



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

Clasificación de Fallas en el Estator de Motores de Inducción Mediante Redes Neuronales Artificiales

Dr. Antonio Zamarrón Ramírez

zamarron@itleon.edu.mx

Instituto Tecnológico de León



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

Clasificación de Fallas en el Estator de Motores de Inducción Mediante Redes Neuronales Artificiales

Dr. Antonio Zamarrón Ramírez, Raúl Santiago Montero y Daniel Zamarrón Barrón

Resumen—En este artículo se presenta un sistema para la detección y clasificación de fallas por espiras en corto circuito en el estator de motores de inducción usando redes neuronales artificiales. El sistema utiliza las corrientes de fase y voltajes de línea del estator en el dominio de la frecuencia para obtener información del número de espiras en corto circuito del motor. Los descriptores utilizados para formar el patrón de falla son la corriente y voltaje de secuencia negativa, la magnitud del tercer armónico negativo de la corriente, la impedancia negativa y el ángulo de la impedancia negativa. La clasificación de las falla se realiza mediante una red neuronal artificial tipo *backpropagation* de una sola capa. Para obtener información de las fallas se realizaron experimentos a velocidades dentro del rango de 1800 a 1745 rpm. Los resultados obtenidos muestran que se obtiene un mejor rendimiento de la clasificación de la falla cuando el motor se encuentra a plena carga.

Palabras clave— Clasificador, Espiras en corto, Motor de inducción, Redes neuronales.

I. Introducción

El motor de inducción tipo jaula de ardilla es una de las máquinas eléctricas más utilizadas en la industria, por ello resulta necesario darle mantenimiento para



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

mantenerlo funcionando correctamente y prolongar su vida útil. A pesar de las rutinas de mantenimiento preventivo que se realizan al motor, existe un factor de incertidumbre, pues el motor puede presentar fallas poco perceptibles (fallas incipientes) que con el tiempo incrementan su severidad transformándose en fallas importantes, por esta razón muchas de las investigaciones se orientan al mantenimiento de estado o también llamado mantenimiento predictivo. Cuando una falla incipiente está presente en el motor, éste puede continuar funcionando, sin embargo si la avería no se detecta a tiempo, la severidad de esta aumenta y se convierte en una falla importante que reduce el rendimiento del motor o incluso detiene por completo su operación; esta situación puede generar un retraso en la producción al tener que quitar el motor para repararlo o reemplazarlo según sea el caso. Por lo tanto, es imprescindible mantener en constante supervisión al motor o los motores importantes de la línea de producción de tal manera que se puedan evitar al máximo los fallos imprevistos. Una de las fallas que puede presentar el motor de inducción y que es relativamente imperceptible en su etapa incipiente son las generadas por espiras en corto circuito en los devanados del estator. Estas fallas pueden llegar a representar el 21% de todas las fallas que puede tener un motor de inducción (Bellini, 2008); generalmente este tipo de fallas están asociadas a cortos circuitos entre espiras de diferente fase o espiras de una misma fase. Estas últimas son las más comunes debido a que las espiras de una misma fase están separadas eléctricamente por una delgada capa de barniz aislante.

Existen diversas técnicas para realizar el diagnóstico de fallas en motores de inducción, estas se pueden clasificar en técnicas para el diagnóstico en línea o fuera de línea. Algunas técnicas son: Análisis de las corrientes del motor (MCSA por sus siglas en ingles) medidas de los componentes de energía, aproximación del vector de Park, y técnicas de inteligencia artificial, como sistemas difusos y redes neuronales artificiales, entre otras

Las detección y supervisión de fallas en máquinas eléctricas se ha auxiliado de



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

diferentes técnicas, tanto tradicionales como técnicas de inteligencia artificial, sin embargo estas últimas están siendo más utilizadas actualmente debido a que la mayoría requieren una mínima configuración y no dependen de un análisis detallado de los mecanismos ocurridos al presentarse una falla; además de que permiten prescindir de un experto en funcionamientos mecánicos (Filippetti, 2000). Las redes neuronales han sido utilizadas para el diagnóstico de motores de inducción, en (Felippetti, 1996) se presenta una arquitectura de red neuronal para detectar cortos circuitos en los devanados del estator. La estructura de la red fue el perceptrón multicapa con nueve neuronas en la capa oculta. Las entradas que se usan para la red neuronal son las componentes espectrales de la corriente de entrada a la máquina de inducción, la velocidad y el par.

Algunas aplicaciones de las redes neuronales han sido utilizadas para la detección de barras rotas y excentricidades (Zhongming, 2001), para lograr esto se obtienen características a través de la conversión de las corrientes utilizando la transformada wavelet y conociendo la velocidad de la máquina.

También es posible encontrar investigaciones en las que se diagnostican fallas en espiras del estator con redes neuronales que utilizan la corriente de secuencia negativa como en (Villada, 2007), los datos de entrenamiento de la red neuronal son obtenidos a partir de un modelo de la máquina que permite simular fallas internas bajo diferentes condiciones de carga y desequilibrio de tensión implementado en MATLAB, posteriormente se verifica el modelo creado con datos experimentales de motores de 2 y 3HP. En este trabajo se utilizan como descriptores los armónicos de la corriente y el voltaje de alimentación.

II. Metodología

Los motores de inducción con rotor jaula de ardilla, conectados directamente a la línea, funcionan generalmente con un deslizamiento entre 3 y 5 Hz con carga nominal. Para lograr este deslizamiento se coloca el motor en un banco de pruebas y se le aplica carga con un freno electromagnético. En la figura 1 se presenta el motor utilizado



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

durante las pruebas montado en el freno electromagnético.



Figura 1. Banco de frenado electromagnético

En un sistema de reconocimiento de patrones el primer proceso que se tiene es la adquisición o captura de los datos que se pretende clasificar. En este trabajo los datos se obtienen de los voltajes de línea y las corrientes de fase del motor de inducción mediante una tarjeta de adquisición de datos a una frecuencia de 10 kHz.

El motor de inducción en la industria por lo general trabaja con carga, sin embargo no siempre con su carga nominal. Por lo anterior la adquisición de los datos se deben de realizar no solo a la velocidad nominal del motor, sino también a velocidades por encima de ésta. Es conveniente mencionar que en todo el proceso de captura de datos se supone que el voltaje de alimentación es un voltaje balanceado de 220 voltios a una frecuencia de 60 Hz. Estas características no siempre se cumplen cuando se conecta un motor a la línea de la compañía suministradora. Un desbalanceo mayor al 2% de los voltajes de alimentación al motor puede producir un importante desbalanceo en las corrientes del motor, afectando de manera significativa los datos obtenidos de la prueba. Inicialmente solo se tenía contemplado utilizar las corrientes de fase del motor de inducción para la detección de las fallas, sin embargo la literatura indica que el desbalance de los voltajes de alimentación puede crear armónicos en las corrientes del motor que producen el mismo efecto que una o varias espiras en corto circuito. Por tal motivo se decidió tomar también las señales de voltaje que alimentan al motor y medir el grado de desbalance mediante el voltaje de secuencia negativa (Babaa, 2007). Con el voltaje y corriente de secuencia negativa es posible calcular la magnitud y ángulo de



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

la impedancia de secuencia negativa del motor y facilitar la detección de las fallas. Para cada velocidad es posible que exista la falla de una o más espiras en corto circuito, por lo tanto las pruebas a realizar consideran varias velocidades, y para cada velocidad varias fallas producidas por espiras en corto circuito.

En la figura 2 se presenta la señal de voltaje y corriente capturados para una falla de 3 espiras en corto cuando el motor está con carga nominal.

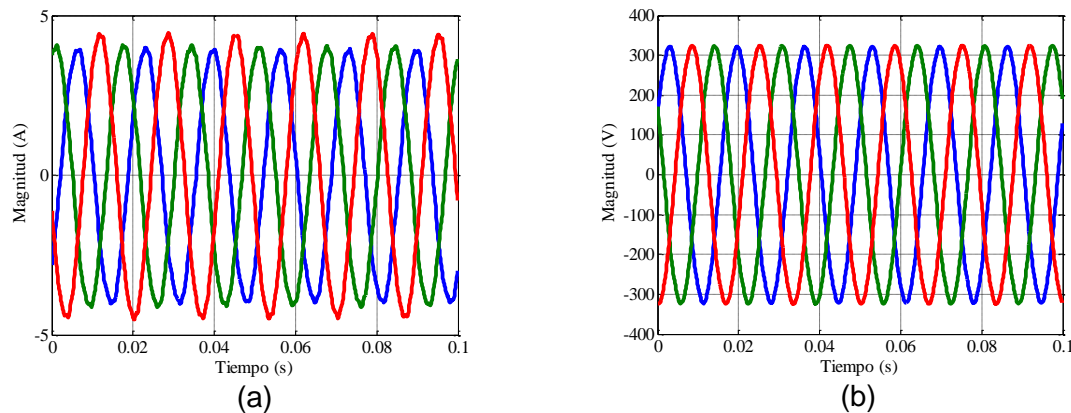


Figura 2. Evolución temporal de a) las corrientes y b) voltajes trifásicos capturados para una falla de 3 espiras en corto y una velocidad de 1745 rpm.

Se puede observar de la figura 2a que una de las corrientes de fase es notablemente mayor que las otras dos, este hecho crea una corriente de secuencia negativa. En la figura 2b se puede ver que los voltajes de línea son muy semejantes entre ellos, por lo que no se crea un voltaje de secuencia negativa.

El programa utilizado para la adquisición y captura de datos fue el LabView®. La interfaz para el despliegue de la información se presenta en la figura 3. La interfaz consta de una ventana principal para mostrar los armónicos del vector complejo de la corriente i_s . Además cuenta con dos ventanas más en la que se presenta la evolución temporal de las corrientes de línea y la trayectoria del vector complejo.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

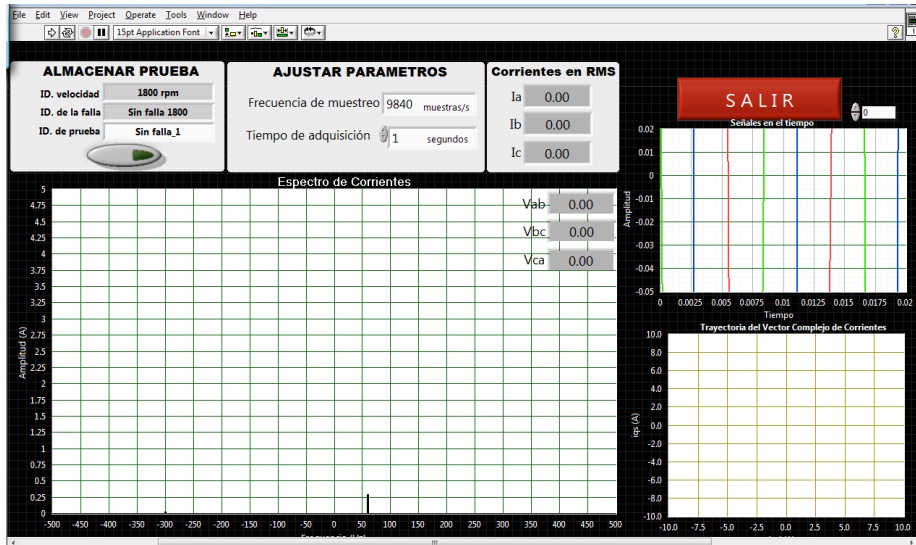


Figura 3. Aspecto de la interfaz del programa para captura de datos en LabView

Para obtener datos reales de las fallas de corto circuito fue necesario mandar modificar el devanado de un motor de inducción de tal forma que se pudieran realizar los cortos circuitos de las espiras a voluntad. Los datos del motor a utilizar se presentan en la Tabla I.

Tabla I – Datos del motor de inducción

Potencia	0.746 KW
Polos	4
V nominal	220 / 440 V
	(rms)
I nominal	3.2 / 1.6 (rms)
Velocidad	1745 rpm

La Figura 4 muestra esquemáticamente el diseño del devanado, incluyendo como se crean las fallas de espira a espira. En esta máquina es posible cortocircuitar de 1 a 10 espiras, sin embargo este trabajo solo contempla cortocircuitar hasta 5 espiras para no sobrecalentar y dañar el devanado del motor durante las pruebas. Para disminuir la corriente de corto circuito se colocó una resistencia de 0.47Ω en serie con la(s) espira(s) cortocircuitada(s). Además de disminuir la corriente de corto circuito en las

“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
Multidisciplinario
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
ISBN: 978-607-95635

bobinas, la resistencia ayudó a emular con mayor eficacia el corto circuito entre espiras en su etapa incipiente.

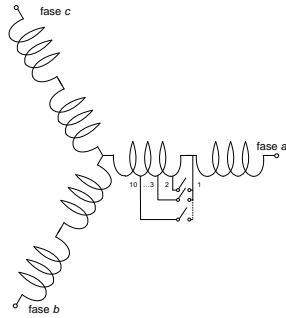


Figura 4. Esquema del devanado modificado

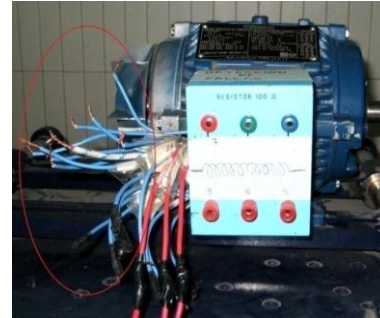


Figura 5 Motor modificado

En la figura 5 se presenta el motor rebobinado y con las terminales disponibles en el exterior para realizar las conexiones y provocar el corto circuito en una o varias espiras.

El proceso del diagnóstico de fallas se basa en el monitoreo de indicadores significativos dependientes del tipo de falla a diagnosticar. Por lo tanto el éxito en la identificación de la falla depende de la confiabilidad de estos indicadores. En (Dash, 2010) se utiliza el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente de un motor de inducción para la detección de fallas en el estator debido a espiras en corto circuito, en (Bouزيد, 2011) se toma en cuenta la magnitud y ángulo de la corriente de secuencia negativa, mientras que en (Fang, 2012) consideran al tercer armónico positivo $3f_e$ ($f_e = 60 \text{ Hz} = \text{frecuencia fundamental}$) de una de las fases de corriente del motor. En (Babaa, 2007) se analizan los armónicos que son más susceptibles al desbalance del voltaje, así como aquellos que pueden ser útiles para la detección de fallas por espiras en corto circuito, entre estos últimos se encuentra el tercer armónico negativo $-3f_e$. En este mismo artículo se menciona que el armónico $3f_e$ no es útil para la detección de las fallas en cuestión aunque años después (Fang, 2012) utiliza este armónico para la detección de la falla demostrando mediante simulación y mediciones que sí es posible



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

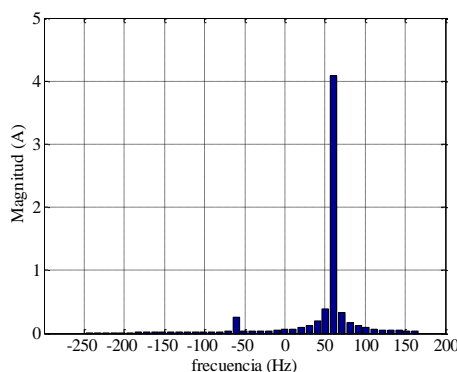
10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

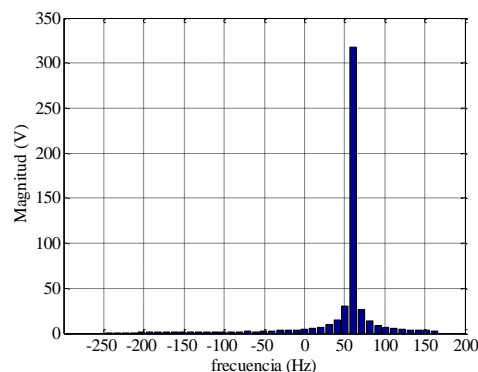
utilizar este armónico para la detección de las fallas. (Moosavi, 2012) por su parte toma en consideración el ángulo de la impedancia de la fase que tiene la espira en corto.

Los descriptores mencionados anteriormente han mostrado en mayor o menor medida ser útiles para la detección de fallas de corto circuito en el estator de los motores de inducción. Utilizar solo uno de estos descriptores para la detección de la falla es posible que falle en ciertas condiciones, como lo es cambio de velocidad, desbalance de voltajes y/o severidad de la falla. Si lo que se quiere es implementar un sistema que permita detectar las fallas a cualquier velocidad dentro de los 3 y 5 Hz de deslizamiento, que considere el desbalanceo de voltaje y cambios en la severidad de la falla, es necesario considerar varios de estos descriptores. En este trabajo se consideran 5 descriptores, la corriente de secuencia negativa, $-f_e$, el tercer armónico negativo de la corriente $-3f_e$, el voltaje de secuencia negativa $-f_e$, la impedancia negativa y el ángulo de esta impedancia. La impedancia negativa se obtiene al dividir el voltaje de secuencia negativa ($-f_e$ de V) y la corriente de secuencia negativa ($-f_e$ de I).

Una vez que se capturan los datos de voltaje y corriente trifásica se procede a obtener el vector complejo de ambas variables, posteriormente se les aplica la transformada rápida de Fourier (FFT) para obtener su espectro y observar la magnitud y frecuencia de cada uno de sus armónicos, en especial de aquellos que serán utilizados como descriptores. En la figura 6 se presenta el espectro de los vectores complejos de la corriente y voltaje de las señales presentadas en la figura 2.



(a)



(b)



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”
 Multidisciplinario
 10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México
 ISBN: 978-607-95635

Figura 6 Espectro del vector complejo de a) la corriente y el b) voltaje de las señales temporales de la figura 2.

Una vez que se ha visto el desbalanceo de corrientes en la figura 2a, era de esperarse que el espectro de corrientes en la figura 6a muestre un armónico en -60 Hz, el cual corresponde a la corriente de secuencia negativa. Casi imperceptible también se tiene un armónico a -180° ($-3f_e$). En la misma figura también se observa a 60 Hz la magnitud del valor de pico de la corriente fundamental del motor. La magnitud del armónico del voltaje a 60 Hz y -60 Hz se pueden encontrar en la figura 6b, aunque este último (voltaje de secuencia negativa) es de una magnitud relativamente pequeña (4 o 5 voltios) y solo es detectable haciendo un acercamiento.

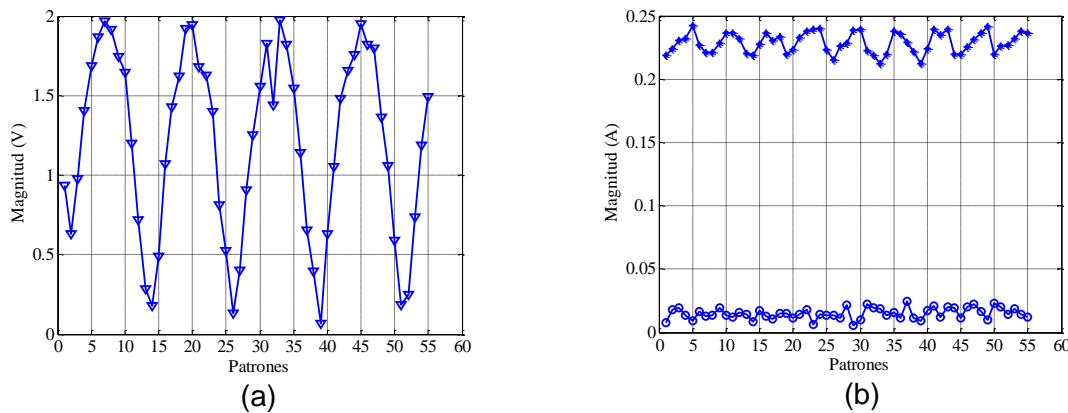


Figura 7. Comportamiento de a) la magnitud del voltaje de secuencia negativa. b) la magnitud de la corriente de secuencia negativa (*) y la magnitud del armónico $-3f_e$ (o) para una velocidad de 1745 rpm y sin espiras en corto.

En la figura 7 se presenta el comportamiento de los descriptores del voltaje de secuencia a negativa, corriente de secuencia negativa y el armónico $-3f_e$.



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

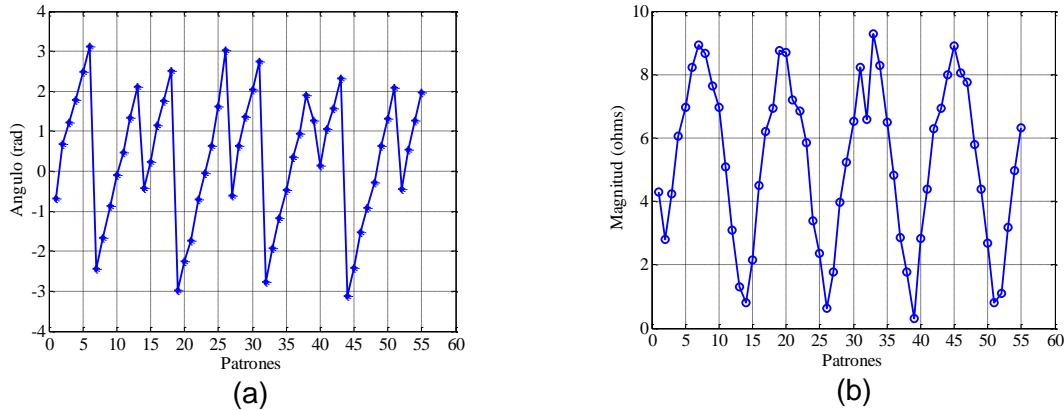


Figura 8. Comportamiento de a) el ángulo y b) magnitud de la impedancia de secuencia negativa para una velocidad de 1745 rpm y sin espiras en corto

En la figura 8 se presenta el comportamiento del ángulo y magnitud de la impedancia de secuencia negativa. Cada patrón tiene sus 5 descriptores y cada falla comprende 55 patrones. De estos 55 patrones el 50% de patrones aproximadamente se utilizan para entrenar la red y el resto para prueba.

III. Resultados

En la Tabla II se presenta el rendimiento obtenido solo para las velocidades de 1800 rpm (motor sin carga) y 1745 rpm (plena carga) por motivos de espacio. Se puede observar que los mejores rendimientos se obtienen cuando se utilizan los cinco descriptores o cuando solo se usan los correspondientes a la magnitud y ángulo de la impedancia negativa. El rendimiento indica el porcentaje de fallas identificadas correctamente, el complemento de este porcentaje indica que las otras fallas fueron clasificadas en fallas que no les correspondía. Aún con el rendimiento obtenido, el clasificador desarrollado es fiable, ya que de la matriz de confusión que se presenta en la Tabla III se puede observar que la mayor parte de los patrones de falla se clasifican correctamente de acuerdo a su clase. De esta tabla, por votación, es posible identificar el tipo de falla, siendo la de mayor incidencia la seleccionada.

Tabla II Rendimiento general para 1800 rpm y 1745 rpm usando diferentes descriptores

Atributo	Descriptores en cada patrón de entrada a la RNA
----------	---



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

$-3f_e$	√				
$-f_e$ de I	√	√			
$-f_e$ de V	√	√	√		
Magnitud de Z	√	√	√	√	
Angulo de Z	√	√	√	√	√
Rendimiento 1800 rpm	61.90%	48.21%	60.12%	60.12%	55.36%
Rendimiento 1745 rpm	71.43%	55.95%	68.45%	69.05%	62.5%

Tabla III Matriz de confusión para 1745 rpm y considerando todos los descriptores

	Clase 1 motor sano	Clase 2 1 espira	Clase 3 2 espiras	Clase 4 3 espiras	Clase 5 4 espiras	Clase 6 5 espiras
Falla 0	11	8	3	6	0	0
Falla 1	8	19	0	1	0	0
Falla 2	1	4	18	3	2	0
Falla 3	0	2	0	25	1	0
Falla 4	0	0	3	2	20	3
Falla 5	0	0	1	0	0	27

IV. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un sistema para la detección y clasificación de fallas por espiras de corto circuito en motores de inducción usando redes neuronales. Se ha mostrado que los descriptores utilizados son adecuados para detectar fallas de espiras en corto circuito en el estator en su estado incipiente. A pesar de que el clasificador no muestra un rendimiento del 100%, es posible implementar de forma práctica este clasificador ya que con ayuda de la matriz de confusión es posible detectar fácilmente cuál es el tipo de falla que está ocurriendo. Si se requiere acelerar el proceso de clasificación es posible utilizar solo la magnitud y ángulo de la impedancia negativa como descriptores, ya que de acuerdo a los resultados, usando estos dos descriptores también se obtiene un porcentaje de rendimiento adecuado para la clasificación e identificación de la falla.

V. Referencias

Babaa, F.; Khezzar, A.; Boucherma, M.; Nemmour, A. L., (2007). "Condition monitoring of stator faults in induction motors: Part I— Analytical investigation on the effect of the negative voltage



“CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN 2014”

Multidisciplinario

10 y 11 de abril de 2014, Cortazar, Guanajuato, México

ISBN: 978-607-95635

- sequence." *Electrical Machines and Power Electronics, 2007. ACEMP '07. International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics*, pp.205,210, 10-12 Sept. 2007
- Bellini, A., Filippetti, F., Tassoni C., and Capolino G. (2008). Advances in Diagnostic Techniques for Induction Machines, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 55, No. 12, December 2008
- Bouزيد, M.; Champenois, G.,(2011). "A novel reliable indicator of stator windings fault in induction motor extracted from the symmetrical components," *Industrial Electronics (ISIE), 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp.489,495, 27-30 June 2011
- Dash, R.N.; Subudhi, B.; Das, S. (2010), "A comparison between MLP NN and RBF NN techniques for the detection of stator inter-turn fault of an induction motor," *Industrial Electronics, Control & Robotics (IECR), 2010 International Conference on Industrial Electronics, Control & Robotics*, pp.251,256, 27-29 Dec. 2010
- Fang Duan; Zivanovic, R.,(2012). "A model for induction motor with stator faults," *Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2012 22nd Australasian*, pp.1,5, 26-29 Sept. 2012
- Filippetti, F. Uncini, A. Piazza, C. Campolucci, P. Tassoni, C. Franceschini, G.(1996). Neural network architectures for fault diagnosis and parameter recognition in induction machines, *Electrotechnical Conference, 8th Mediterranean Volume 1*, 13-16 May 1996 p. 289 - 293 vol.1
- Filippetti, F., Franceschini, G. Grellet, G. Salles, G. Tassoni, C. (2000). Monitoring of Induction Motor Load by Neural Network Techniques, *IEEE Transactions on Power Electronics Society*, July 2000
- Moosavi, S.S.; Djerdir, A.; Ait-Amirat, Y.; Kkuburi, D. A., (2012). "Impedance angle changes analysis applied to short circuit fault detection," *(ICEM), 2012 XXth International Conference on Electrical Machines*, pp.1724,1729, 2-5 Sept. 2012
- Villada, Fernando, Cadavid D. R. (2007). Diagnóstico de Fallas en Motores de Inducción Mediante la Aplicación de Redes Neuronales Artificiales. *Información Tecnológica-Vol. 18 N°2-2007*, pág.: 105-112.
- Zhongming Ye (2001). Rotor bar breakage detection of three phase induction motors by wavelet packet decomposition and artificial neural network, *Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC. 2001 IEEE 32nd Annual*