

Modelamiento del motor de inducción para estudios de cortocircuitos entre espiras del estator

Modelling of induction motor inter-turn faults for diagnostics studies

Diego Raúl Cadavid, Fernando Villada, Esteban Velilla*

Grupo de Manejo Eficiente de la Energía – GIMEL, Universidad de Antioquia, A.A. 1226, Medellín, Colombia

(Recibido el 20 de febrero de 2009. Aceptado el 18 de agosto de 2009)

Resumen

En este trabajo se presenta la implementación en Matlab del modelo del motor de inducción para realizar estudios de cortocircuitos entre espiras del estator. Para este propósito se usan los bloques del Simulink y los parámetros requeridos por el modelo son obtenidos a partir de la norma IEEE112. Se presentan los resultados teóricos, se muestra la aplicación del modelo en la determinación de la corriente de secuencia negativa como indicador de falla y se describen los resultados de la aplicación experimental a un motor de inducción de 2 Hp el cual se ha acondicionado para realizar corto entre espiras. Se concluye el buen desempeño del modelo al permitir obtener con precisión variables indicativas de fallas en el devanado estatórico de un motor de inducción.

----- *Palabras clave:* Motores de inducción, fallas entre espiras, modelo del motor

Abstract

The implementation in Simulink of an induction motor model to study inter-turn short circuits on the stator winding is presented in this paper. The theoretical results are presented. The main parameters of the motor are determined and the experimental results in a 2 Hp induction motors which have been prepared to make for inter-turn short circuits are described.

----- *Keywords:* Induction motors, inter-turn faults, motor model

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 4 + 219 85 96, fax: + 57 + 4 + 211 05 07, correo electrónico: dcadavid@udea.edu.co (D. Cadavid).

Introducción

El modelamiento del motor de inducción con espiras en cortocircuito en el devanado del estator, es el primer paso para el desarrollo de un esquema de detección de falla entre espiras. La utilidad de los modelos para diagnosticar fallas, es limitada porque es teóricamente imposible incluir todas las no linealidades que existen en una máquina real. Sin embargo, los modelos son requeridos para obtener algunas características de las señales de falla y tener en cuenta sus efectos. También nos permiten observar los efectos de la fuente de alimentación, realizar análisis de sensibilidad y desarrollar índices de diagnóstico para determinar no solo la falla si no su severidad.

El estudio de las diferentes condiciones de operación del motor de inducción ha sido hecho por varios métodos. Uno de ellos es el método de elementos finitos (FEM) en la cual se pueden realizar cálculos detallados sobre todo en regiones que tienen formas complejas como se muestra en [1]. Sin embargo, el análisis transitorio utilizando FEM consume mucho tiempo especialmente cuando se consideran asimetrías en el cuerpo del motor. Otro método es el basado en el cálculo de las inductancias de los circuitos del motor (Método de la función devanado: WFA) [2-4], este método permite obtener una mejor comprensión del funcionamiento del motor además de generar un mejor entendimiento de sus características. En el modelo convencional abc cuyas ecuaciones son expresadas en el sistema de coordenadas dq0, todas las variables son expresadas en diferentes marcos de referencia, típicamente asume devanados simétricos, concentrados y distribuidos sinusoidalmente; este último es el más utilizado por su simplicidad e implementación práctica en programas como Simulink de Matlab [5-8].

La mayoría de los modelos referenciados, consideran las suposiciones clásicas tales como: la distribución del flujo magnético es sinusoidal a lo largo del entrehierro, los voltajes y corrientes son sinusoidales, los devanados están igualmente espaciados y la saturación no es considerada. La complejidad de las ecuaciones resultantes

cuando se modela la máquina, depende de las suposiciones iniciales y del método que se utilice.

Por ejemplo, una suposición típica es que cuando el porcentaje de falla es pequeño, el funcionamiento del motor fallado, difiere levemente del comportamiento de una máquina simétrica, por lo que las espiras cortocircuitadas pueden ser acopladas como un devanado auxiliar a la fase fallada, tal como se muestra en la figura 1.

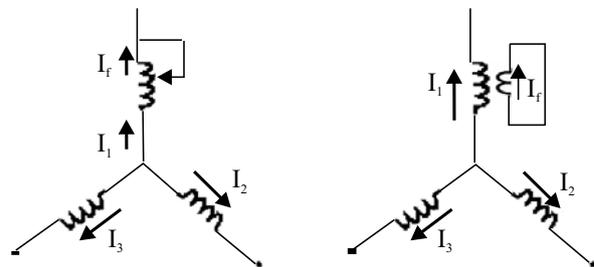


Figura 1 Esquema del devanado del estator con cortocircuito en una fase: (a) esquema real, (b) esquema simplificado

En este trabajo el modelo para detectar fallas eléctricas incipientes en el devanado del estator desarrollado por Arkan et al. [5] es implementado en Simulink. Dicho modelo se acondiciona para determinar la corriente de secuencia negativa I_n y generar los patrones para entrenar una red neuronal propuesta como nuevo algoritmo de diagnóstico en la referencia [9]. Las principales ventajas que llevaron a seleccionar este modelo se relacionan a continuación:

- En la implementación, no se necesita conocer las características de diseño ni geométricas del motor.
- El modelo asume los devanados igualmente espaciados.
- Solo es necesario conocer las reactancias del estator, rotor y la de magnetización, además de las resistencias del estator y rotor.
- Las ecuaciones están expresadas en el marco de referencia qd0.
- El tiempo de simulación es relativamente corto.

- Se pueden determinar los principales parámetros del motor: corriente en las tres fases, velocidad, torque, corriente de falla, componentes de secuencia de tensión y corriente; se puede aplicar la fuente de voltaje balanceada o desbalanceada; se puede incluir una resistencia externa para limitar la corriente de falla.

Modelo del motor [5]

El modelo parte de la teoría clásica del motor de inducción expresando las variables eléctricas en forma compacta por las siguientes ecuaciones:

$$V_{abc}^s = r_{abc}^s i_{abc}^s + p \lambda_{abc}^s \quad (1)$$

$$0 = r_{abc}^r i_{abc}^r + p \lambda_{abc}^r \quad (2)$$

Donde $p = d/dt$; los índices s, r significan referido al estator y rotor respectivamente, λ es flujo, r es la matriz de resistencias y abc significa marco de referencia abc .

El modelo asume que una de las fases tiene dos devanados en serie: $N_a = N_s = N_{us} + N_{sh}$, en la que N_s es el número de espiras total del devanado, N_{us} es el número de espiras no cortocircuitadas y, N_{sh} es el número de espiras cortocircuitadas. Las otras fases tienen el número de espiras iguales a N_s , es decir, $N_b = N_s$ y $N_c = N_s$.

Al aplicar la matriz de transformación de Park, las ecuaciones (1) y (2) son transferidas del eje abc al eje qd . Haciendo esto, el número de espiras cortocircuitadas N_{sh} , puede ser transferido al eje q . La porción del devanado cortocircuitado solo aparece en el eje q como se muestra en la figura 2.

Las corrientes son calculadas mediante los flujos que enlazan al estator y rotor en un motor de inducción alimentado con una fuente trifásica sin neutro, como se ilustra en la ecuación (3).

$$\begin{bmatrix} \lambda_q^{sh} \\ \lambda_q^s \\ \lambda_d^s \\ \lambda_q^r \\ \lambda_d^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q^{sh} & L_q^{ssh} & 0 & L_q^{shr} & 0 \\ L_q^{ssh} & L_q^s & 0 & L_q^{sr} & 0 \\ 0 & 0 & L_d^s & 0 & L_d^{sr} \\ L_q^{shr} & L_q^{sr} & 0 & L_q^r & 0 \\ 0 & 0 & L_d^{sr} & 0 & L_d^r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q^{sh} \\ i_q^s \\ i_d^s \\ i_q^r \\ i_d^r \end{bmatrix} \quad (3)$$

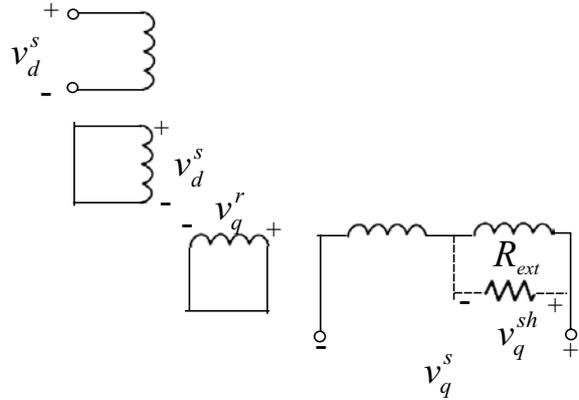


Figura 2 Modelo del devanado del estator asimétrico

Las ecuaciones de flujo son expresadas en forma compacta en la ecuación (4):

$$\begin{aligned} \lambda_q^{sh} &= \int (v_q^{sh} - r_{sh} i_q^{sh}) dt \\ \lambda_q^s &= \int (v_q^s - v_q^{sh} - r_{11}^s i_q^s - r_{12}^s i_d^s) dt \\ \lambda_d^s &= \int (v_d^s - r_{21}^s i_q^s - r_{22}^s i_d^s) dt \\ \lambda_q^r &= \int (w_r \lambda_d^r - r_r^r i_q^r) dt \\ \lambda_d^r &= -\int (w_r \lambda_q^r + r_r^r i_d^r) dt \end{aligned} \quad (4)$$

Donde r_{sh} es la resistencia del devanado cortocircuitado, R_{ext} es la resistencia externa que limita la corriente de cortocircuito, q y d se refieren a ejes de cuadratura y directo respectivamente.

El cálculo de las resistencias e inductancias están dadas en la referencia [5]. La velocidad mecánica puede determinarse de la ecuación de torque como se ilustra en las ecuaciones (5) y (6).

$$w_r(t) = \frac{P}{2J} \int (T_{em} + T_{mech} - T_{damp}) dt \quad (5)$$

$$T_{em} = \frac{3P}{2J} (\lambda_d^s i_q^s - \lambda_q^s i_d^s) \quad (6)$$

Donde: w_r es la velocidad mecánica del motor, T_{mech} es el torque mecánico aplicado externamente, T_{damp} es el torque de amortiguamiento en dirección opuesta a la velocidad del rotor y J es la inercia del motor; q y d se refieren a ejes de cuadratura y directo respectivamente.

Aplicación del modelo

Los resultados de la simulación aplicados a un motor (Potencia = 2 Hp, V = 220 Vrms, f = 60 Hz, P = 4, J = 0,03 kg.m², N = 256 espiras por fase, Xs = 1,998 Ω, Xr = 1,998 Ω, Xm = 63,168 Ω, Rs = 1,414 Ω, Rr = 0,947 Ω) se ilustran en las figuras 3, 4 y 5.

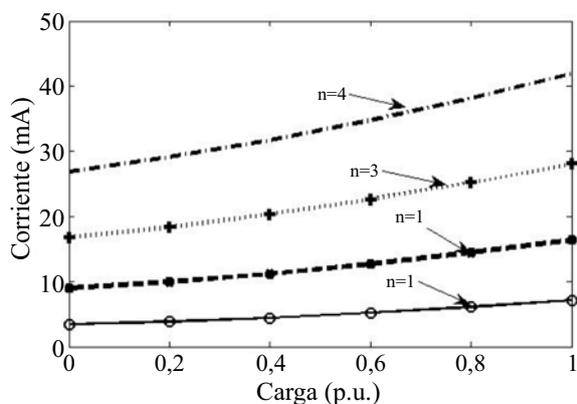


Figura 3 I_n versus el porcentaje de carga con impedancia de falla de 0,3Ω

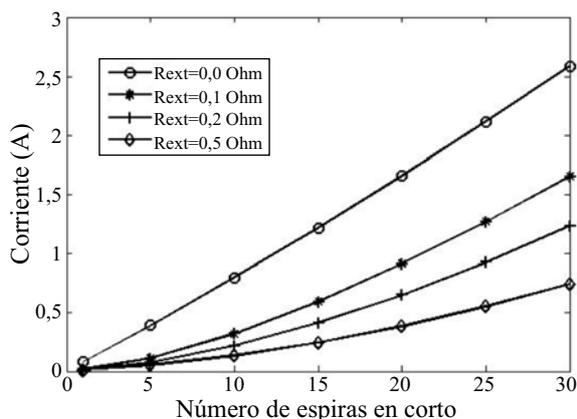


Figura 4 I_n versus el número de espiras en corto, plena carga

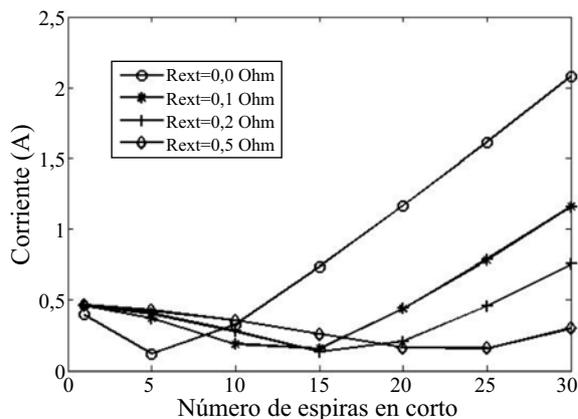


Figura 5 I_n versus el número de espiras en cortocircuito, plena carga y con desbalance de voltaje del 2,8%

La figura 3, muestra que la corriente de secuencia negativa (I_n) es aproximadamente constante para diferentes condiciones de carga y se incrementa con el número de espiras en corto. La figura 4 muestra cómo varía la corriente de secuencia negativa en función del número de espiras en cortocircuito para diferentes valores de resistencia externa (limitadora de la falla). Se encuentra que existe una relación casi lineal entre I_n y el porcentaje de falla a pesar de que dicha corriente es limitada por la impedancia de falla; en situaciones reales donde el valor de la resistencia limitadora es casi nulo el incremento en la corriente sería mucho más apreciable.

La figura 5 ilustra el efecto de las variaciones de la fuente de potencia (desbalance de voltaje con la secuencia $V_a < V_b < V_c$ y falla en la fase "a") sobre I_n . Esta variación de I_n inicialmente decreciente y luego creciente se debe a que en general, la corriente de secuencia inversa en estado de falla, puede aumentar o disminuir en presencia del desbalance de tensión en función del ángulo del mismo relativo a la fase fallada. La tabla 1 ilustra cómo varían las componentes de secuencia cuando se varía solamente la fuente de tensión de 0,5% a 3% de desbalance para un motor sin falla.

Tabla 1 Variaciones de las componentes de secuencia en función del número de espiras en cortocircuito. $R_{ext} = 0,3 \Omega$, plena carga

n	I_n (A)	$angI_n$ (grados)	I_p (A)	$angI_p$ (grados)	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)
0	0,000	0,000	4,782	60,690	4,782	4,782	4,782
1	0,007	82,997	4,811	60,800	4,817	4,810	4,805
3	0,028	79,255	4,819	60,864	4,846	4,814	4,799
5	0,058	77,217	4,827	60,940	4,882	4,813	4,785
7	0,096	75,959	4,833	61,024	4,925	4,809	4,765
9	0,142	75,112	4,837	61,115	4,975	4,800	4,740
10	0,168	74,784	4,839	61,161	5,002	4,794	4,725
20	0,513	72,933	4,847	61,578	5,350	4,708	4,524
30	0,996	71,791	4,849	61,627	5,832	4,607	4,274

Los resultados de la simulación en estado transitorio para el motor con falla se ilustran en las figuras 6 a 9.

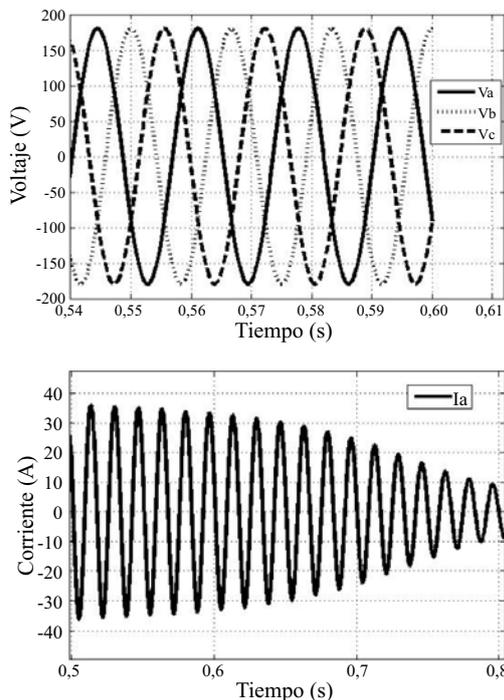


Figura 6 Característica transitoria del motor de 2 Hp a plena carga y con falla entre espiras, $R_{ext} = 0,2 \Omega$, espiras en corto, $N=5$: (a) Tensión, (b) corriente transitoria

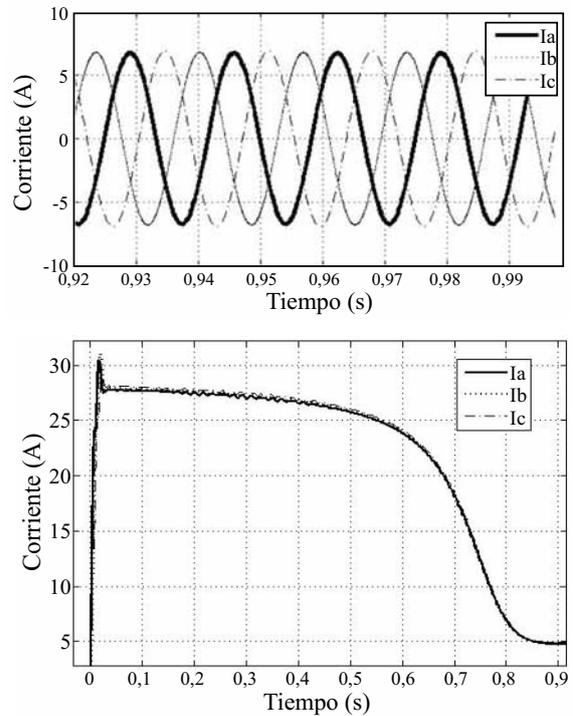


Figura 7 Característica transitoria del motor de 2 Hp a plena carga y con falla entre espiras, $R_{ext} = 0,2 \Omega$, espiras en corto, $N=5$: (a) Corriente estado estable, (b) corriente transitoria rms

Analizando las figuras 3 a 9 y la tabla 1, podemos resumir los siguientes resultados:

- En general, la corriente de secuencia negativa, I_n , en estado de falla, puede aumentar o disminuir en presencia del desbalance de tensión en función del ángulo del mismo relativo a la fase fallada, es decir, el desbalance de tensión puede “enmascarar” la falla haciendo difícil su detección.
- La impedancia asociada al cortocircuito reduce considerablemente la corriente I_n , (en el ejemplo, de 76 mA se reduce a 7 mA cuando la impedancia cambia de 0Ω a 3Ω para una espira en corto); esto significa que la detección de la falla se hace más difícil para pocas espiras y cuando se está iniciando dicha falla debido al elevado aislamiento asociado a ella.
- Los ángulos asociados a cada componente de secuencia varían debido a la simetría en el motor cuando se presenta un cortocircuito entre espiras.
- Cuando ocurre un cortocircuito entre espiras, el torque presenta una oscilación del orden de dos veces la frecuencia de la red, aun en estado estable; esto es debido a que la corriente de secuencia negativa, introduce un freno en el torque del motor.

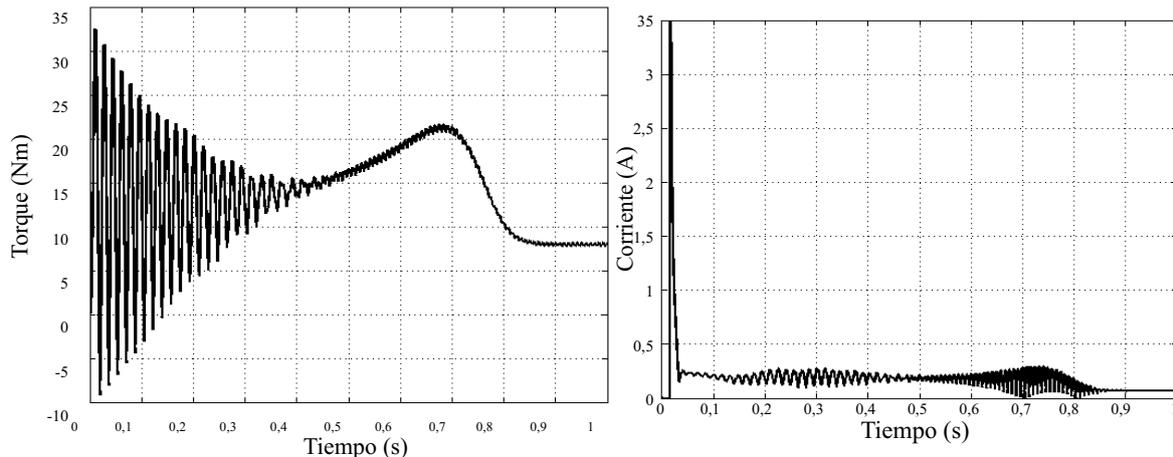


Figura 8 Característica transitoria del motor de 2 Hp a plena carga y con falla entre espiras, $R_{ext}= 0,2 \Omega$, espiras en corto, $N=5$: (a) Torque, (b) corriente de secuencia negativa

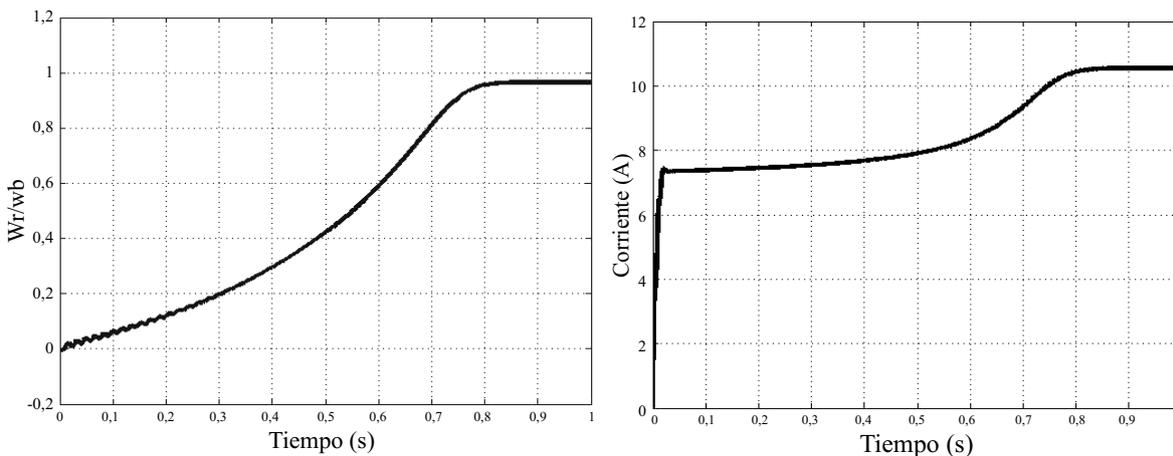


Figura 9 Característica transitoria del motor de 2 Hp a plena carga y con falla entre espiras, $R_{ext}= 0,2 \Omega$, espiras en corto, $N=5$: (a) Velocidad, (b) corriente de falla externa

Aplicación experimental

En esta aplicación se utilizó un motor de inducción jaula de ardilla de 2 Hp. La figura 10 ilustra el montaje experimental.

El primer paso consistió en realizar las pruebas necesarias para determinar los parámetros del motor de acuerdo a la estándar IEEE Std 112-1991 y con las simplificaciones presentadas por Cathey y Rodríguez [10]. Para determinar la precisión de todos los parámetros medidos, se sometió el motor a diferentes condiciones de carga obteniéndose los resultados de la tabla 2.

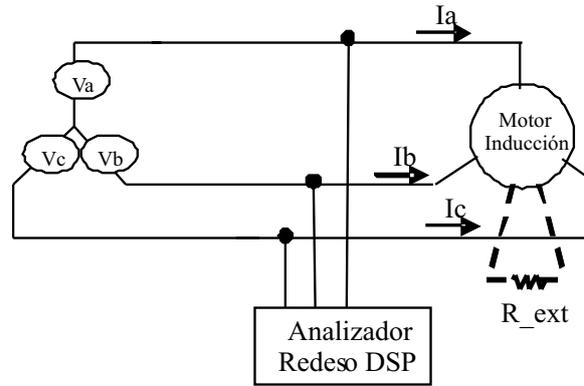


Figura 10 Montaje experimental

Tabla 2 Ensayo bajo diferentes condiciones de carga para determinar la precisión de los parámetros del motor

Velocidad medida (rpm)	Corriente trifásica medida (A)	Corriente trifásica simulada (A)	Error de la corriente (%)
1756	3,585	3,5530	0,89
1759	3,470	3,3387	3,79
1766	2,992	3,0304	-1,29
1769	2,899	2,8269	2,50
1774	2,568	2,6244	-2,21
1777	2,412	2,4852	-3,04
1779	2,324	2,3589	-1,49
1789	2,023	2,0456	-1,12

Para medir las componentes de secuencia, se instaló un analizador de redes con la conexión del neutro a la fuente de potencia y se registraron los tres voltajes de fase y las tres corrientes para diferentes condiciones de carga. Se realizaron diferentes ensayos con el motor sano y en cortocircuito adicionando una resistencia externa para limitar la corriente de falla como lo muestra la figura 10. El cálculo de las componentes de secuencia se determinó con las ecuaciones que se relacionan a continuación:

$$\begin{bmatrix} V_o \\ V_p \\ V_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} I_o \\ I_p \\ I_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde el índice *p*, *n* y *o*, significan las secuencia positiva, negativa y cero de los fasores de tensión y corriente respectivamente y $a = \exp(j2\pi / 3)$.

Los resultados de las simulaciones y medidas experimentales (figuras 11 a 13) muestran que el modelo implementado, reproduce con buena precisión los datos experimentales; además, las variables medidas y simuladas tienen la misma tendencia. El modelo implementado se comparó en estado estable con el modelo presentado en *SimPowerSystems* de *Matlab 6.5*, los resultados fueron iguales.

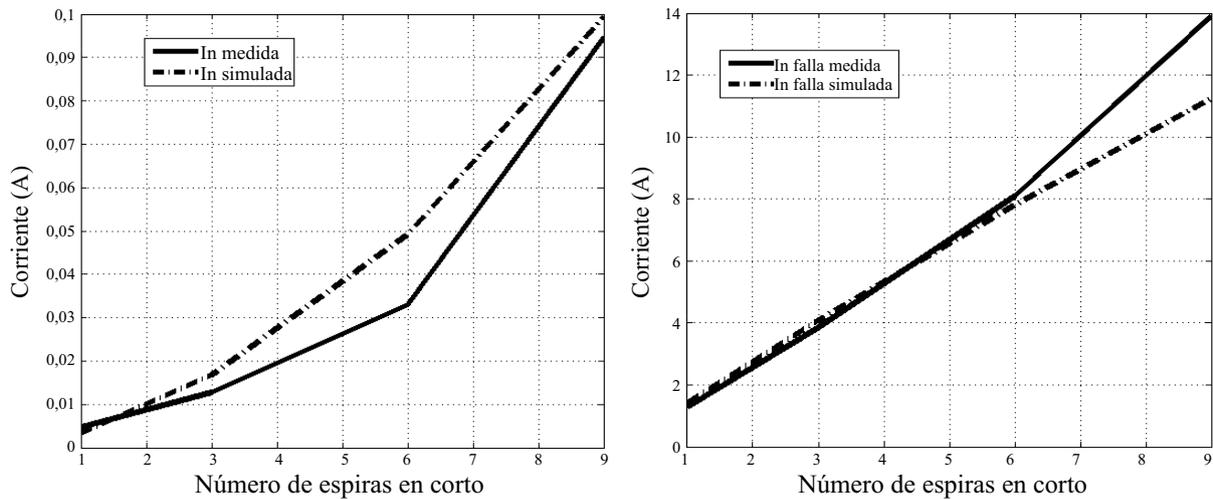


Figura 11 Medida y simulación de las corrientes en el motor en vacío, $R_{ext} = 0,22\Omega$: (a) Corriente de secuencia negativa, (b) corriente de falla externa

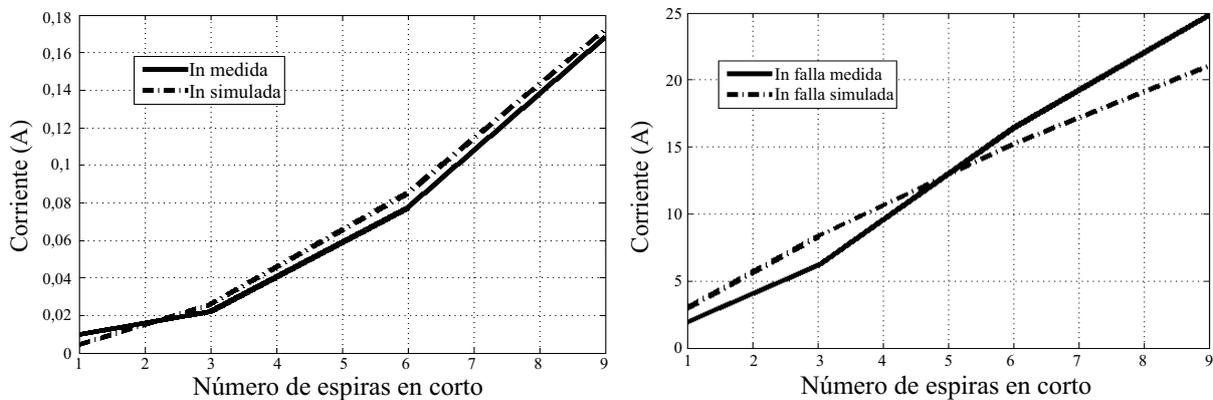


Figura 12 Medida y simulación de las corrientes en el motor en vacío, $R_{ext} = 0,095\Omega$: (a) Corriente de secuencia negativa, (b) corriente de falla externa

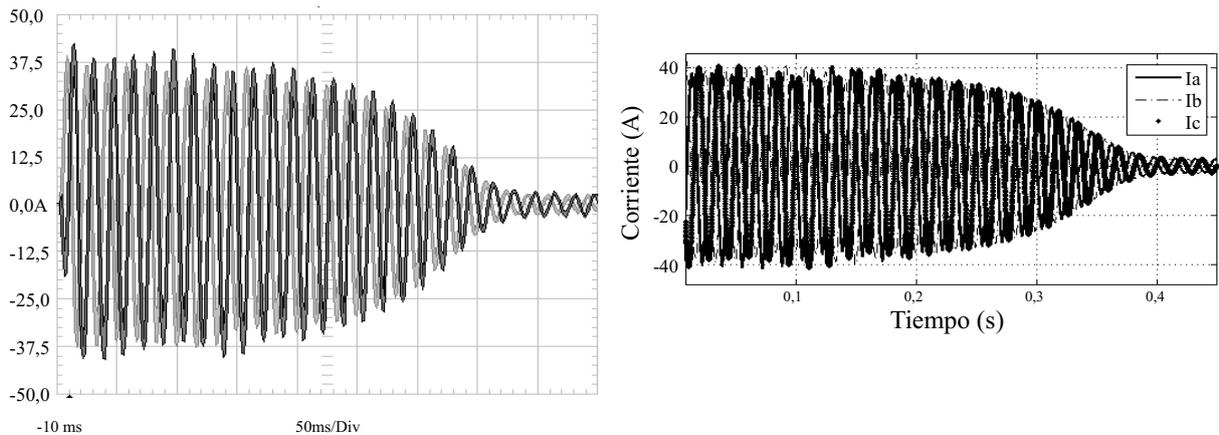


Figura 13 Medida y simulación de la corriente transitoria en el motor en vacío: (a) Medida, (b) simulada

Conclusiones

En este trabajo se implementó el modelo del motor de inducción el cual considera falla entre espiras del estator. Se ilustró su aplicación en la determinación de la corriente de secuencia negativa como indicador de falla, en estado estable y transitorio. Se mostraron los resultados experimentales en un motor de 2 Hp. Se concluye que el modelo reproduce con buena precisión las variables de interés, además de que puede ser aplicado para la obtención de otras variables indicadoras de fallas.

Referencias

1. C. Rojas, M. Melero, M. Cabanas, J. M. Cano, G. A. Orcajo, F. Pedrayes. "Finite Element Model for the Study of Inter-Turn Short Circuits in Induction Motors." *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*. September 1-3. Vol. 1. 2007. pp. 415-419.
2. S. Williamson, K. Mirzoian. "Analysis of Cage Induction Motors with Winding Fault." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. Vol. 104. 1985. pp. 1838-1842.
3. X. Luo, Y. Liao, H. Toliyat, A. El-Antably, T. Lipo. "Multiple Coupled Circuit Modeling of Induction Machines." *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 31. 1995. pp. 311-317.
4. M. Joksimovic, J. Penman. "The Detection of Inter-Turn Short Circuits in the Stator Windings of Operation Motors." *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 47. 2000. pp. 1078-1084.
5. M. Arkan, D. Kostic, P. J. Unsworth. "Modelling and Simulation of Induction Motor for Stator Fault Diagnosis." *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives*. September 1-3. Vol 1. 2001. pp. 537-546.
6. K. Monia, C. Gérard, M. Najiba, S. Laurent, Khaled Jelassi. "An Effective Neural Approach for the Automatic Location of Stator Interturn Faults in Induction Motor," *IEEE Transactions On Industrial Electronics*. Vol. 55. 2008. pp. 4277-4289
7. M. Tallam, G. Habetler, G. Herley, "Transient Model for Induction Machines With Stator Winding Turn Faults," *IEEE Transaction on Industry Applications*. Vol. 38. 2000. pp. 632-637.
8. M. A. Cruz, A. J. Cardoso, "The Method of Multiple Reference Frames Applied to the Diagnosis of Stator Faults in Three-phase Induction Motors," *Proceeding 4th International Conference on Power Electronics and Motion Control*. Xian. China. 2004. pp. 14-16.
9. F. Villada, D. Cadavid, "Diagnóstico de fallas en motores de inducción mediante la aplicación de redes neuronales artificiales". *Información Tecnológica*. Vol. 18. 2007. pp. 105-112.
10. J. Jimmie Cathey, J. Rodríguez, *Máquinas eléctricas: Análisis y diseño aplicando Matlab*. Ed. McGraw Hill. México. 2002. pp. 335-340.