

UNA ESTRATEGIA BASADA EN MODELOS PARA EL DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN EL ESTATOR DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Cristian H. De Angelo ^{*,2} Guillermo R. Bossio ^{*,2}
Santiago J. Giaccone ^{*,1} Jorge A. Solsona ^{**2}
María I. Valla ^{***,2} Guillermo O. García ^{*,2}

** Grupo de Electrónica Aplicada, Fac. de Ingeniería,
Universidad Nacional de Río Cuarto, Ruta Nac. #36 Km.
601, (X5804BYA) Río Cuarto, Córdoba, Argentina -
cdeangelo@ieee.org*

*** Instituto "Alfredo Desages", DIEC, Universidad
Nacional del Sur, Avda. Alem 1253 (B8000CPB) Bahía
Blanca, Argentina - jsolsona@uns.edu.ar*

**** Laboratorio de Electrónica Industrial, Control e
Instrumentación, Universidad Nacional de La Plata, CC
91, (1900) La Plata, Argentina - m.i.valla@ieee.org*

Resumen: Se presenta una estrategia para el diagnóstico de fallas en el estator de los motores de inducción mediante la información contenida en las tensiones y corrientes de alimentación. La estrategia propuesta está basada en la generación de un vector de residuos específicos por medio de un observador de estados, el cual permite detectar la fase dañada y cuantificar el número de espiras en cortocircuito. La estrategia de diagnóstico es muy poco sensible a los cambios de carga o perturbaciones de la red de alimentación tales como armónicos o desbalances.
Copyright © 2007 CEA-IFAC

Palabras Clave: Diagnóstico de fallas, fallas en el estator, motor de inducción.

1. INTRODUCCIÓN

El cortocircuito en los bobinados del estator es una de las principales causas de falla de las máquinas eléctricas (Nandi *et al.*, 2005). El deterioro gradual de la aislación de los bobinados puede producirse por calentamiento excesivo, sobretensiones transitorias, movimiento de bobinas o contaminación. Esta falla produce corrientes elevadas y genera un sobrecalentamiento en el bobinado que puede rápidamente resultar en severas fallas entre bobinados de diferentes fases o entre los bobinados

y tierra, produciendo un daño irreversible en los mismos o en el núcleo (Siddique *et al.*, 2005). Por este motivo, es muy importante la detección de fallas incipientes entre espiras durante la operación del motor.

Existen muchas propuestas para el diagnóstico de fallas en el estator de los motores de inducción (MI). Algunas estrategias se basan en el monitoreo de la corriente de secuencia negativa (Tallam *et al.*, 2002) y otras en el radio del vector corriente (Cruz and Cardoso, 2001). Estas estrategias son sensibles a los desbalances en la tensión de alimentación y por tal motivo pueden generar falsas alarmas. Otras estrategias, basadas en el

¹ Becario del CONICET, Estudiante Posgrado UNRC-UNS.

² Investigador del CONICET.

monitoreo de las componentes de la matriz de impedancias de secuencia (Verucchi *et al.*, 2004) (Lee *et al.*, 2003) o mediante la teoría de múltiples marcos de referencia (Cruz and Cardoso, 2005), permiten desacoplar los efectos producidos por las perturbaciones de tensión y son, en general, poco sensibles al estado de carga del motor. Sin embargo, todas estas estrategias sólo son aplicables en máquinas que trabajan en régimen permanente, es decir sin variaciones transitorias de carga y de velocidad. Otra característica importante, deseable en una estrategia de diagnóstico de fallas en el estator, es la rapidez de respuesta, dado que dichas fallas pueden evolucionar muy rápidamente (Tallam *et al.*, 2003).

En este trabajo se presenta una nueva estrategia para el diagnóstico de fallas en el estator de los MI basada en la generación de un vector de residuos específicos por medio de un observador de estados. Esto permite detectar la fase dañada y cuantificar el número de espiras en cortocircuito. Una propuesta similar se presenta en (Kallesoe *et al.*, 2004) donde se utiliza un observador adaptivo para estimar la cantidad de espiras en cortocircuito. Sin embargo, en dicha propuesta el observador es diseñado considerando el modelo del motor con falla en una sola fase. Así, para detectar fallas en cualquiera de las fases es necesario correr simultáneamente tres modelos del motor, incluyendo en cada modelo la falla en una fase diferente.

Para evitar esto, en la presente propuesta se generaliza el modelo del MI con fallas en el estator de manera que es necesario solamente un observador para determinar un residuo vectorial que permite diagnosticar la magnitud de la falla y la fase en la que se encuentra. Adicionalmente se propone un método para separar del error de estimación las componentes producidas por la falla de las producidas por las desviaciones en los parámetros. De esta manera, la componente del error de estimación producida por la falla se utiliza como residuo específico, mientras que la otra componente se emplea para estimar la velocidad mediante un esquema adaptivo.

El trabajo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta el modelo dinámico del MI con falla en el estator. La estrategia de detección de fallas propuesta se describe en la sección 3. En las secciones 4 y 5 se presentan resultados de simulación y experimentales, respectivamente, que validan la propuesta. Finalmente, en la sección 6 se presentan las conclusiones.

2. MODELO DEL MOTOR DE INDUCCIÓN CON FALLA EN EL ESTATOR

Para el diseño y evaluación de las estrategias de diagnóstico es necesario contar con modelos

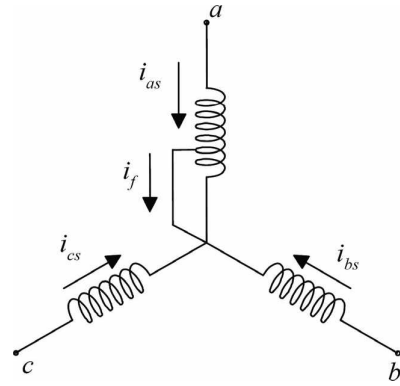


Figura 1. Esquema de las fases del estator con un cortocircuito entre espiras de la Fase a.

que permitan incluir los efectos de las fallas en el motor. En (Tallam *et al.*, 2002) se propone un modelo dinámico del MI con cortocircuitos entre espiras de la fase *a* del estator como se muestra en la fig. 1. En este trabajo se propone un modelo similar al anterior pero que permite considerar, mediante un factor de falla vectorial, cortocircuitos entre espiras en cualquiera de las fases.

Definiendo a $\mu_{qd} = [\mu_q \ \mu_d]^T$ como el vector de fallas, su módulo representa el porcentaje de espiras en cortocircuito y la dirección del mismo indica la fase dañada. Si μ_a , μ_b y μ_c son los porcentajes de espiras en cortocircuito para las fases *a*, *b* y *c* respectivamente, el vector μ_{qd} en cada caso viene dado por

$$\mu_{qd}|_a = [1 \ 0]^T \mu_a \quad (1)$$

$$\mu_{qd}|_b = \left[-1/2 \ \sqrt{3}/2\right]^T \mu_b \quad (2)$$

$$\mu_{qd}|_c = \left[-1/2 \ -\sqrt{3}/2\right]^T \mu_c \quad (3)$$

Entonces, el modelo del MI con falla en el estator puede obtenerse como una extensión del propuesto en (Tallam *et al.*, 2002). Para ello se obtiene el modelo del MI con falla en cada una de las fases, y luego se reemplaza el factor de falla de cada fase por su equivalente vectorial (1)-(3). Así, el modelo general en un referencial estacionario *qd*, puede representarse de la siguiente manera,

$$\begin{cases} \frac{d\lambda_{qds}}{dt} = \mathbf{v}_{qds} - R_s \mathbf{i}_{qds} + \frac{2}{3} \mu_{qd} R_s i_f \\ \frac{d\lambda_{qdr}}{dt} = -R_r \mathbf{i}_{qdr} + \mathbf{J} \omega_r \lambda_{qdr} \\ \frac{d\lambda_{cc}}{dt} = -R_s \mu_{qd}^T \mathbf{i}_{qds} + \|\mu_{qd}\| R_s i_f \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \mathbf{i}_{qds} = \frac{L_r}{\nabla} \lambda_{qds} - \frac{L_m}{\nabla} \lambda_{qdr} + \frac{2}{3} \mu_{qd} i_f \\ \mathbf{i}_{qdr} = \frac{L_s}{\nabla} \lambda_{qdr} - \frac{L_m}{\nabla} \lambda_{qds} \\ i_f = \frac{\lambda_{cc} - \mu_{qd}^T \lambda_{qds}}{\left(\frac{2}{3} \|\mu_{qd}\| - 1\right) \|\mu_{qd}\| L_{ts}} \end{cases} \quad (5)$$

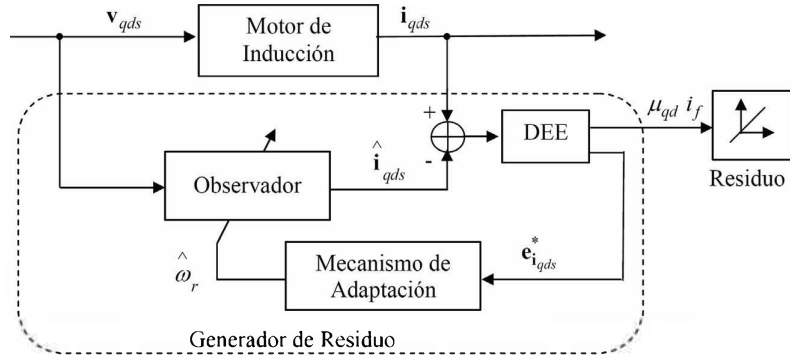


Figura 2. Estrategia de diagnóstico de fallas propuesta.

donde, λ_{qds} , λ_{qdr} y λ_{cc} representan los flujos del estator, rotor y de las espiras en cortocircuito respectivamente, en el marco del referencial qd . \mathbf{v}_{qds} , \mathbf{i}_{qds} , \mathbf{i}_{qdr} e i_f representan la tensión de estator, y las corrientes del estator, rotor y de la falla respectivamente, en el marco del referencial qd . R_s y R_r corresponden a la resistencia de estator y de rotor, respectivamente; L_s , L_r , y L_m representan la inductancia de estator, de rotor y de magnetización, respectivamente. ω_r es la velocidad del rotor, $\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$, $L_{ts} = L_s - L_m$, y $\nabla = L_s L_r - L_m^2$.

La dinámica mecánica viene dada por

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_E}{J} - \frac{T_L}{J} - \frac{B}{J} \omega_r \quad (6)$$

donde J es el momento de inercia del conjunto, B es el rozamiento, T_L es el par de carga y T_E el par electromagnético que puede expresarse como,

$$T_E = L_m P \left(\frac{3}{2} \mathbf{i}_{qds} \times \mathbf{i}_{qdr} + i_f \mu_{qd} \times \mathbf{i}_{qdr} \right) \cdot \mathbf{k} \quad (7)$$

siendo P el número de pares de polos y $\mathbf{k} = [0 \ 0 \ 1]^T$.

3. ESTRATEGIA DE DIAGNÓSTICO DE FALLAS

En la fig. 2 se muestra un esquema general de la estrategia de diagnóstico propuesta. El generador de residuos utiliza las mediciones de las tensiones y las corrientes de estator. Mediante un observador de estados se estiman las corrientes de estator. Luego se descompone el error de estimación (DEF) en dos términos, uno se utiliza para generar el residuo vectorial y el otro para ajustar, mediante un esquema adaptivo, la velocidad del rotor en el observador.

3.1 Observador de estados

La estrategia propuesta utiliza un observador de estados para estimar las corrientes de estator, y de esta manera generar el residuo. Definiendo

$$\mathbf{i}'_{qds} = \mathbf{i}_{qds} - \frac{2}{3} \mu_{qd} i_f \quad (8)$$

se propone un observador de la forma

$$\begin{cases} \frac{d\hat{\lambda}_{qds}}{dt} = \mathbf{v}_{qds} - R_s \hat{\mathbf{i}}_{qds} \\ \frac{d\hat{\lambda}_{qdr}}{dt} = -R_r \hat{\mathbf{i}}_{qdr} + \mathbf{J} \hat{\omega}_r \hat{\lambda}_{qdr} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{i}}'_{qds} = \frac{L_r}{\nabla} \hat{\lambda}_{qds} - \frac{L_m}{\nabla} \hat{\lambda}_{qdr} \\ \hat{\mathbf{i}}_{qdr} = \frac{L_s}{\nabla} \hat{\lambda}_{qdr} - \frac{L_m}{\nabla} \hat{\lambda}_{qds} \end{cases} \quad (10)$$

Entonces, en presencia de una falla en el estator el error de estimación viene dado por

$$\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{qds}} = \mathbf{i}_{qds} - \hat{\mathbf{i}}'_{qds} = \frac{2}{3} \mu_{qd} i_f + \mathbf{e}_{\mathbf{i}_{qds}}^* \quad (11)$$

donde el término $\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{qds}}^*$ representa el error de convergencia debido a errores en la condición inicial o errores en los parámetros del observador. Si este término es nulo, el error de estimación es un indicador directo de las fallas en el estator. Sin embargo, debido a que siempre existen incertidumbres en los parámetros u otras perturbaciones, usar solamente la señal de error como indicador de falla podría producir falsas alarmas. Por ello, es necesario descomponer el error de estimación, separando la componente debida solamente a la falla en el estator.

3.2 Descomposición del Error de Estimación

La componente del error de estimación producida por la falla ($2/3\mu_{qd}i_f$) es un vector de dirección fija, por lo tanto se puede descomponer en dos vectores de la misma amplitud girando en sentidos opuestos, es decir en secuencia directa e inversa respecto a la tensión de alimentación. En cambio, el error de estimación producido por variaciones en los parámetros ($\mathbf{e}_{\mathbf{i}_{qds}}^*$) es un vector girando en secuencia directa. Por tal motivo, es posible utilizar un referencial girando en secuencia inversa para aislar la componente de secuencia inversa producida por la falla. Cancelando el término de secuencia positiva producido por la falla, el error

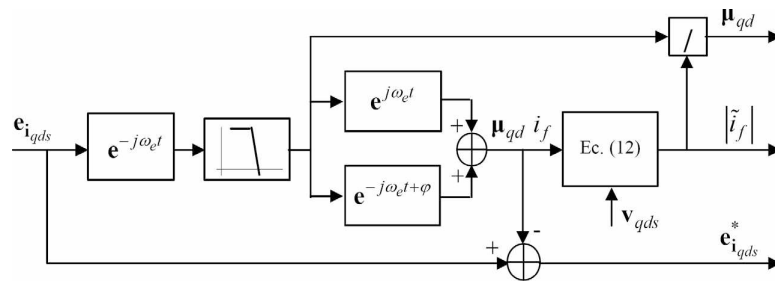


Figura 3. Descomposición del Error de Estimación.

resultante de secuencia positiva se puede utilizar para la adaptación de parámetros y estimación de la velocidad del motor.

En la fig. 3 se muestra un diagrama de bloques de la Descomposición del Error de Estimación. Para *aislar* la componente del error de estimación producido por la falla se *proyecta* la señal a un referencial girando a secuencia inversa, donde la componente de secuencia inversa se transforma en una señal continua y la de secuencia directa posee el doble de la frecuencia que tenía en el referencial estacionario. De esta manera la componente de secuencia negativa se puede separar fácilmente mediante un filtro pasa bajos. A partir de la componente de secuencia negativa es posible reconstruir la componente de secuencia positiva correspondiente a la falla, de igual magnitud a la negativa y fase φ . Dicha fase se obtiene de la fase de la componente de secuencia negativa, restándole la dirección de la fase fallada. A partir de estas componentes se reconstruye la señal completa, $\mu_{qd} i_f$, y se cancela del error de estimación la componente producida por la falla. La componente $e_{i_{qds}}^*$ se utiliza en el esquema adaptivo para adaptar la velocidad del rotor.

El vector $\mu_{qd} i_f$ contiene la información sobre la magnitud y dirección de la falla. La magnitud de dicho vector se puede emplear para la detección de la falla. Para realizar el diagnóstico y determinar la severidad de la falla, es posible calcular en forma aproximada el valor eficaz de i_f , y determinar el porcentaje de espiras involucradas, como se explica a continuación.

3.2.1. Determinación del porcentaje de espiras en cortocircuito Una vez separado el término del error de estimación producido por la falla ($\mu_{qd} i_f$), el porcentaje de espiras en cortocircuito se calcula dividiendo este término por el valor de la corriente de falla en régimen permanente. Dicho valor puede obtenerse a partir del modelo (4) - (5) expresado en régimen permanente,

$$\tilde{i}_f = \frac{\mu_{qd}^T \tilde{\mathbf{v}}_{qds}}{\|\mu_{qd}\| Z_s} + \frac{2}{3} \|\mu_{qd}\| \tilde{i}_f \quad (12)$$

donde $Z_s = R_s + j\omega_e L_{ls}$.

Es importante notar que la magnitud de i_f obtenida de esta manera es aproximada, ya que se considera que la resistencia de contacto de la falla es nula, y se asume que los parámetros del motor son conocidos. De cualquier forma, esta aproximación resulta suficiente en la mayoría de los casos para estimar la severidad de la falla.

3.3 Estimación de la velocidad del rotor

Para implementar el observador propuesto en la sección 3.1 es necesario conocer el valor de la velocidad del rotor. A fin de no incorporar un sensor de posición o velocidad, la velocidad del rotor es estimada mediante un esquema adaptivo como se propone en (Kubota *et al.*, 1993). Considerando que la velocidad varía lentamente, la estimación de la misma viene dada por (13), donde K_1 y K_2 son constantes,

$$\hat{\omega}_r = K_1 \left(e_{i_{qds}}^* \times \hat{\lambda}_{qdr} \right) \mathbf{k} + K_2 \int \left(e_{i_{qds}}^* \times \hat{\lambda}_{qdr} \right) \mathbf{k} dt. \quad (13)$$

4. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Para validar la propuesta se simuló la estrategia ante diferentes condiciones de falla y de operación del motor, cuyos datos se muestran en la Tabla 1. En todos los casos se simuló un cortocircuito franco entre espiras, es decir con resistencia de falla nula, y con la máquina trabajando directamente conectada a la red.

Tabla 1. Datos del motor

Potencia	5.5 KW	Pares de Polos	2
R_s	0,95 Ω	R_r	0,29 Ω
$L_{ls} = L_{lr}$	4,7 mH	L_m	122 mH
Estator		Conexión	serie
espiras/bobina	18	bobinas/grupo	2
grupos/fase	4	paso	1:10:12

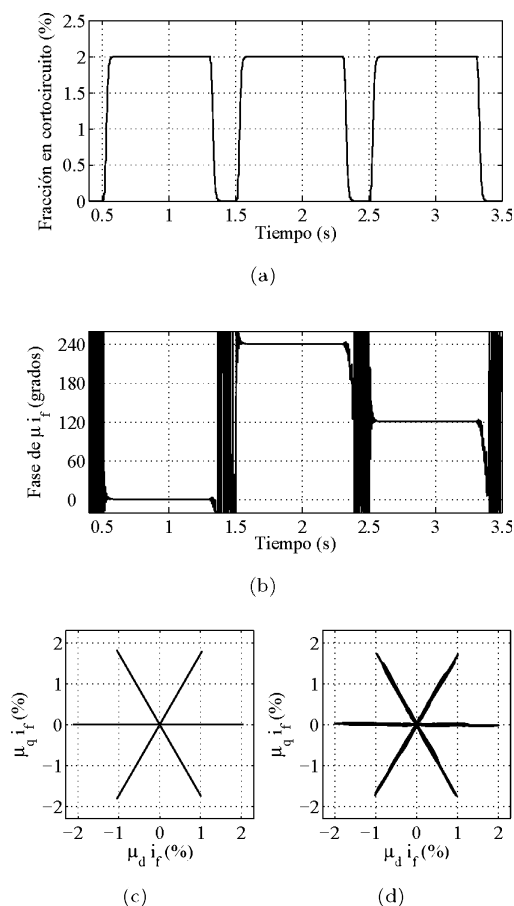


Figura 4. Falla en cada una de las fases. (a) Módulo $|\hat{\mu}i_f|$ normalizado, (b) ángulo de $\hat{\mu}i_f$, (c) $\hat{\mu}i_f$; (d) $\hat{\mu}i_f$.

4.1 Detección de fallas

Para mostrar el funcionamiento de la estrategia ante fallas en los bobinados de diferentes fases, en primer lugar se simularon fallas de la misma magnitud en cada una de las fases de la máquina. En la fig. 4 se muestran los resultados obtenidos al aplicar un cortocircuito del 2% del bobinado de la fase *a* entre 0,5 y 1,3 segundos, para la fase *b* entre 1,5 y 2,3 segundos, y para la fase *c* entre 2,5 y 3,3 segundos. En la fig. 4(a) se muestra el valor estimado de la magnitud de la falla (fracción del bobinado en cortocircuito), mientras que el ángulo del vector $\hat{\mu}i_f$, que permite conocer la fase dónde se encuentra la falla, se presenta en la fig. 4(b). En la fig. 4(d) se puede apreciar la correcta estimación de la fase en que se encuentra el cortocircuito. En dicha figura se muestran las componentes *qd* del vector $\hat{\mu}i_f$ estimado en el plano *q-d*, que puede compararse con el vector real presentado en la fig. 4(c).

La estimación de velocidad, empleada para adaptar dicho parámetro en el observador se aprecia en la fig. 5. En la fig. 5(a) se presenta la velocidad

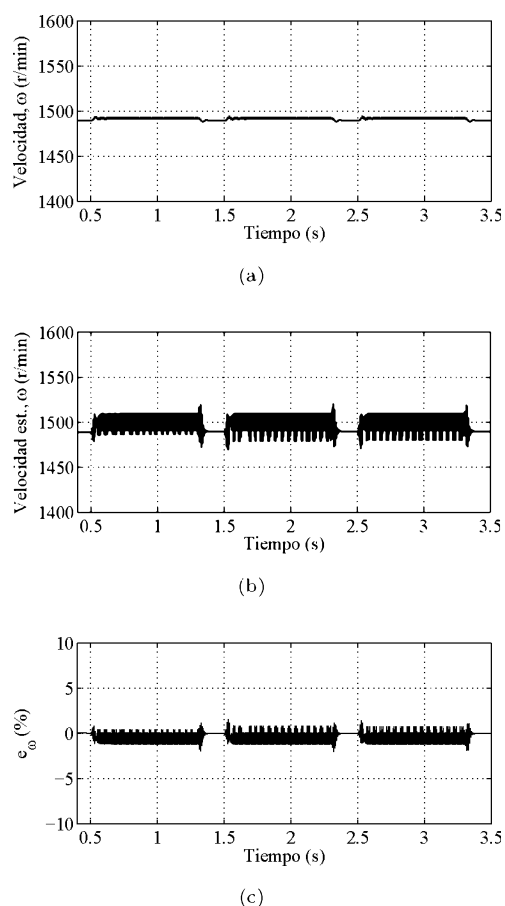


Figura 5. Estimación de velocidad en caso de falla. (a) Velocidad real, (b) velocidad estimada, (c) error de estimación.

real del rotor, en la fig. 5(b) la velocidad estimada, mientras que el error de estimación de velocidad se muestra en la fig. 5(c).

En la fig. 6 se presentan los resultados obtenidos para diferentes niveles de falla en la fase *a* de la máquina. El nivel de falla estimado a través del módulo de $|\hat{\mu}i_f|$ normalizado se muestra en la figura 6(a). La falla realizada corresponde a un cortocircuito de 2,5%, 5% y 10% del bobinado de la fase *a*. En la fig. 6(b) se muestra el efecto de esta falla sobre el error entre la corriente medida y la estimada. Por último, en la fig. 6(c) se puede apreciar el efecto de la descomposición del error de estimación. Aquí se muestra el error de estimación de corriente corregido ($e_{qd_s}^*$), obtenido luego de cancelar la componente del error producida por la falla.

4.2 Variaciones de carga

Como se mencionó anteriormente, la descomposición del error de estimación permite obtener la indicación de la severidad de la falla independientemente de los errores de estimación de paráme-

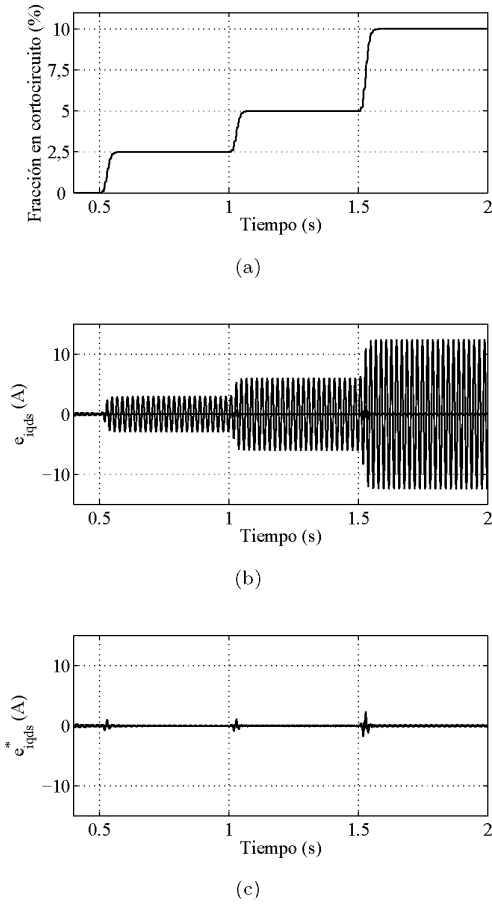


Figura 6. Falla en la fase *a*. (a) Nivel de falla, (b) error de corriente, (c) error de corriente corregido.

tros y otras perturbaciones. Para demostrar esta característica, en la fig. 7(a) se muestra la estimación de la magnitud de falla para un cortocircuito del 2,5% del bobinado de la fase *a* en $t = 0,5s$, cuando se aplica par de carga constante de valor nominal al eje de la máquina, en $t = 1s$. En la fig. 7(b) se muestra el efecto de este par de carga sobre la velocidad de la máquina.

4.3 Desbalance y armónicos de tensión

El método propuesto es también robusto ante desbalances y distorsiones en la tensión de alimentación de la máquina. En la fig. 8(a) puede apreciarse la estimación del nivel de falla para tensión de alimentación desbalanceada (10% de desbalance) y para tensión distorsionada (fig. 8(b)), con un contenido armónico de 5% de 5to armónico y 2% de 7mo armónico. En ambos casos la falla consiste en un cortocircuito del 2,5% del bobinado de la fase *a*.

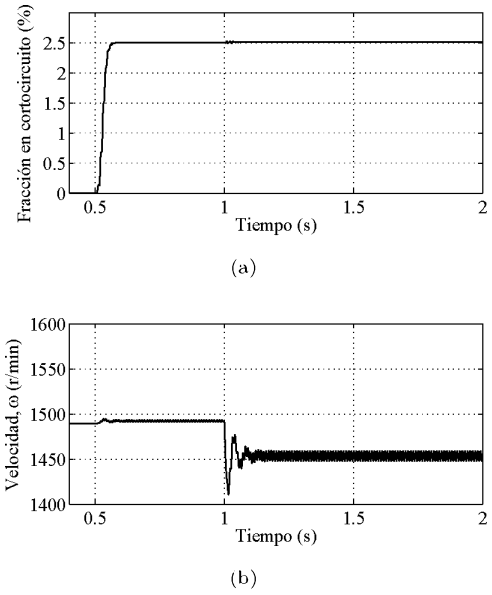


Figura 7. Falla en la fase *a*, carga nominal. (a) Nivel de falla, (b) velocidad real.

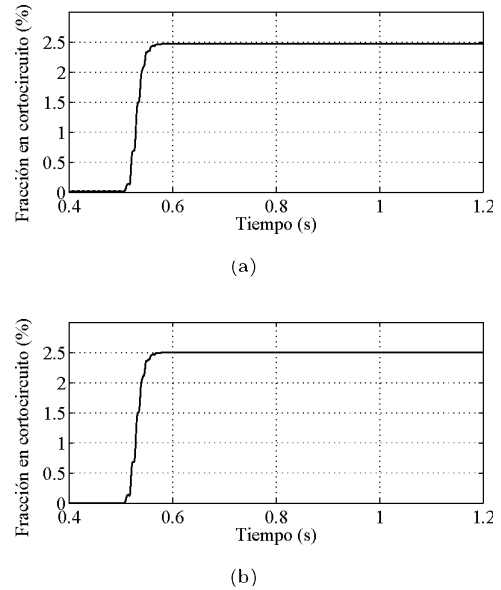


Figura 8. Falla en la fase *a*. (a) , desbalance de tensión del 10%, (b) 5% de 5to armónico y 2% de 7mo armónico.

5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para validar el desempeño de la estrategia de diagnóstico, se utilizó un motor con los bobinados del estator modificados de tal manera que es posible cortocircuitar diferente número de espiras, correspondientes a una bobina de la fase *a*. Para no dañar a las espiras en cortocircuito se realizaron los ensayos a tensión reducida (125 V) y por intervalos breves de tiempo.

En las figs. 9 y 10 se muestran los resultados obtenidos para un cortocircuito del 7% y 18% de las espiras de la fase a , respectivamente, con el motor en vacío. En las figuras 9(a) y 10(a) se muestra el porcentaje de falla estimado mediante la estrategia propuesta, mientras que el ángulo del vector $\hat{\mu}_f$ se muestra en las figuras 9(b) y 10(b). Las figuras 9(c) y 10(c) muestran el error entre la corriente del motor y la estimada mediante el observador. Por último en las figuras 9(d) y 10(d) se muestra el error de corriente cancelando la componente producida por la falla; este error es el que se utiliza para la estimación de velocidad.

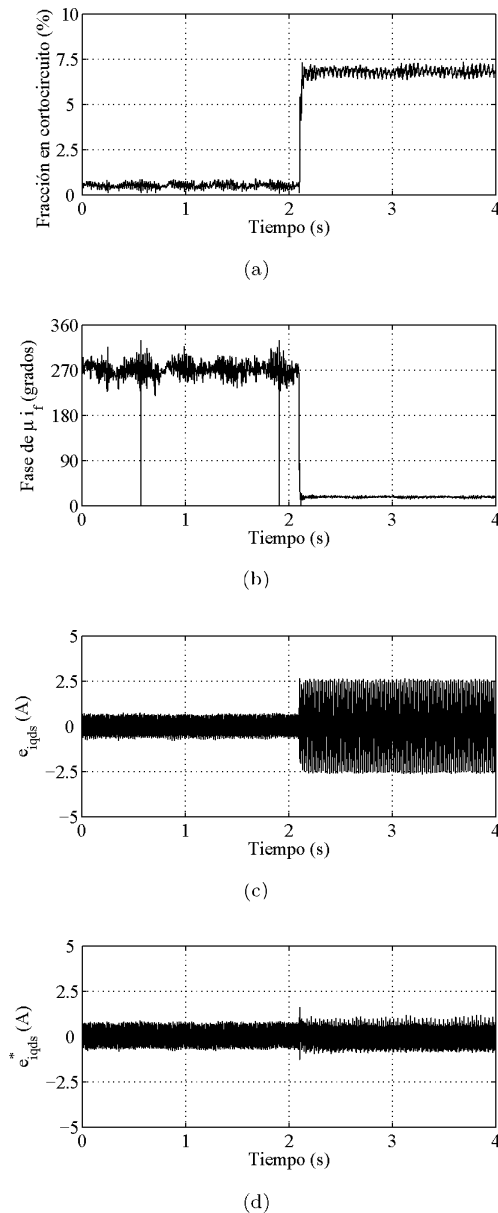


Figura 9. Falla de 7% en fase a , motor en vacío. (a) Nivel de falla, (b) ángulo de $\hat{\mu}_f$, (c) error de corriente, (d) error de corriente corregido.

En la fig. 11 se muestran los resultados obtenidos para fallas del 3,5%, 7% y 18% respectivamente con el motor en carga. Como se aprecia, la falla se detecta aún con el motor con carga. Debe notarse que en estos casos, el porcentaje de espiras en cortocircuito no se determina correctamente. Esto se debe a la influencia del desbalance intrínseco de los bobinados del motor, cuyo efecto se hace más notorio cuando el mismo trabaja con corriente nominal. Además, en estas condiciones de ensayo se produce una caída de tensión apreciable en los bobinados del autotransformador empleado para alimentar al motor, lo que aumenta el nivel de desbalance de tensión. Por último, el valor de la

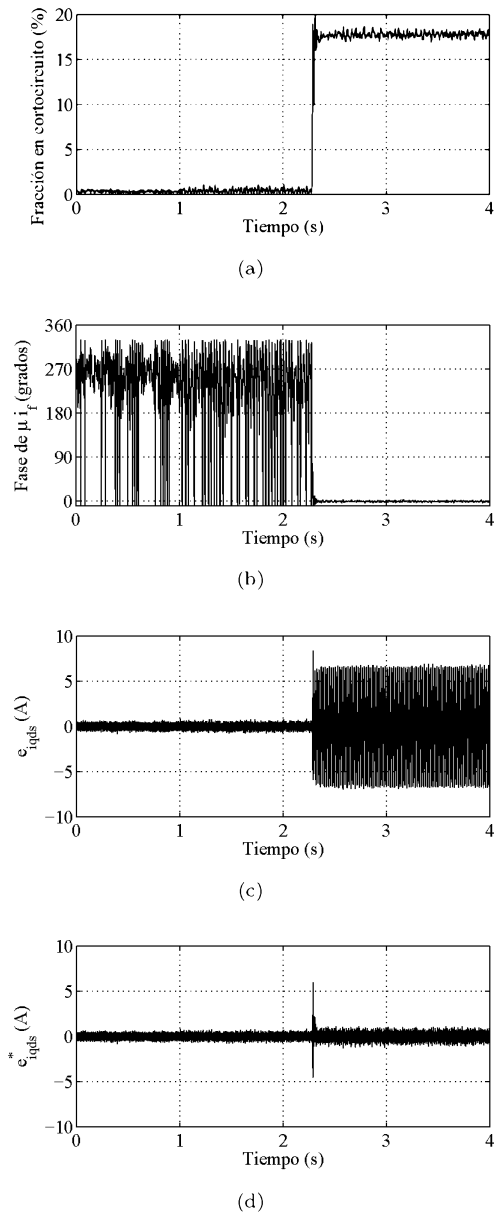


Figura 10. Falla de 18%, motor en vacío. (a) Nivel de falla, (b) ángulo de $\hat{\mu}_f$, (c) error de corriente, (d) error de corriente corregido.

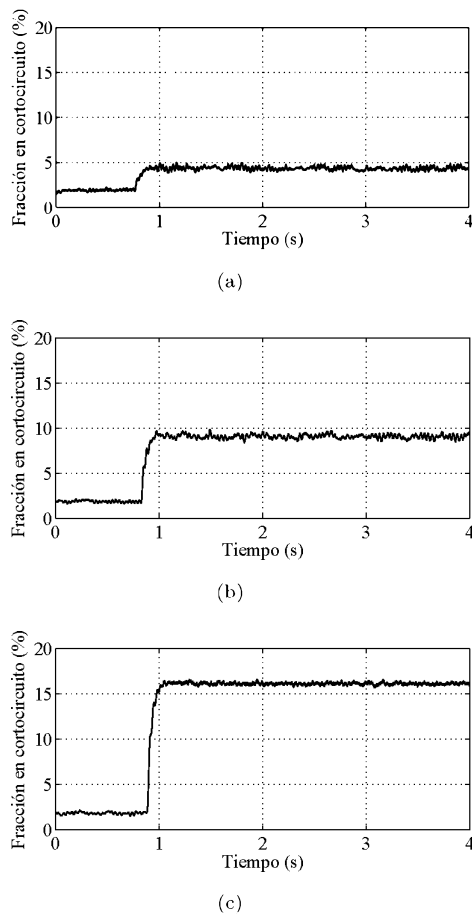


Figura 11. Falla en la fase *a*, con carga. (a) Falla de 3,5% , (b) Falla de 7% , (c) Falla de 18%.

resistencia de falla para los casos de menor porcentaje de espiras es comparable a la impedancia de la porción de bobinado cortocircuitado, y no nula como se considera en el modelo, lo que introduce un error adicional.

6. CONCLUSIONES

Se propuso una estrategia basada en modelos para el diagnóstico de fallas en el estator de motores de inducción. Mediante un observador de estados se genera un vector de residuos específicos que permite determinar la fase dañada y cuantificar el número de espiras en cortocircuito.

A diferencia de propuestas anteriores (Kallesoe *et al.*, 2004), la presente propuesta presenta una menor complejidad de implementación, ya que se emplea un único observador para detectar fallas en cualquiera de las fases de la máquina. Además, los resultados obtenidos indican que es posible utilizar dicha estrategia frente a variaciones de carga y velocidad y la misma es muy poco sensible a las perturbaciones externas tales como desbalances y armónicos de tensión.

Para el diseño de la estrategia se consideró que la resistencia de la falla es nula, como una buena aproximación a la mayoría de los casos de falla. Sin embargo, cuando la resistencia real de la falla presenta un valor importante, comparable a la impedancia de la fracción cortocircuitada, la determinación de la corriente de falla y del número de espiras en cortocircuito presentará diferencias con el valor real.

Es importante destacar que la técnica de detección propuesta es muy poco sensible a variaciones o errores de parámetros en el modelo del observador. Esto es así dado que la detección se basa en la componente de secuencia negativa del error de corriente, mientras que los errores de parámetros se manifiestan siempre en forma simétrica, por lo que aparecerán solamente en la componente secuencia positiva. Solamente en casos de desbalance de tensión importante, los errores de parámetros podrían manifestarse como una falla leve.

REFERENCIAS

- Cruz, S.M.A. and A.J.M. Cardoso (2001). Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended park's vector approach. *IEEE Trans. Ind. Applicat.* **33**(5), 1227–1233.
- Cruz, S.M.A. and A.J.M. Cardoso (2005). Multiple reference frames theory: A new method for the diagnosis of stator faults in three-phase induction motors. *IEEE Trans. Energy Conversion* **20**(3), 611 – 619.
- Kallesoe, C.S., P. Vadstrup, H. Rasmussen and R. Izadi-Zamanabadi (2004). Estimation of stator winding faults in induction motors using an adaptive observer scheme. In: *39th IAS Annual Meeting*. Vol. 2. pp. 1225–1232.
- Kubota, H., K. Matsuse and T. Nakano (1993). DSP based speed adaptive flux observer of induction motor. *IEEE Trans. Ind. Applicat.* **29**(2), 344–348.
- Lee, Sang Bin, R.M. Tallam and T.G. Habetler (2003). A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix. *IEEE Trans. Power Electron.* **18**(3), 865–872.
- Nandi, S., H.A. Toliyat and X. Li (2005). Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors: A review. *IEEE Trans. Energy Conversion* **20**(4), 719–729.
- Siddique, Arfat, G. S. Yadava and Bhim Singh (2005). A review of stator fault monitoring techniques of induction motors. *IEEE Trans. Energy Conversion* **20**(1), 106–114.
- Tallam, R., S. B. Lee, G. Stone, G. B. Kliman, J. Yoo, T. G. Habetler and G. Har-

- ley (2003). A survey of methods for detection of stator related faults in induction machines. In: *The 2003 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (IEEE SDEMPED 2003)*. Atlanta, GA, USA. pp. 35–46.
- Tallam, Rangarajan M., Thomas G. Habetler and Ronald G. Harley (2002). Transient model for induction machines with stator winding turn faults. *IEEE Trans. Ind. Applicat.* **38**(3), 632–637.
- Verucchi, C., G. Acosta and E. Gelso (2004). Detección en línea de fallas de aislamiento en devanados de máquinas de inducción. In: *XIX Congreso Argentino de Control Automático*. p. 15.