (error positivo pequeño) y dos funciones de pertenencia trapezoidales NL (error negativo grande), PL (error positivo grande).

Como salida del controlador difuso se tiene el par de referencia para el algoritmo de control directo del torque.

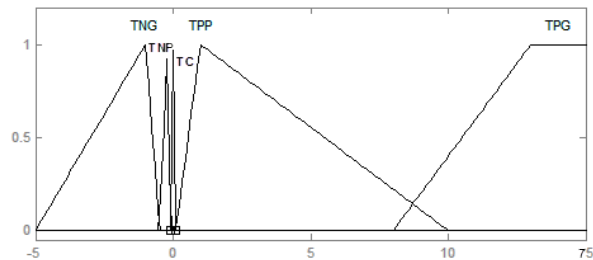
Para ésta salida se fijaron cuatro funciones de pertenencia triangulares TC (Par cero), TNP (Par negativo pequeño), TPP (Par positivo pequeño), TNG (Par negativo grande) y una función trapezoidal TPG (Par positivo grande), las figuras 4 y 5 presentan las funciones de pertenencia para la entrada y salida del controlador respectivamente.

Figura 4. Funciones de pertenencia propuestas para el Error.



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Funciones de pertenencia propuestas para el Par de referencia.



Fuente: elaboración propia.

El controlador difuso es diseñado en base a la observación de los resultados de la simulación, la forma y la posición de cada función de pertenencia se ajustaron mediante ensayo error. Las reglas del control difuso empleadas son como sigue,

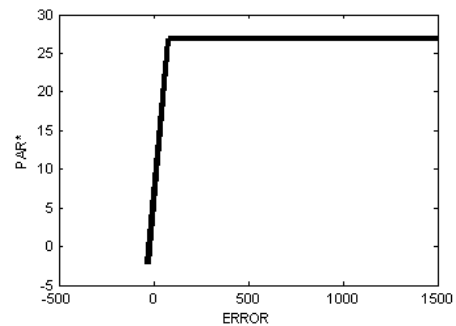
1. Si error es NL entonces Par de referencia es TNG.
2. Si error es NS entonces Par de referencia es TNP.

3. Si error es ZE entonces Par de referencia es TC.
4. Si error es PS entonces Par de referencia es TPP.
5. Si error es PL entonces Par de referencia es TPG.

La inferencia difusa para evaluar estas reglas es del tipo Mamdani y centro de gravedad como método para la fuzzificación.

La relación entre la entrada y la salida en el controlador difuso para la regulación del par se presenta en la figura 6.

Figura 6. Relación entre la entrada y salida en el controlador difuso.



Fuente: elaboración propia.

3. Pruebas y resultados

A continuación se presentan los resultados de la simulación, que fue llevada a cabo usando Matlab/Simulink®, en la cual se realizaron cuatro pruebas: arranque del motor en vacío con el controlador y variaciones de carga; aumento y liberación repentina de carga; aumento de carga y seguimiento de un perfil de velocidad.

Los parámetros del motor de inducción empleados en las simulaciones se presentan en la Tabla 2 y los datos de placa se presentan en la Tabla 3.

Tabla 2. Parámetros del modelo eléctrico del motor de inducción.

Parámetro	Valor(Ω)
R_s (Resistencia del estator)	3,5744555
R_r (Resistencia del rotor)	11,1375109
X_s (Reactancia del estator)	7,35384485
X_r (Reactancia del rotor)	7,35384485
X_m (Inductancia mutua)	237,837585

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3. Características nominales del motor de inducción.

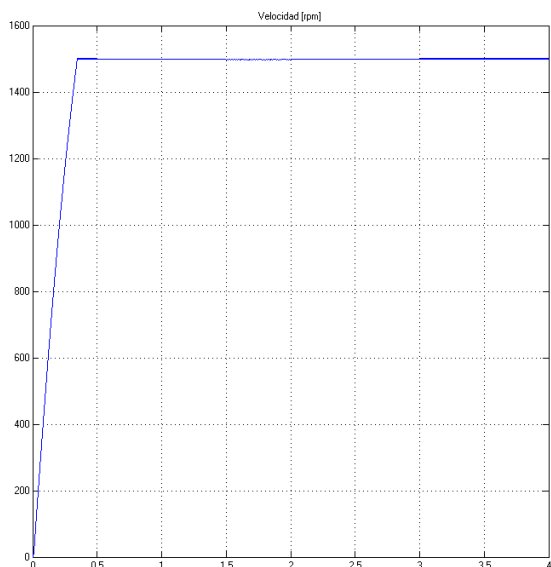
Potencia nominal	kW	1,1
Velocidad nominal	r/min	3350
Voltaje nominal d/y	[V]	220/380
Frecuencia nominal	[Hz]	60
Corriente nominal d/y	[A]	4,7/2,7

Fuente: Elaboración propia.

A. Arranque del motor en vacío con el controlador y variaciones de carga

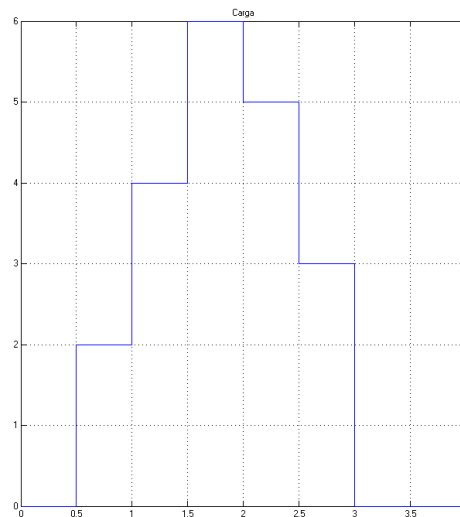
La figura 7 muestra las variaciones de velocidad en la medida que se cambia la carga, y la respuesta del controlador regulando la velocidad a 1500 rpm. La aplicación de la carga es hecha tiempo después de llevar la velocidad al valor de referencia, ya que de lo contrario la respuesta podría ser errónea, o lo que equivaldría a decir, de forma práctica, que se ha producido un embalaje del motor.

Figura 7. Relación entre la entrada y salida en el controlador difuso.



Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Relación entre la entrada y salida en el controlador difuso.

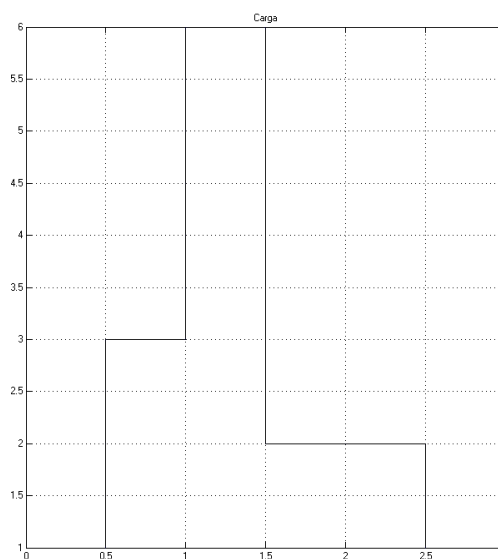


Fuente: elaboración propia.

B. Aumento y liberación repentina de carga

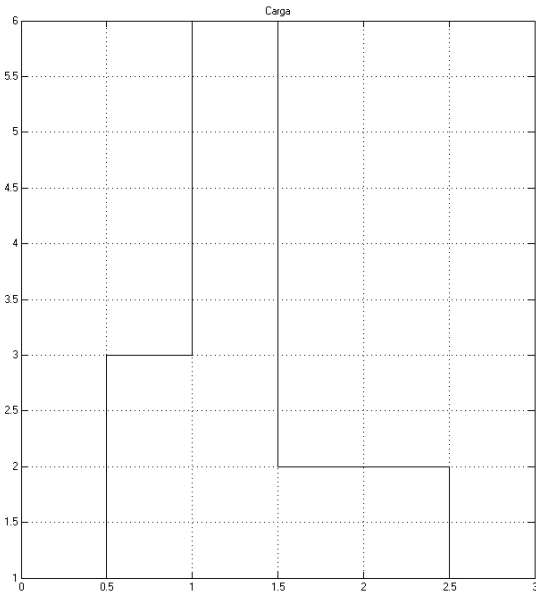
La figura 9 muestra la velocidad para dos cambios ascendentes en la carga y luego hacer una disminución drástica de esta a 1,5s. Como se aprecia, al disminuir súbitamente la carga la velocidad cae; no obstante, el controlador lo lleva de nuevo al valor de referencia después de un tiempo dependiendo del tamaño de la carga.

Figura 9. Relación entre la entrada y salida en el controlador difuso.



Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Relación entre la entrada y salida en el controlador difuso.

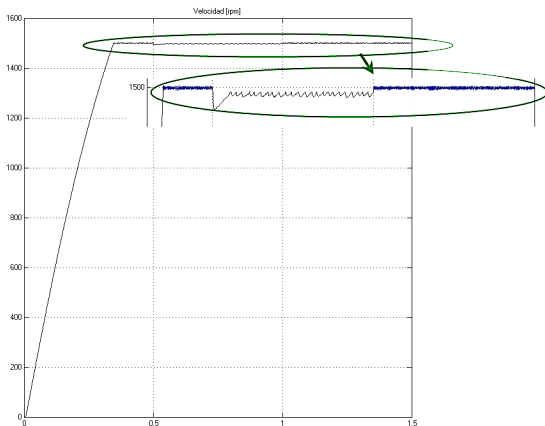


Fuente: elaboración propia.

C. Aumento de carga

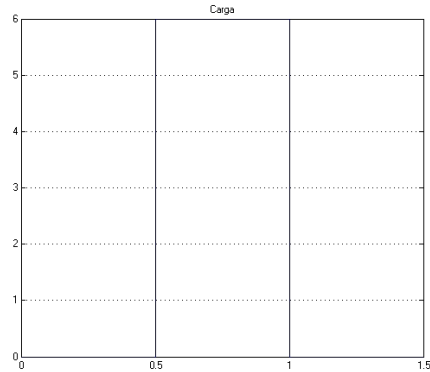
De igual manera, se hace la prueba cambiando la carga súbitamente. Esta vez se aplica una carga de gran valor, después de no tener carga. El valor de velocidad cae a 1492 rpm, pero luego la acción regulatoria del controlador hace que vuelva al valor nominal después de 0.04s.

Figura 11. Relación entre la entrada y salida en el controlador difuso.



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Relación entre la entrada y salida en el controlador difuso.

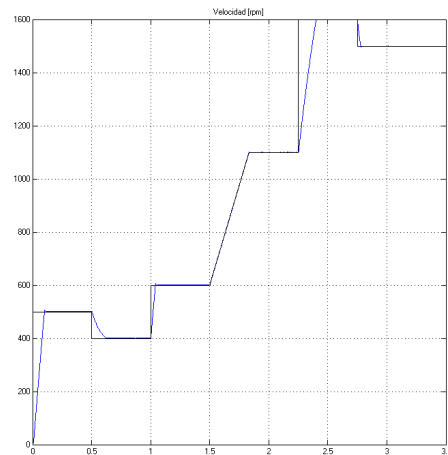


Fuente: elaboración propia.

D. Seguimiento de un perfil de velocidad

En esta prueba se hace variar la referencia de velocidad del sistema tanto en forma de escalón como en forma de rampa. Para la simulación se consideró que el motor estaba operando sin carga. En $t=0$ la referencia de velocidad es 500 rpms, en $t=0.5$ segundos la referencia de velocidad cambia en forma escalón a 400 rpms. Luego en $t=1$ segundo la referencia de velocidad cambia en forma escalón a 600 rpms y permanece en ese valor. Entre $t=1.5$ segundos y $t=1.83$ segundos la referencia de velocidad cambia en forma rampa hasta alcanzar 1100 rpms. En $t=2.2$ segundos la referencia de velocidad cambia en forma escalón a 1600 rpms. Luego en $t=2.7$ segundos la referencia de velocidad cambia en forma escalón a 1500 rpms y permanece en ese valor.

Figura 13. Relación entre la entrada y salida en el controlador difuso.



Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Este artículo se presentó la implementación de un controlador P difuso que permitió regular la velocidad de un motor de inducción trifásico ante variaciones bruscas de la carga mecánica, incorporándolo al control directo de par básico y basándose únicamente en el conocimiento experto del sistema motor-inversor; es decir, no se hizo uso de un modelo matemático exacto en comparación con los controladores tradicionales.

El control directo de par incorporando control inteligente logra controlar con exactitud el motor de inducción, debido a que permite tratar el motor de inducción de la misma manera que el motor de corriente continua de excitación independiente, es decir, admite un control independiente del flujo del campo magnético y el par electromagnético.

Las simulaciones realizadas verifican el buen comportamiento del método de control propuesto tanto para rangos de velocidad normal como para rangos de velocidad extendida, se llevaron a cabo varias pruebas de carga desde el punto de vista de simulación y los resultados de dichas pruebas permitieron demostrar la efectividad del control propuesto con un número menor de reglas gracias a una sintonización más adecuada del controlador P difuso, lo que a larga se traduce en un menor costo computacional.

Referencias

- [1] P.C. Krause.” Analysis of Electric Machinery”, McGraw-Hill Book Company, Capítulos 3, 4, 1986.
- [2] C. Barriga, y J. Zambrano, “Arranque de un motor de inducción usando control difuso”, *Tecnura*, vol.15 No. 30, pp 32 -43 Dic. 2011
- [3] S. N. Sivanandam y S. Sumathi “Introduction to Fuzzy Logic using MatLab” Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [4] P. Vas, ”Sensorless vector and torque control”, Oxford university press, 1998.
- [5] I. TAKAHASHI, T. NOGUCHI, “A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor”. *IEEE Trans. on Ind. Applicat*, Vol. IA-22, No. 5, PP. 820–827, September/October 1986.
- [6] M. Baishan, L. Haihua, Z. Jinping. “Study of Fuzzy control in Direct Torque Control system”, 2009.
- [7] R. Toufouti S. Meziane, H. Benalla ”Direct Torque Control for Induction Motor Using Fuzzy Logic”, 2006.