

Diagnóstico de fallas en el Motor de Inducción usando Lógica Difusa

Antonio Zamarrón, Salomón Rodríguez

Departamento de Ingenierías
Universidad de la Salle Bajío
León, Gto., México

azr102943@udelasalle.edu.mx, salo_carrera@hotmail.com

Abstract— Induction motor is a key element in all kind of industrial plants. Consequently, any fault occurred in these machines can lead to an interruption of the manufacturing process causing financial losses. This paper presents a practical implementation of a new strategy based on a fuzzy system for the detection and diagnosis of stator faults. The proposed fuzzy system approach is based on the high-frequency current induced by the injection of a high-frequency carrier signal voltage to the stator motor. It uses the cd component magnitude of the high-frequency negative-sequence current to detect turn-to-turn faults severity and phase fault. Results show that fuzzy system is able to identify incipient and severe faults under load conditions.

Keyword— *Diagnosis, Fuzzy Logic, Induction Motor, Negative sequence current, Turn Faults.*

Resumen— El motor de inducción es un elemento clave en las plantas industriales. Por lo anterior, cualquier falla que ocurra en este tipo de máquinas puede crear una interrupción en el proceso de manufactura, causando serias pérdidas económicas. El propósito de diagnosticar fallas en el motor de inducción es reducir el costo de mantenimiento y prevenir paros imprevistos. En este artículo se presenta la implementación de una nueva estrategia para el diagnóstico de fallas usando lógica difusa en motores de inducción alimentados por un accionador de c.a. La identificación de la falla se basa en la corriente portadora de secuencia negativa inducida por la aplicación de una señal portadora de voltaje en los devanados del motor. El sistema difuso utiliza la magnitud de la componente de cd de la corriente portadora de secuencia negativa para determinar las fallas por espiras en corto circuito y caída de fase del motor. Los experimentos se realizan en un motor trifásico de inducción rebobinado especialmente para emular las fallas. Los resultados muestran que el sistema propuesto es capaz de detectar fallas incipientes y severas sin importar el nivel de carga del motor.

Palabras claves— *Corriente de secuencia negativa, Diagnóstico, Espiras en corto, Lógica Difusa, Motor de Inducción.*

I. INTRODUCCIÓN

Los motores de inducción son considerados los caballos de batalla en la industria debido a sus características de robustez, bajo costo, estructura simple y bajo mantenimiento. Hoy en día estas máquinas eléctricas son componentes críticos en muchos procesos industriales. Por lo tanto el monitoreo en línea de los motores de inducción cada vez se convierte en un tema de mayor relevancia (Mini, 2010).

Se sabe que del 36% al 40% de las fallas en los motores de inducción son causados por fallas en el devanado del estator (Mini, 2010; Sharifi, 2011; Azgomi, 2013). Se cree que estas fallas se inician como una falla incipiente entre espiras de una misma bobina debido a la degradación del aislamiento de los conductores por estrés térmico. Es posible que esta falla progrese hasta generar fallas de corto circuito entre fases o entre fase y tierra. Aunque el aislamiento en los motores puede ser probado fuera de línea, los métodos en línea que no interfieren con la operación regular del motor son preferidos (Briz, 2003).

Para la detección y monitoreo de fallas debido a espiras en corto circuito en (Jover, 2008; Mini, 2010; Sreedevi, 2011; Azgomi, 2013) utilizan la magnitud de las corrientes de fase del motor y un sistema difuso. Utilizar las corrientes de fase del motor tiene la desventaja de que es necesario realizar diferentes simulaciones con elemento finito (Jover, 2008), desarrollar un modelo (Mini, 2010; Azgomi, 2013) o experimentos para obtener información suficiente para implementar adecuadamente el sistema difuso

(Sreedevi, 2011). Debido a que la magnitud de las corrientes de fase cambia en función de los niveles de carga del motor, es necesario implementar para el sistema difuso una base de conocimiento relativamente grande. Por otro lado, ninguno de estos sistemas propuestos muestra cómo diagnosticar una falla incipiente o en proceso. Otra forma muy común para detectar fallas en los motores de inducción es utilizando los armónicos contenidos en la corriente de fase o en la corriente del vector espacial (Nandi, 1999; Zouzou, 2010; Asfani, 2012; Pineda-Sanchez, 2013). Sin embargo, debido a que casos prácticos han mostrado que muchos de estos armónicos están presentes aún en motores sanos debido a asimetrías inherentes al motor (Zouzou, 2010; Dong, 2009), no siempre es posible detectar la falla con un 100% de eficiencia.

La técnica de inyectar una señal portadora de alta frecuencia al motor para monitorear en línea las fallas en el estator es un método que tiene grandes ventajas en comparación a otros que se presentan en la literatura. En principio no requiere sensores adicionales ya que utiliza los sensores de corriente que tiene casi todo accionador electrónico de corriente alterna, por otro lado la magnitud de la componente de cd de la corriente portadora de secuencia negativa, utilizada para determinar la severidad de la falla, no se ve afectada por la frecuencia fundamental ni por el nivel de carga del motor (Briz, 2003; Zamarrón, 2008).

Cuando se realiza un diagnóstico de falla hay situaciones en las que no solo existe un resultado de bueno o malo, sino también existen valores intermedios que no siempre es posible valorar o cuantificar. En este trabajo se utiliza la lógica difusa para determinar la severidad de la falla en el estator producido por espiras en corto circuito ya que ésta técnica de inteligencia artificial permite estimar el grado de falla dentro del rango de motor sano y dañado (Zeraoulia, 2005; Wang, 2006; Jover, 2008). Además de determinar la severidad de la falla por espiras en corto circuito, también se considera en este trabajo la caída de una de las fases, aunque es poco común este tipo de falla en los accionadores electrónicos de corriente alterna. El propósito de este artículo es presentar un método útil y sencillo para determinar la severidad de la falla producida en el estator de motores de inducción con rotor jaula de ardilla accionados por un inversor de voltaje.

II. SEÑAL PORTADORA DE ALTA FRECUENCIA

La técnica de inyectar una señal de tensión portadora de alta frecuencia en los devanados del motor de inducción ha mostrado ser efectiva para la detección de saliencias espaciales (Degner, 1998). Cuando una señal de tensión trifásica balanceada de alta frecuencia se inyecta (1) en los devanados del motor de inducción, se induce una corriente portadora de alta frecuencia en los devanados del estator (Briz, 2003). Si la máquina tiene saliencias, es decir, una asimetría en la inductancia de dispersión, la corriente portadora de alta frecuencia se forma de dos componentes: la corriente portadora de secuencia positiva y la corriente portadora de secuencia negativa (2). La corriente portadora de secuencia positiva es proporcional a la inductancia transitoria promedio del estator y no contiene información de las saliencias. La corriente portadora de secuencia negativa es proporcional a la inductancia transitoria diferencial del estator y contiene información de la magnitud y fase de las saliencias espaciales acopladas a los devanados de la máquina (Degner, 1998).

$$v_{qds_c}^s = V_c e^{jw_c t} \tag{1}$$

$$i_{qds_c}^s = i_{qds_cp}^s + i_{qds_cn}^s = I_{cp} e^{jw_c t} + jI_{cn} e^{j(h\theta_e - w_c t)} \tag{2}$$

donde

- θ_e Posición angular de la saliencia en radianes eléctricos
- h Número del armónico de la saliencia
- w_c Frecuencia de la portadora en radianes por segundo

- I_{cp} = $(V_c / w_c) * (\sum L_{\sigma s} / (\sum L_{\sigma s}^2 - \Delta L_{\sigma s}^2))$ magnitud de la corriente portadora de secuencia positiva
- I_{cn} = $(V_c / w_c) * (\Delta L_{\sigma s} / (\sum L_{\sigma s}^2 - \Delta L_{\sigma s}^2))$ magnitud de la corriente portadora de secuencia negativa
- $\sum L_{\sigma s}$ = $(L_{\sigma qs} + L_{\sigma ds}) / 2$ Inductancia transitoria promedio del estator
- $\Delta L_{\sigma s}$ = $(L_{\sigma qs} - L_{\sigma ds}) / 2$ Inductancia transitoria diferencial del estator
- $L_{\sigma qs}, L_{\sigma ds}$ Inductancias transitorias del estator de los ejes q- y d- en un marco de referencia síncrono con la saliencia

III. DIAGNÓSTICO DE FALLAS USANDO SALIENCIAS ESPACIALES

Un desbalanceo en los devanados del estator producido por un corto circuito entre espiras o la caída de voltaje de una de las fases, crea diferentes inductancias transitorias en los ejes q- y d- del estator en un marco de referencia estacionario. Ya que los devanados del estator son fijos, el desbalance de la inductancia transitoria del estator crea una saliencia espacial estacionaria, es decir una asimetría en la máquina que es fija en el espacio. Esta saliencia espacial estacionaria es posible detectarla y conocer su magnitud inyectando una señal portadora de alta frecuencia al motor. La saliencia aparece como una componente de corriente directa en el espectro de la señal de la corriente portadora de secuencia negativa, en el marco de referencia de la corriente portadora de secuencia negativa (Degner, 1998; Briz, 2003; Zamarrón, 2010). La magnitud de esta componente está estrechamente relacionada con el número de espiras en corto circuito del motor y la falta de voltaje de una de las fases del motor.

IV. EXPERIMENTACIÓN

A. Descripción del banco de pruebas

En la figura 1 se ilustra el sistema utilizado para la experimentación. Consiste en un motor de inducción de 0.746 kW, 220/440 V, 60 Hz y 4 polos (1745 rpm) conectado en doble estrella. Para aplicarle carga al motor se usa un freno electromagnético que se basa en la inducción de corrientes de Foucault. El motor se alimenta con una señal fundamental y una señal portadora a través de un inversor trifásico, la frecuencia y el voltaje de ambas señales son controlados desde una PC usando una tarjeta de adquisición de datos. El voltaje y la frecuencia de la señal portadora son de 5 V y 500 Hz, respectivamente. La frecuencia de muestreo utilizada es de 10 kHz. Para realizar la parte experimental se modificó el devanado del estator del motor de inducción. La figura 2 muestra esquemáticamente el diseño del devanado, incluyendo cómo se crean las fallas de espira a espira. En esta máquina es posible colocar hasta 9 espiras en corto circuito.

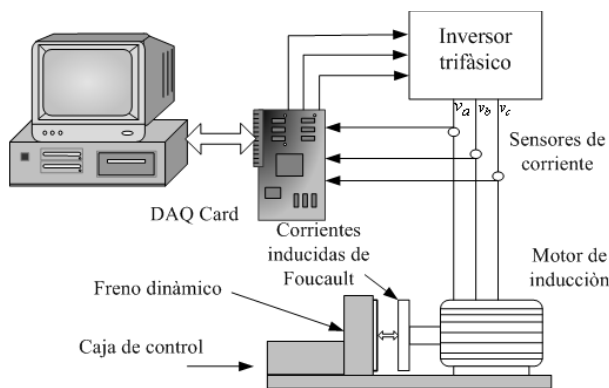


Fig. 1. Estructura del banco de pruebas

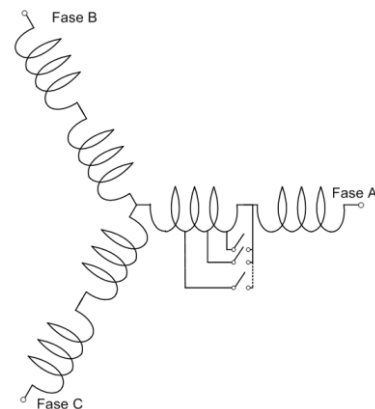


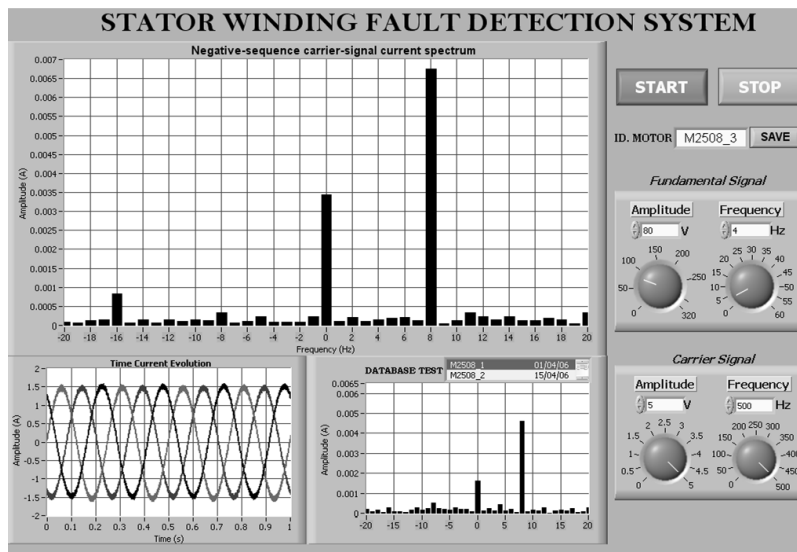
Fig. 2 Diagrama esquemático del devanado

B. Datos experimentales

Para generar la señal del voltaje fundamental y de la señal portadora se utilizó un programa en LabView (Zamarrón, 2010). Este programa además de generar estas señales, también adquiere las corrientes de fase del motor y las muestra en pantalla junto con su espectro. En la figura 3(a) se presenta la ventana del panel de control, en ella se puede ver la evolución temporal de las corrientes de fase y el espectro de la corriente portadora de secuencia negativa, en coordenadas de secuencia negativa, para dos fallas distintas, una de ellas en línea (espectro superior) y otra almacenada en una base de datos (espectro inferior).

La primera corresponde a una falla con 1 espira en corto circuito y la segunda para 2 espiras en corto. Se puede observar que la magnitud de la componente de corriente directa es mayor para la falla de 2 espiras en corto circuito. En la experimentación también se utilizó una resistencia de 0.47Ω para corto circuitar una de las espiras y emular una falla en proceso. El resultado obtenido mostró que la magnitud de la componente de corriente directa del espectro se encuentra entre los valores correspondientes a un motor sano y un motor con falla de una espira.

Este resultado es interesante ya que el sistema difuso que se propone puede fácilmente interpretarlo como una falla incipiente. En la figura 3(b) se presenta el diagrama a bloques del sistema de detección de fallas. Se puede observar que para obtener la magnitud de la componente de cd de la corriente portadora de secuencia negativa, en coordenadas de secuencia negativa, primero se forma el vector complejo de la corriente de estator, luego se filtra la componente fundamental y el vector resultante se transforma a coordenadas de secuencia negativa. Por último se utiliza el algoritmo de la Transformada rápida de Fourier (FFT) y se extrae la magnitud de la componente de cd. Para reducir pasos a este proceso, se puede aplicar directamente la FFT al vector complejo de las corrientes de estator y extraer la componente de cd ubicada en la frecuencia $-w_c$. En este trabajo w_c es de 500 Hz.



(a)

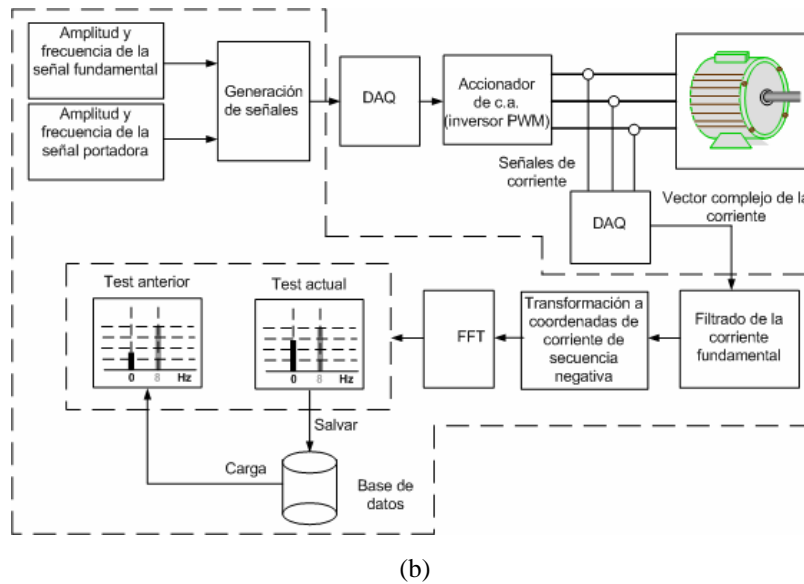


Fig. 3 a) Panel frontal de Instrumento Virtual y b) diagrama a bloques (Zamarrón, 2010).

V. DIAGNÓSTICO BASADO EN LÓGICA DIFUSA

Una vez que se obtiene la magnitud de la componente de corriente directa de la corriente portadora de secuencia negativa, ésta es normalizada y enviada al sistema difuso para determinar la condición del motor. En la figura 4 se presenta el diagrama a bloques del sistema difuso utilizado para la detección de las fallas. Éste se implementó en el Toolbox de lógica difusa de Matlab.

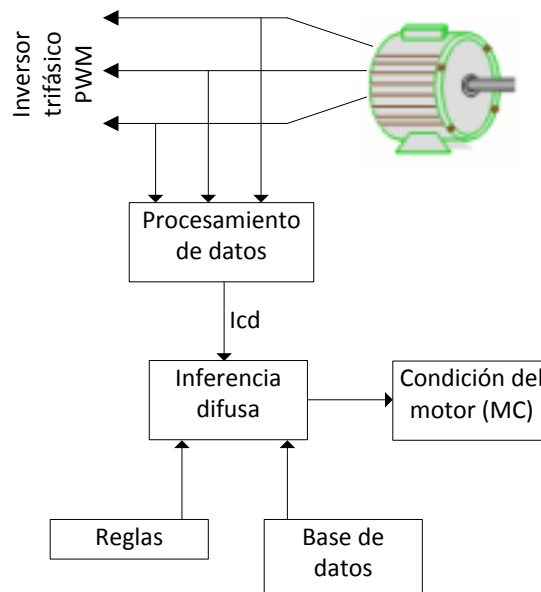


Fig. 4. Diagrama a bloques del sistema difuso para la detección de espiras en corto circuito y caída de fase

A. Variables difusas de entrada y salida

La condición del motor se puede deducir observando la magnitud de la componente de corriente directa de la corriente portadora de secuencia negativa en coordenadas de secuencia negativa, I_{cd} . La interpretación del resultado se puede dar debido a la relación que existe entre las condiciones del motor y la amplitud de la componente de corriente directa. Usando la lógica difusa los datos numéricos pueden ser representados como información lingüística. En este caso, la magnitud de la componente de corriente directa, I_{cd} , es considerada como la variable de entrada al sistema difuso. La condición del motor, CM, es seleccionada como la variable de salida. Tanto la entrada como la salida son definidas usando la teoría de conjuntos difusos.

B. Variable lingüística

Una herramienta básica de la lógica difusa son las variables lingüísticas. Sus valores son palabras o sentencias presentadas en lenguaje natural como *poco*, *mucho*, *positivo*, *negativo*, etc., que son las palabras que desempeñan el papel de etiquetas en un conjunto difuso. CM es una variable lingüística particionada en los conjuntos difusos $T(CM) = \{ sano, falla incipiente, falla media, falla severa y fase abierta \}$. El conjunto difuso *falla incipiente* corresponde a valores en un rango donde el motor no presenta ninguna espira en corto circuito pero ya ha iniciado el proceso de falla, mientras que los conjuntos difusos *falla media* y *falla severa* corresponden a valores con más de una espira en corto circuito. La falla de *fase abierta* corresponde a una caída evidente de voltaje en una de las fases. Su efecto se refleja claramente en una asimetría magnética en el motor y por lo tanto una modificación en la magnitud de la componente de cd de la corriente portadora de secuencia negativa en coordenadas de secuencia negativa. La variable de entrada I_{cd} del sistema difuso, tiene los siguientes conjuntos difusos $T(I_{cd}) = (cero, pequeño, medio, grande, muy grande)$. La metodología propuesta es similar a la presentada por (Wang, 2006), sin embargo en este caso se utiliza una sola entrada (I_{cd}) en lugar de dos (V y I). Por otro lado, en nuestro caso la corriente I_{cd} es independiente del nivel de carga del motor, lo cual representa una gran ventaja porque reduce el número de reglas difusas.

C. Reglas difusas y funciones de pertenencia

Las reglas difusas y las funciones de pertenencia se construyen observando los datos de entrada y salida. Las reglas difusas tienen la forma de (3).

$$R_i: \text{if } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ then } x_2 \text{ is } A_{i2} \quad (3)$$

Las funciones de pertenencia que se utilizaron fueron del tipo triangular y trapezoidal. Las funciones de pertenencia optimizadas de entrada son las que se muestran en la figura 5.

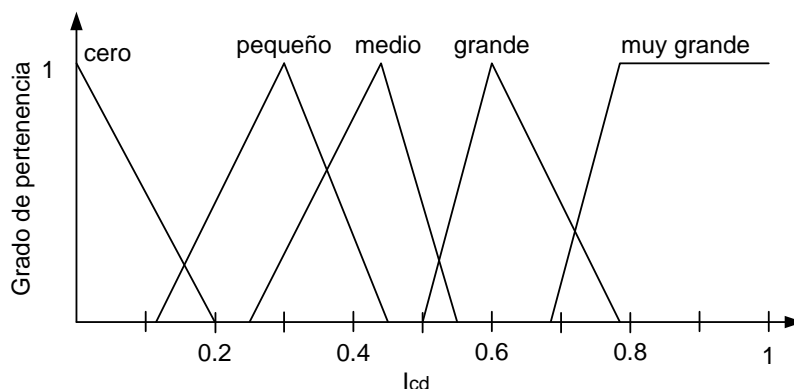


Fig. 5 Funciones de pertenencia para I_{cd}

Debido a la forma de detectar las fallas en los devanados, el sistema difuso resultante es relativamente sencillo. A continuación se muestran las reglas utilizadas.

- R₁: If I_{cd} is *cero* then CM is *sano*
- R₂: If I_{cd} is *pequeño* then CM is *falla incipiente*
- R₃: If I_{cd} is *medio* then CM is *falla media*
- R₄: If I_{cd} is *grande* then CM is *falla severa*
- R₅: If I_{cd} is *muy grande* then CM is *fase abierta*

La forma de las funciones de pertenencia de salida y su ubicación en el universo del discurso CM se presentan en la figura 6.

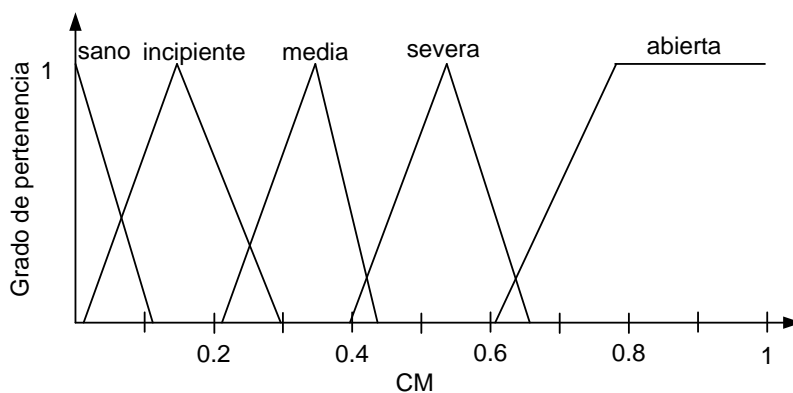


Fig. 6 Funciones de pertenencia para CM

Los rangos de valores normalizados de salida del sistema difuso que muestran la condición del motor se muestran en la Tabla I

Tabla I. Rango de valores de salida del sistema difuso para indicar la condición del motor

Valores de salida del sistema difuso	Condición del Motor (CM)
0 – 0.15	Motor sano
0.15 – 0.25	Falla incipiente
0.25 – 0.30	Falla media (una espira en corto)
0.30 – 0.55	Falla severa (más de una espira en corto)
0.60 – 0.99	Fase abierta

El sistema de inferencia implementado es tipo Mamdani y para el proceso de defusificación se utilizó el método del centroide.

VI. RESULTADOS

Para verificar el funcionamiento del sistema se realizaron pruebas con el motor sano y con falla para diferentes niveles de carga. Se tomaron datos cada 5 rpm desde 1800 rpm (sin carga) hasta 1745 rpm (plena carga). En cada velocidad se capturaron 10 veces las corrientes de fase, se transformaron a un vector complejo en coordenadas estacionarias, luego se pasó este vector al dominio de la frecuencia usando el algoritmo de la Transformada rápida de Fourier y por último se extrajo el promedio de la magnitud de la componente de cd ubicada en -500 Hz del espectro del vector complejo de la corriente de estator. Una vez que se tiene la magnitud de I_{cd} , ésta es enviada al sistema difuso, donde se evalúa y diagnostica la condición del motor. Un resumen de los resultados de las pruebas se presenta en la Tabla II. Se puede observar que el valor normalizado de la magnitud de I_{cd} es prácticamente insensible a los diferentes niveles de carga del motor, y por el contrario, seriamente afectada por las fallas producidas por espiras en corto circuito. A medida que el nivel de falla aumenta, también la magnitud de I_{cd} se incrementa pero no de forma lineal. En fallas con más de cinco espiras, esta magnitud tiende a mantenerse constante. La falla por caída de fase se diagnostica cuando I_{cd} tiene valores normalizados por encima de 0.68.

RESULTADOS DEL DIAGNÓSTICO PARA DIFERENTES FALLAS Y NIVELES DE CARGA DEL MOTOR

Carga	Motor sano Ninguna espira en corto		Falla incipiente Una espira en corto con resistencia en serie de 0.47Ω		Falla severa Dos espiras en corto	
	Normalizado I_{cd}	Salida CM	Normalizado I_{cd}	Salida CM	Normalizado I_{cd}	Salida CM
Nominal 1745 rpm	0.0895	0.0422	0.316	0.198	0.643	0.543
Media 1775 rpm	0.0884	0.0421	0.316	0.198	0.642	0.543
Ligera 1790 rpm	0.0882	0.0421	0.315	0.197	0.643	0.543

VII. CONCLUSIONES

En este artículo se ha propuesto un sistema para el diagnóstico de fallas en el estator de motores de inducción con rotor jaula de ardilla alimentados desde un accionador de corriente alterna electrónico. El sistema se basa en la detección de fallas mediante la inyección de una señal de alta frecuencia y es diagnosticada mediante un sistema difuso. La magnitud de la componente de corriente directa de la corriente portadora de secuencia negativa, que resulta de la señal de alta frecuencia inyectada en los devanados del motor, es utilizada para conocer la severidad de la falla. El sistema difuso utilizado permite diferenciar entre una falla incipiente (espira en proceso de corto circuito) y una falla severa teniendo como entrada la componente de cd de la corriente portadora. El uso de la componente de cd de la corriente portadora de secuencia negativa, junto con la lógica difusa para diagnosticar fallas en motores de inducción, no se había reportado hasta ahora en la literatura. El sistema propuesto es relativamente sencillo, pero efectivo ya que logra diagnosticar la falla a pesar del comportamiento no lineal de la magnitud de la componente de cd a medida que crece la severidad de la falla.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad de la Salle Bajío por su motivación y apoyo financiero para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- Asfani, D.A., Muhammad, A.K., Syafaruddin, Purnomo, M.H., and Hiyama, T., (2012), "Temporary short circuit detection in induction motor winding using combination of wavelet transform and neural network", *Expert systems with applications*, Vol. 39, pp 5367-5375, April 2012.
- Azgomi, H.F.; Poshtan, J., (2013), "Induction motor stator fault detection via fuzzy logic," 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pp.1,5, 14-16 May 2013
- Briz, F., Degner, M.W., Zamarrón, A., and Guerrero, J.M., (2003), "Online Stator Winding Fault Diagnosis in Inverter-Fed AC Machines Using High-Frequency Signal Injection", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 39, pp. 1109–1117, Jul./Aug. 2003.
- Degner, M. W., (1998), "Flux, position and velocity estimation in AC machines using carrier frequency signal injection," Ph.D. dissertation, Dept. Mech. Eng., Univ. Wisconsin, Madison, WI, 1998.
- Dong, M., Cheang, T, and Chan, S., (2009), "On-Line Fast Motor Fault Diagnostics Based on Fuzzy Neural Networks", Elsevier, *Tsinghua Science and Technology*, Vol. 14, Issue 2, pp 225-233, April 2009.
- Jover, P., Arkkio, A., (2008), "Detection of Stator Winding Fault in Induction Motor Using Fuzzy Logic", *Applied Soft Computing*, Vol. 8, No. 2, PP. 1112-1120, March 2008.
- Mini V.P., Setty Sivakotaiyah and S. Ushakumari, (2010), "Fault Detection and Diagnosis of an Induction Motor using Fuzzy Logic", *IEEE SIBIRCON*, Russia, 11-15 July 2010.
- Nandi S. Toliyat HA, (1999), "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical machines – A Review", *IEEE-IAS Annual Meeting*, Phoenix, AZ, pp. 197-204.
- Pineda-Sanchez, M., Puche-Panadero, R., Riera-Guasp, M., Perez-Cruz, J., Roger-Folch, J., Pons-Linares, J., Climente-Alarcon, V., Antonino-Daviu, J.A., (2013), "Application of the Teager-Kaiser Energy Operator to the Fault Diagnosis of Induction Motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol 28, no. 4, pp 1036-1044, December 2013.
- Sharifi, R., Ebrahimi, M., (2011), "Detection of stator winding faults in induction motors using three-phase current monitoring", *ISA Transactions*, Vol. 50, pp 14-20, January 2011.
- Sreedevi and P. Jenó Paul, (2011), "Stator Fault Detection and Diagnosis of an Induction Motor Using Neuro Fuzzy Logic", *International Journal of Electrical and Power Engineering*, vol. 5, Issue 2, pp 102-107, 2011.
- Wang Xu-hong, He Yi-gang, (2006), "Fuzzy Model based on On-line Stator Winding Turn Fault Detection for Induction Motors", *IEEE Conference on Intelligence Systems Design and Applications*, October 2006.
- Zamarrón, A., and Arjona, M. A., (2010), "Detection of stator-winding turn-to-turn faults in induction motors, based on virtual instrumentation", *International Journal of Electrical Engineering Education*, Vol. 47, No.1, pp. 63-72, January 2010.
- Zamarrón, A., Arjona, M.A., Briz, F., and Guerrero, J.M., (2008), "A Virtual Instrument for Detecting Spatial Saliencies- An Electric Machinery Laboratory Experiency", *Computer Application in Engineering Education*. Vol. 16, No. 1, pp. 62-71, May 2008.
- Zeraoulia, A. Mamoune, H. Mangel, M.E.H. Benbouzid, (2005) "A Simple Fuzzy Logic Approach for Induction Motors Stator Condition Monitoring", *Journal of Electricla Systems*, pp. 15-25
- Zouzou, M. Saharaoui, A. Ghogal, and S. Guedidi, (2010), "Detection of Inter-Turn Short- Circuit and Broken Rotor Bars in Induction Motors Using the Partial Relative Indexes: Application on the MCSA", *XIX International Conference on Electrical machines*, ICEM Rome, 6-8 September 2010.