

Detección de fallas en un sistema convertidor-motor de inducción basado en el comportamiento de los dispositivos semiconductores de potencia

Fault detection in an induction motor drive based on the behavior of the power electronics devices

*Jesús Aguayo Alquicira**, *Abraham Claudio Sánchez*, *Luis Gerardo Vela Valdés*

Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico (cenidet).
Departamento de electrónica. Interior Internado Palmira s/n col. Palmira.
C. P. 62490. Cuernavaca, Morelos, México.

(Recibido el 18 de abril de 2008. Aceptado el 6 de noviembre de 2008)

Resumen

En este trabajo se presenta la aplicación de una técnica de detección de fallas aplicado al sistema convertidor-motor de inducción monofásico. Para llevar a cabo la detección de fallas, se emplean las señales (voltaje y corriente) obtenidas directamente del comportamiento del convertidor (residuos). Las fallas de interés a analizar, son las que pueden ocurrir cuando se presentan variaciones en las señales de control de los interruptores que componen al convertidor, a las que se les denominan fallas de pérdida de secuencia de conmutación.

----- *Palabras clave:* Diagnóstico de fallas, detección de fallas, convertidor, motor de inducción.

Abstract

In this work the fault diagnosis technique is applied to the one phase induction motor drive system. To carry out the fault detection, the voltage and current signals obtained directly from the converter behavior (residues) are used. The faults of interest to analyze can happen when control signals of the switches that compose the converter do vary. These faults are designated as lost of commutation sequence.

----- *Keywords:* Fault detection, fault diagnosis, drive, induction motor.

* Autor de correspondencia: teléfono: + 52 + 777 + 362 77 70 ext. 427, correo electrónico: jaguayo@cenidet.edu.mx (J. Aguayo).

Introducción

Las investigaciones en la aplicación de las técnicas de diagnóstico y detección de fallas en máquinas eléctricas así como en los convertidores de potencia, han ido en aumento en los últimos años, esto se demuestra con base en los artículos publicados en los diferentes congresos, entre los que destacan: La conferencia del SAFEPROCESSES [1], el congreso del SDEMPED [2], la conferencia ECC99 [3], entre otras, además el número especial de la revista de la IEEE Transaction on Industrial Electronics [4]. Las características como seguridad, confiabilidad y desempeño, son algunos de los aspectos más importantes para un mejor aprovechamiento de los sistemas convertidor-motor de inducción. Los sistemas convertidor-motor de inducción se emplean ampliamente en la industria donde son la fuerza de trabajo y los aspectos como: seguridad, confiabilidad, eficiencia y buen funcionamiento son algunas de las mayores preocupaciones. Debido al incremento en la automatización que experimentan las instalaciones industriales, esto trae consigo un incremento en las fallas en dichos sistemas. En este sentido las técnicas de diagnóstico de fallas (detección y localización) juegan un papel muy importante para dar continuidad en la operación del sistema. La función principal de dichas técnicas es la de asegurar una detección temprana y confiable que permita localizar las fallas con el fin de evaluar los efectos en el sistema y tomar las acciones pertinentes para asegurar la continuidad del proceso. En consideración de los costos que surgen cuando el sistema sufre un paro no planeado, las técnicas de detección de fallas se han vuelto una solución cada vez más económica [5, 6]. El objetivo principal de las técnicas de diagnóstico de fallas es el de reconocer los comportamientos anormales en los elementos del sistema, así como las posibles causas que los originan, de forma oportuna. Lo anterior puede realizarse mediante dos métodos claramente establecidos [6, 7], por un lado basado en la medición de señales (método de redundancia material) [8, 9] y por el otro lado mediante modelos matemáticos del sistema (método de la redundancia analítica) [5, 10, 11]. En este trabajo se presenta el enfoque de medición de señales en forma

experimental, el método mediante modelos no se aborda en este trabajo. Los trabajos reportados en la literatura aplicando las técnicas de diagnóstico de fallas en el sistemas convertidor-motor de inducción se clasifican de acuerdo al tipo de fallas, en dos grupos: los trabajos enfocados a las fallas que pueden ocurrir únicamente en el motor [8, 12], los estudios que abordan las fallas únicamente en los convertidores [13, 14] y finalmente las publicaciones que examinan las fallas del sistema convertidor-motor de inducción de manera conjunta [5, 15, 16]. En este trabajo es de interés el estudio de las fallas que puedan ocurrir únicamente en el convertidor y específicamente las fallas debido a un mal diseño del circuito de control de los interruptores, cuya función es proporcionar una secuencia de conmutación de forma precisa. Cuando esta secuencia se pierde, los interruptores exhiben un comportamiento diferente del nominal.

Experimentación

La plataforma de pruebas está compuesta de un convertidor (inversor puente completo monofásico), operando mediante un control de modulación de ancho del pulso de tipo sinusoidal (SPWM por sus siglas en inglés de Sinusoidal Pulse Width Modulation), teniendo como carga un motor monofásico de inducción (rotor jaula de ardilla). Adicionalmente, se tiene implementado el sistema de generación de fallas en el convertidor y en el motor, el sistema completo se muestra en la figura 1. Las características de los componentes principales de la plataforma de pruebas se presentan a continuación.

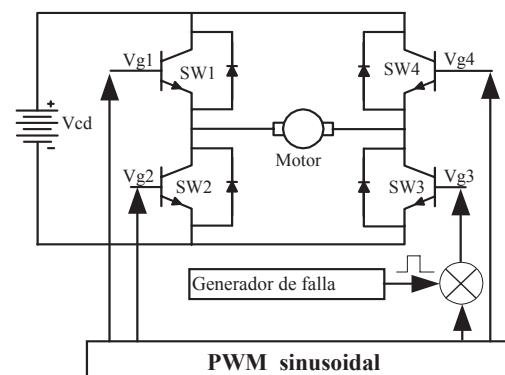


Figura 1 Diagrama general del sistema

a) El convertidor de potencia

El convertidor empleado es un inversor puente completo monofásico, teniendo como carga un motor de inducción, los componentes principales son 4

dispositivos semiconductores de potencia (IGBT). La transferencia de energía a través de la carga dependerá de cuales son los dispositivos activados. La tabla 1 presenta en forma resumida los diferentes casos que pueden ocurrir en el convertidor.

Tabla 1 Estados posibles en un convertidor para operación nominal y casos de fallas en los interruptores

<i>Interruptores</i>				<i>Evento</i>
<i>SW1</i>	<i>SW2</i>	<i>SW3</i>	<i>SW4</i>	
On	Off	On	Off	Vmotor > 0 (Operación nominal)
Off	On	Off	On	Vmotor < 0 (Operación nominal)
On	Off	On	On	Corto circuito dispositivos SW3 y SW4
On	On	Off	Off	Corto circuito dispositivos SW1 y SW2
On	Off	Off	Off	Circuito abierto dispositivos SW3 y SW4
Off	Off	Off	On	Circuito abierto dispositivos SW1 y SW2

Los dispositivos semiconductores empleados son del tipo CM75DY-12H (1200V, 75A). En la tabla 2 se muestran las condiciones de funcionamiento del convertidor para las diferentes pruebas. La ecuación (1) rige el comportamiento de cada uno de los dispositivos semiconductores sobre la base del voltaje aplicado a la terminal de compuerta.

$$V_{GE} = \alpha V_{CE} + \beta \quad (1)$$

Donde:

V_{GE} es el voltaje de control del interruptor

V_{CE} es el voltaje del motor

α es una constante que depende del voltaje de alimentación

β es una constante que representa el voltaje de conducción de los interruptores

Tabla 2 Características de banco de pruebas

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Vcd	100V
Frecuencia del PWM	900Hz
V_{GE} (encendido)	+15V
V_{GE} (apagado)	-15V

b) El motor empleado

La máquina de inducción empleada es un motor asíncrono monofásico con rotor tipo jaula de ardilla, el modelo es el MR-16MC.X con condensador de arranque. El motor se encuentra acoplado directamente a un motor de corriente continua, lo que permite emular una posible variación de carga. Las características del motor asíncrono se presentan en la tabla 3.

Tabla 3 Características del motor

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
Tensión nominal	120 V
Corriente nominal	3,6 A
Velocidad	1300 rpm.
Frecuencia de operación	60 Hz
Capacitor de arranque	25 μ H

c) El comando del convertidor

Los cuatro interruptores (SW1, SW2, SW3, SW4) que componen al convertidor de potencia se encuentran comandados mediante un patrón de con-

mutación muy utilizado en el control de motores debido principalmente a la reducción intrínseca de armónicos, en la literatura puede localizarse con el nombre de la modulación de ancho del pulso sinusoidal [17].

El patrón de conmutación utilizado se obtiene mediante la comparación de una señal moduladora del tipo sinusoidal y una señal portadora triangular, mostrada en la figura 2. En la figura 3 se presenta la señal de tensión aplicada a cada uno de los interruptores y en la figura 4 se muestra la tensión de salida del convertidor, la cual se aplica a las terminales del motor de inducción. Este tipo de patrón es llamado SPWM bipolar, la cual tiene la ventaja de ser fácil de implementar de forma física con respecto al SPWM unipolar la cual para su implementación requiere de dos señales moduladoras y la misma señal portadora. Sin embargo, bajo las mismas condiciones la SPWM bipolar presenta la desventaja de contener un mayor contenido armónico.

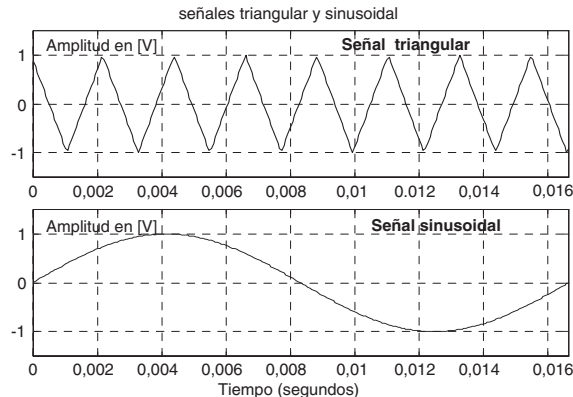


Figura 2 Señales portadora y moduladora para obtener el PWM del tipo sinusoidal

El interés de este trabajo está enfocado a mostrar la importancia del empleo de la técnica propuesta de detección de fallas a partir de las señales de los dispositivos semiconductores; lo cual se puede generalizar a otras técnicas de modulación, y no a mejorar el desempeño del convertidor (a nivel del contenido armónico).

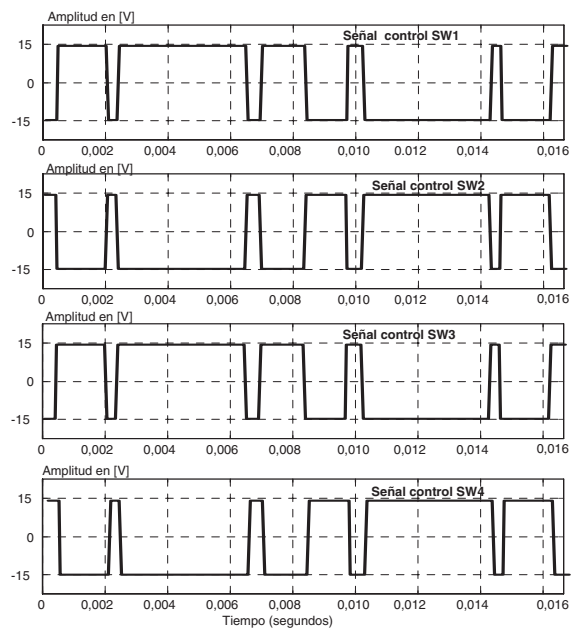


Figura 3 Señales de control de los interruptores del convertidor

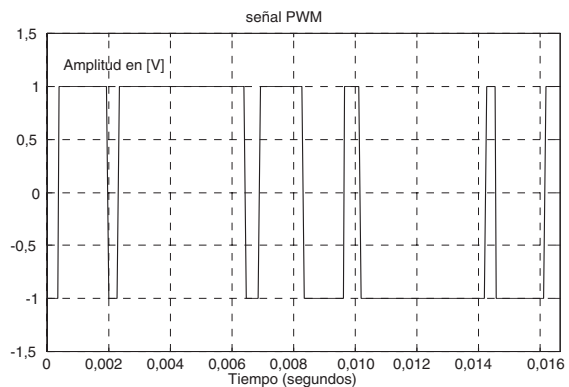


Figura 4 Tensión de salida del convertidor

d) El circuito generador de fallas

Las fallas son de naturaleza completamente aleatoria y pueden ser clasificadas dependiendo de su naturaleza en fallas únicas o combinadas y pueden ser clasificadas de acuerdo a su duración en permanentes, intermitentes o instantáneas (en forma impulsional) [7, 18]. Además, cuando ocurre una falla, el comportamiento normal del sistema se ve seriamente afectado.

En este trabajo es de interés el estudio del comportamiento del sistema bajo la influencia de fallas únicas (sólo una falla a la vez), debido a que se requiere garantizar que los patrones de comportamiento, signatures, para las diferentes fallas aplicadas al sistema bajo estudio, sean diferenciados para asegurar la localización de las fallas. Adicionalmente, se debe garantizar que la duración de las fallas sea controlada (modo impulsional) con el fin de asegurar las condiciones de operación del sistema (sin causar degradación). Con el fin de evaluar el comportamiento del sistema convertidor-motor de inducción, bajo la influencia de fallas únicas e impulsionales se hace necesario construir un circuito que permita inyectar al sistema solamente una falla a la vez.

El circuito generador de fallas, tiene como características principales: a) seleccionar el interruptor bajo prueba y b) proporcionar el pulso de falla, lo cual se muestra en la figura 5. Como se observa, el pulso de falla se añade a la salida del PWM sinusoidal, con lo cual el controlador del convertidor presenta un disparo en falso.

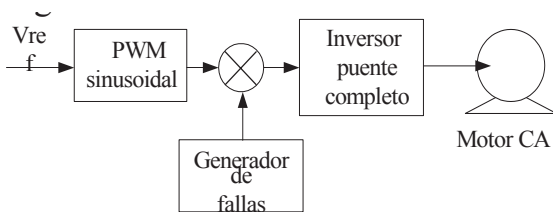


Figura 5 Tensión de salida del convertidor

Definición de pérdida de secuencia

En éste trabajo se abordan dos tipos de fallas en el convertidor, la pérdida de secuencia de conmutación de los interruptores que componen al convertidor al encendido y al apagado, las cuales se ven reflejadas eléctricamente como un circuito abierto o como un corto circuito respectivamente. Cabe mencionar que el banco de pruebas construido permite, con una ligera modificación, llevar a cabo el estudio de fallas eléctricas en el motor (corto circuito y de circuito abierto en los devanados del estator).

a) Pérdida de secuencia (componente abierto)

Éste tipo de falla se presenta cuando un dispositivo permanece apagado (aún cuando la señal de compuerta está presente), por lo tanto, no se presenta transferencia de energía a través de la máquina. Diversas situaciones pueden producir éste tipo de fallas: a) por un problema a nivel del circuito de comando (no se tiene voltaje de la señal de compuerta o es insuficiente para activarlo); o b) por una falla a nivel del componente (el dispositivo se ha degradado o envejecido de tal manera que no logra accionarse). La duración máxima de la falla es de 16,67 mili segundos, debido a que la secuencia de conmutación se repite en este intervalo. La figura 6 muestra el circuito equivalente cuando el interruptor SW3 presenta la falla en circuito abierto.

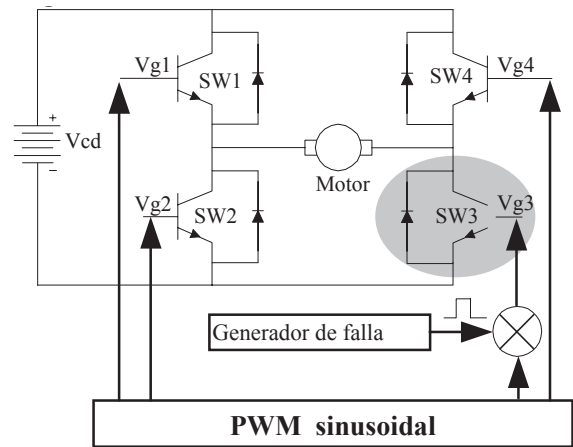


Figura 6 Diagrama con falla de interruptor SW3 en circuito abierto

Como se mencionó anteriormente, la ecuación (1) rige el comportamiento de los dispositivos semiconductores y cuando ocurre la falla del dispositivo en circuito abierto, cambia de manera que la tensión en el control permanece en estado de apagado y para el caso de detección ($V_{GE} = 0$), sustituyendo éste valor en la ecuación (1) se obtienen el valor de V_{CE} normalizado como se muestra en la ecuación (2).

$$V_{CE} = \frac{-\beta}{\alpha} \quad (2)$$

Como β y α son constantes, el voltaje del motor es constante ($V_{CE} = \text{constante}$), debido a que el motor es un motor de ca, y requiere alimentarlo de forma alternada, el motor no opera de manera satisfactoria.

b) Pérdida de secuencia (componente cerrado)

Éste tipo de falla se presenta cuando un dispositivo permanece cerrado (cuando debería de estar abierto), originando un corto circuito entre dos dispositivos y la fuente de voltaje de entrada, de modo que no presenta transferencia de energía a través de la máquina. Diversas situaciones pueden originar éste tipo de fallas: a) por un problema del circuito de comando (la señal de comando de la compuerta del componente permanece en el estado de encendido); o b) por la falla física del componente.

La duración de la falla es de menos de 30 microsegundos, esto debido a que la exposición del dispositivo bajo condiciones de corto circuito, puede ocasionar su degradación o incluso, su destrucción; y en este trabajo enfocamos los esfuerzos a fallas del tipo no destructivas. Como ejemplo, en la figura 7 se muestra el circuito equivalente cuando el interruptor SW3 presenta la falla en corto circuito.

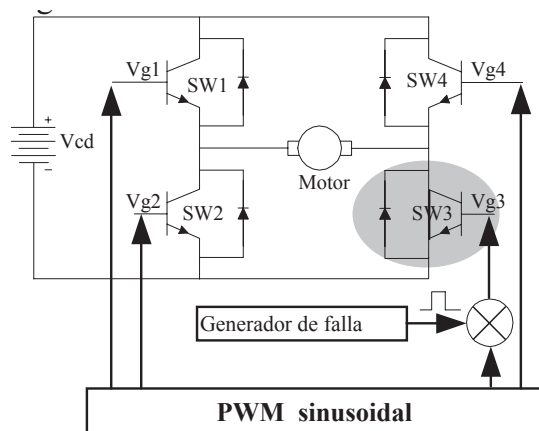


Figura 7 Diagrama general del sistema con falla de corto circuito del interruptor SW3

Como se mencionó anteriormente, la ecuación (1) rige el comportamiento de los dispositivos

semiconductores y cuando ocurre la falla del dispositivo en corto circuito, cambia de manera que la tensión en el control permanece en estado de encendido independientemente del valor que tenga el voltaje de compuerta y para el caso de detección ($V_{GE} = 1$), sustituyendo éste valor en la ecuación (1) se obtienen el valor de V_{CE} normalizado como se muestra en la ecuación (3).

$$V_{CE} = \frac{1 - \beta}{\alpha} \quad (3)$$

En este caso de manera análoga que el caso de la falla anterior, el motor no opera de manera satisfactoria, debido a que en estas condiciones de falla el motor sufre perturbaciones importantes.

Diagnóstico de fallas

Las técnicas de diagnóstico permiten detectar, localizar y aislar las fallas con el fin de evaluar sus efectos en el sistema y lograr una mayor confiabilidad, disponibilidad y seguridad en la operación. La evaluación de la falla permite decidir si es necesario un cambio del punto de operación, la reconfiguración de una parte del sistema o el mantenimiento. El diagnóstico oportuno garantiza tener suficiente tiempo para realizar las acciones necesarias, tales como reconfigurar la acción de trabajo o el mantenimiento. El primer paso de la técnica de diagnóstico de falla, es la “detección” de funcionamientos anómalos en el proceso mediante mediciones hechas al sistema y por consiguiente la generación de señales de error llamadas “residuos”. Los residuos son cantidades que representan la inconsistencia entre las variables de entrada y salida de la planta real.

Estrategia empleada

El algoritmo para la detección del comportamiento de la falla está basado en el comportamiento general del voltaje de salida del convertidor (de entrada al motor) y de la señal de compuerta del convertidor. En la ecuación (1) se presenta la relación entre la señal de compuerta y la tensión entregada al motor, debido a que las magnitudes de cada señal son diferentes, se lleva a cabo una

normalización de éstas tensiones en el intervalo de -1 a $+1$, obteniendo V_{GE}' y V_{CE}' . Cuando el sistema trabaja en forma nominal, se tiene que los voltajes normalizados de compuerta y del motor son muy iguales; cuando ocurre alguna falla de pérdida de secuencia, el factor que se ve más afectado es la señal de compuerta y por lo tanto se especifica en la ecuación (4), el residuo del diagnóstico.

$$r = V_{GE}' - V_{CE}' \quad (4)$$

La señal de alarma se presenta en la ecuación (5).

$$A = \begin{cases} 0 & \text{si } r < 1 \\ 1 & \text{si } r \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

Resultados

En la operación nominal de la plataforma de pruebas, se tiene un motor de inducción, operando en régimen permanente, y el convertidor con un voltaje de alimentación de 100 Volts. En la figura 8 se muestran las gráficas de la corriente del motor, el voltaje del motor y el voltaje de control sin falla.

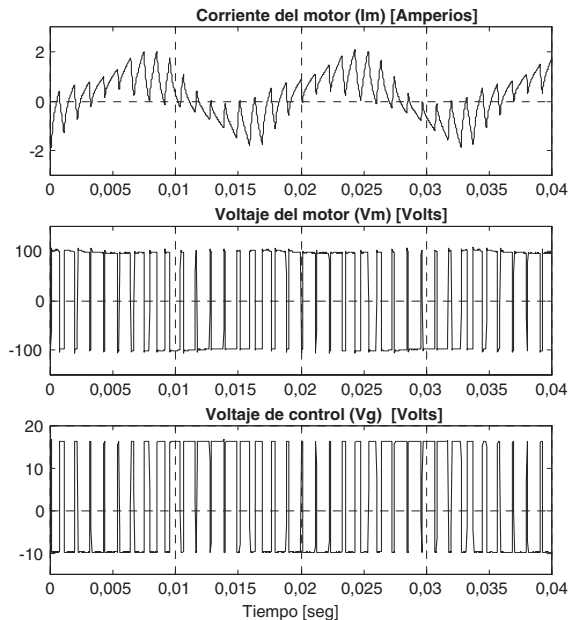


Figura 8 Señales obtenidas sin falla

En la figura 9, se muestra el comportamiento de la corriente del motor, el voltaje del motor y el voltaje del control bajo la influencia de falla de pérdida de secuencia al encendido, la falla inicia a los 30 ms del tiempo de adquisición y tiene una duración de 10 ms (aproximadamente). Como se puede observar, éste tipo de falla provoca un cambio importante en el voltaje del motor y ligeros cambios en la corriente consumida.

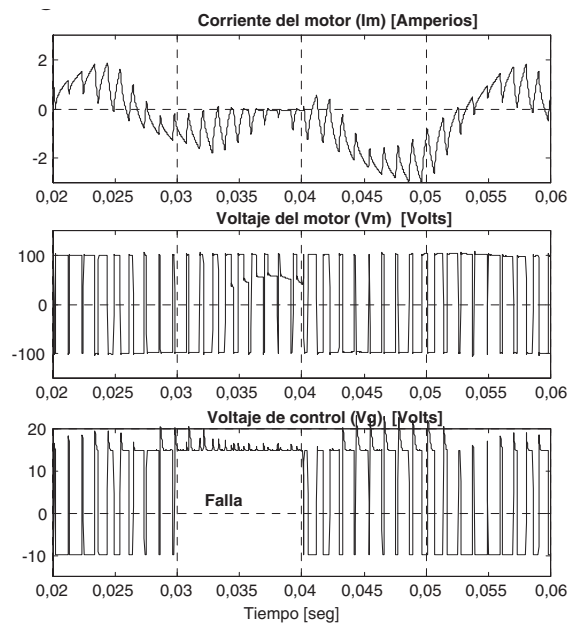


Figura 9 Señales obtenidas con falla de pérdida de secuencia al encendido

Debido a que la señal de la compuerta presenta fluctuaciones aleatorias (ruido), es necesario llevar a cabo un tratamiento (emplear la acción de un filtro) de la señal de compuerta V_{GE} . Éste filtro consiste en retener las partes de las señales de V_{GE} que no cambian en forma abrupta, para obtener de esta manera un valor más limpio del valor normalizado. La figura 10 muestra el voltaje del motor y el voltaje de control de manera normalizada, observe que ambos voltajes se encuentran en el rango de -1 a 1 , con lo cual la comparación es posible para la obtención del valor del residuo.

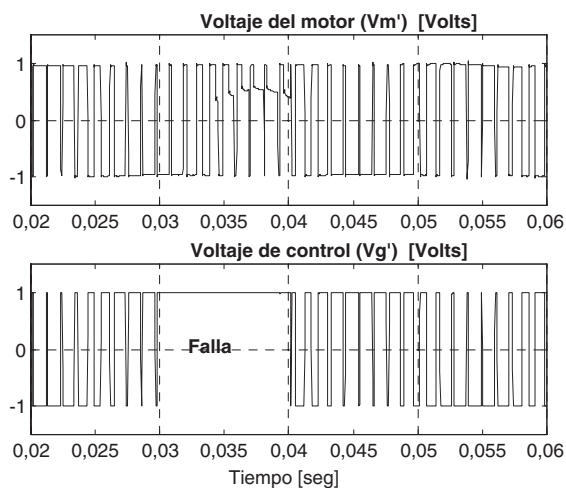


Figura 10 Señales normalizadas y filtradas

En la figura 11 se presenta la forma de onda del residuo, obtenida mediante la ecuación (4), y de la alarma, obtenida mediante la ecuación (5), observe que ambos son indicadores de que una falla está presente.

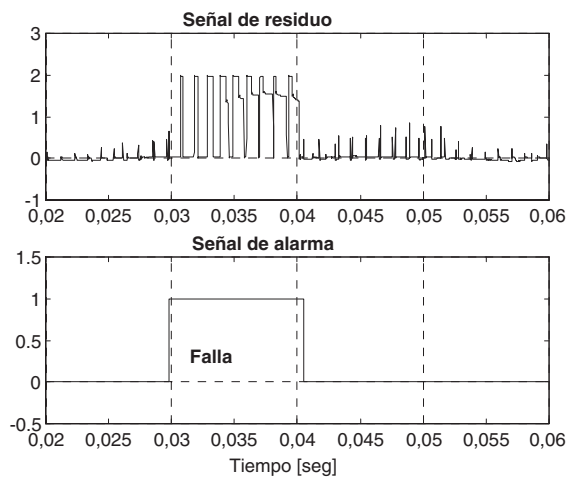


Figura 11 Señales de residuo y alarma

En la figura 12, se muestra el comportamiento de la corriente del motor, el voltaje del motor y del voltaje de compuerta bajo la influencia de la falla de corto circuito entre dos dispositivos. Este tipo de falla produce cambios en la forma del voltaje aplicado en las terminales del motor.

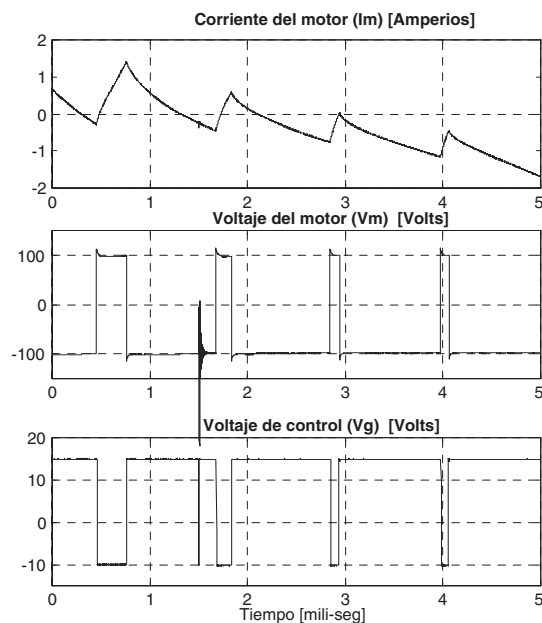


Figura 12 Señales con falla en corto circuito

De la misma manera que el caso anterior, para aplicar el método propuesto, se hace necesario normalizar los voltajes de compuerta y del motor y en la figura 13 se muestran los voltajes normalizados.

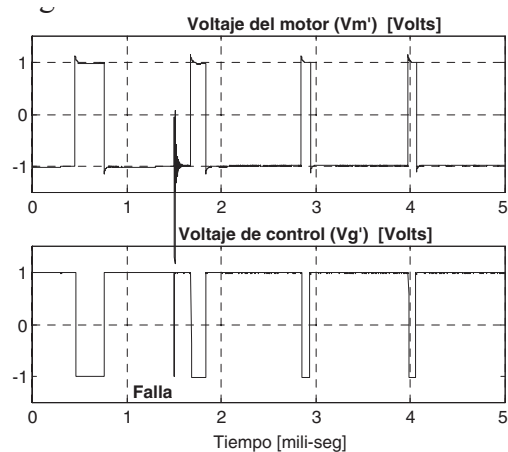


Figura 13 Señales normalizadas y filtradas

En la figura 14 se presenta la forma de onda del residuo y de la alarma, observe que la señal de residuo presenta diversos valores mayores al va-

lor de umbral, pero éstos son originados por la operación nominal del convertidor (los tiempos muertos) los cuales son filtrados tomando en consideración la secuencia de encendido del PWM.

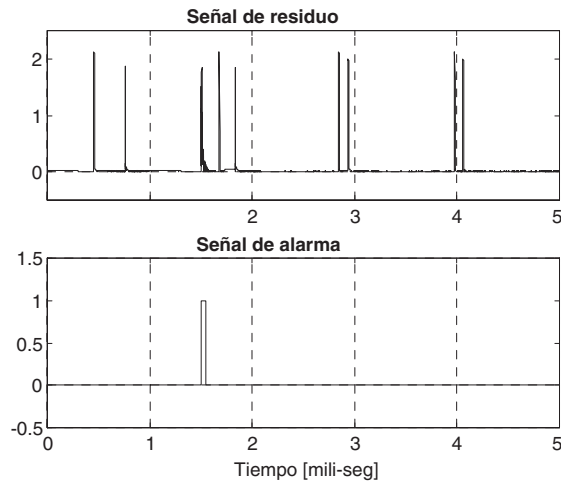


Figura 14 Señales de residuo y alarma

Cabe mencionar que para la operación nominal del convertidor es necesario que dos dispositivos de una misma rama (SW1 y SW2 --- SW3 y SW4 de la figura 1) tengan tiempos muertos, para evitar que entren en falla de corto circuito, dicho en otras palabras hay que apagar primero a los interruptores antes de encender el interruptor complementario.

Conclusiones

En éste trabajo se ha presentado un método para la detección de fallas en el inversor de un sistema convertidor-motor de inducción monofásico controlado mediante un PWM sinusoidal. Esta metodología necesita únicamente la medición de la tensión en bornes del motor, así como la tensión de la señal de control, llevando a cabo una comparación de ambas mediciones. De esta manera contrariamente a otras metodologías propuestas, donde la señal de corriente del estator es la encargada de proporcionar la información necesaria para el diagnóstico de fallas, la señal de control V_{GE} (tensión de comando de los interruptores) contiene información sobre las fallas que ocurren

en el convertidor, por lo que la localización de la falla de pérdida de secuencia al encendido se lleva a cabo sin ambigüedad, como lo muestran los resultados experimentales presentados.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al CONACYT por el apoyo recibido en la realización de este trabajo, así como al ECOS-ANUIES 1999-2003.

Referencias

1. M. Cerrada, J. Cardillo, J. Aguilar, R.Faneite, "Agent-Based Maintenance Management System for The Distributed Fault Tolerance". *Proceedings of IFAC SAFEPROCESS 2006*. Beijing-China. Septiembre 2006. pp 997-1002.
2. F. Pedrayes, C.H. Rojas, M.F. Cabanas, M.G. Melero, G.A. Orcajo, J.M. Cano, "Application of a Dynamic Model based on a Network of Magnetically Coupled Reluctances to Rotor Fault Diagnosis in Induction Motors", *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines Power Electronics and Drives (SDEMPED 2007)*. Cracow (Poland). Septiembre 2007. pp. 241-246.
3. E. Alcorta García, P. M. Frank, "Fault Detection and Isolation in nonlinear systems", *European Control Conference ECC'99*. Karlsruhe. Germany. 1999. pp. 320-325.
4. M. Y. Chow. "Guest Editorial Special Section on Motor Fault Detection and Diagnosis". *IEEE trans. on Indust. Electronics*. Vol. 47. 2000 pp. 982-983.
5. R. Peugeot, S. Courtine, J. P. Rognon. "Fault Detection and Isolation on a PWM Inverter by Knowledge-Based Model". *IEEE Transactions on Industry Applications*. Vol. 34. 1998. pp. 1318-1325.
6. R. Isermann. "Diagnosis methods for electromechanical components". *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*. 2000. pp. 5-8.
7. J. Chen, R. J. Patton "Robust model-based Fault diagnosis for dynamics systems". Ed. Kluwer Academic Publishers. London. U.K. 1999. pp. 50-83.
8. A. Wolfram, R. Isermann. "On-Line Fault Detection of Inverter-Fed Induction Motor Using Advanced Signal Processing Techniques". *Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for the Technical Processes, IFAC safeprocess'2000*. Budapest. pp.1151-1156.

9. S. Petropol, S. Lesecq, A. Barraud "Fault Detection Using On-Line Wavelet Analysis: Application Induction Motor". *Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for the Technical Processes, IFAC safeprocess'2000*. Budapest. pp. 1157-1162
10. R. Isermann. *Model-based fault-detection and diagnosis- Status and applications*. Ed. Elsevier. Amsterdam. Vol. 29. 2005. pp. 71-85.
11. M. Blodt, P. Granjon, B. Raison, G. Rostaing. "Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Vol. 55. 2008. pp. 1813-1822.
12. K. Kyusung, A. G. Parlos. "Induction motor fault diagnosis based on neuropredictors and wavelet signal processing". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Vol. 7. 2002. pp. 201-219.
13. A. M. S. Mendez, A. J. M. Cardoso. "Fault Diagnosis in a Rectifier-Inverter Systems Used in Variable Speed AC Drives, by Park's Vector Approach". *IEEE SDEMPED'99*. pp. 99-103.
14. F. Filippetti, G. Franceschini, C. Toscri, P. Vas. "Recent Developments of Induction Motor Drives Fault Diagnosis Using AI Techniques". *IEEE Trans. on Ind. Applications*. Vol. 47. 2000. pp. 994-1004.
15. N. Jerance, B. Raison, O. Sename. "Observer Based Fault Detection and Isolation in Induction Machine Drive". *Symposium on Fault Detection Supervision and Safety for the Technical Processes, IFAC safeprocess'2000*, Budapest. pp. 955-960.
16. P. E. Dumont, A. Aitouche, M. Bayart. "Fault Detection of Actuator Faults for Electric Vehicle". *IEEE International Conference on Control Applications*. 2007. pp. 1067-1072.
17. M. H. Rashid. "*Power Electronics Handbook*". Ed. Academic Press. San Diego. California. USA. 2001. pp. 225-270.
18. J. Gertler. "*Fault detection and diagnosis in engineering systems*". Ed. Marcel Dekker inc. New York. USA. 1998. pp. 152-182.