



Title: Propuesta de diagnóstico de fallas para un motor de inducción utilizando modelos combinados de ecuaciones de paridad

Authors: MARTINEZ-RODRIGUEZ, Gilberto, RODRIGUEZ-BLANCO, Marco Antonio, MÉNDEZ MARTÍNEZ, Francisco and GAMBOA-MARTÍN, Vianney Aurora

Editorial label ECORFAN: 607-8695

BCIERMMI Control Number: 2021-01

BCIERMMI Classification (2021): 271021-0001

Pages: 15

RNA: 03-2010-032610115700-14

ECORFAN-México, S.C.

143 – 50 Itzopan Street

La Florida, Ecatepec Municipality

Mexico State, 55120 Zipcode

Phone: +52 1 55 6159 2296

Skype: ecorfan-mexico.s.c.

E-mail: contacto@ecorfan.org

Facebook: ECORFAN-México S. C.

Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

Holdings

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

Contenido

1. Introducción
2. Metodología
3. Conclusiones
4. Referencias

1. Introducción

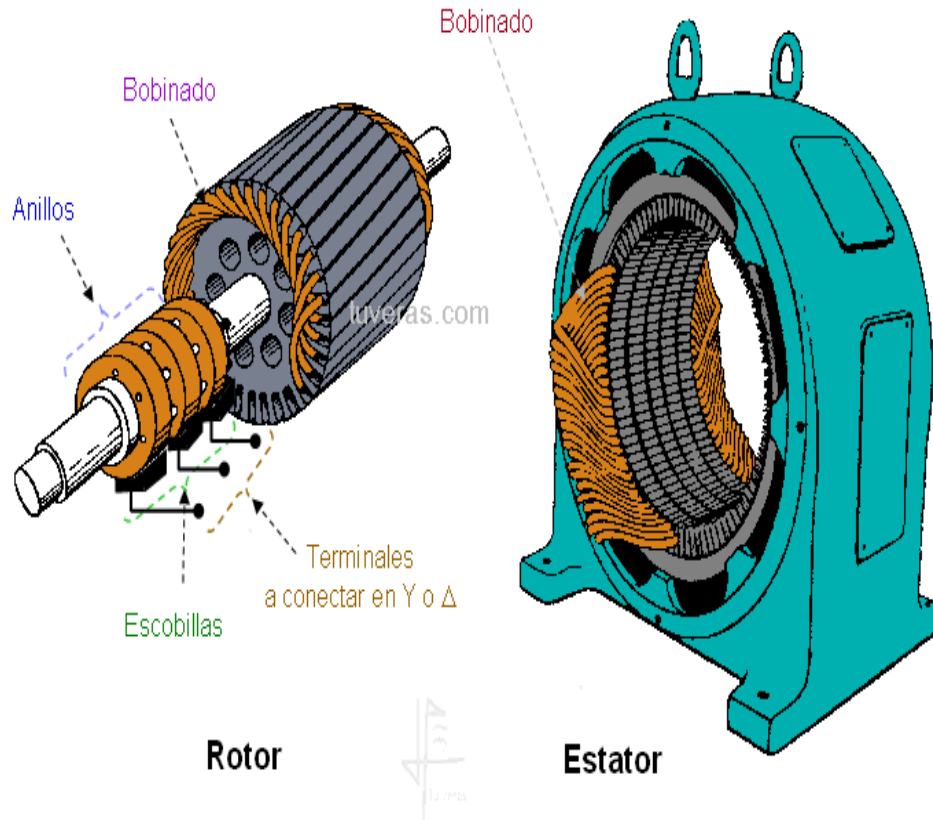


Figura 1 Estructura de un motor de inducción

Fuente: <http://www.artinaid.com/wp-content/uploads/2013/02/Partes-de-un-Generador-Estator-y-Rotor.gif>

El motor de inducción MI es la fuerza de trabajo en la industria, es y seguirá siendo ampliamente utilizado en una gran variedad de aplicaciones debido a muchos factores económicos como sus bajos costos, construcción simple, robustez y fiabilidad (Kosow, 1993).

Generalmente, las fallas más frecuentes en el MI son mecánicas, y estas están relacionadas con la operación eléctrica del motor, tales como el sobrecalentamiento y cortocircuito entre espiras de la bobina del estator (Chen, 2012).

En la actualidad se utilizan principalmente dos métodos de detección y diagnóstico de fallas en los motores de inducción; uno es el método basado en el análisis de la señal y otro es el método basado en la estimación de parámetros (Krause, 2002).

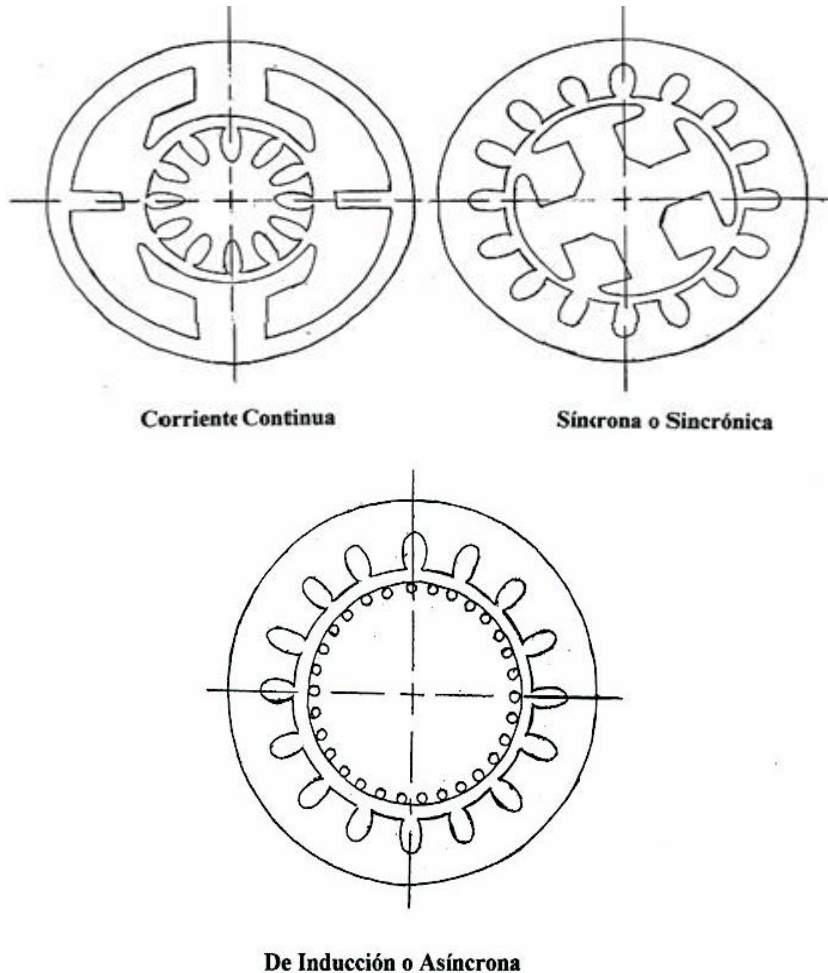


Figura 2 Tipos de motor de inducción

Fuente: Motor síncrono y asíncrono: diferencias, principio de funcionamiento, aplicación (nextews.com)

El análisis de vibración es una técnica que más se estudia para detectar fallas en los motores de inducción (Nandi, 2002). Otra técnica basada en el modelo es mediante el uso de las ecuaciones de paridad (Bouattour, 2000), (Isermann, 1996) que pueden ser adecuados para detectar varias fallas, pero para calcular los residuos de la ecuación de paridad general, es necesario obtener primero un modelo matemático exacto del sistema (Chen, 2012). Principalmente se hacen a los sistemas lineales, donde están más disponibles los modelos precisos.

Las fallas se pueden clasificar de la siguiente manera: *fallas eléctricas*, *fallas mecánicas* y *fallas relativas al entorno* (Kosow, 1993).

Una manera sencilla de detectar fallas es comparar el comportamiento de las señales del proceso con las señales del modelo del proceso en estado ideal. Las diferencias que existan entre el modelo y el proceso se detectan por una serie de residuos, de tal forma que los residuos se encargan de detectar las fallas que existan durante el proceso. El método de ecuaciones de paridad va detrás de la probabilidad con la formulación del modelo en espacios de

2. Metodología

El MI normalmente está conectado a un inversor para aplicaciones de control de velocidad. Sin embargo, en la industria hay aplicaciones “no críticas” donde sólo es necesario un funcionamiento constante en estado estacionario. De esta manera, es importante un análisis de estado constante para el diagnóstico de fallas en un MI sincrónico.

A continuación, las ecuaciones del estator son:

$$V_{qs} = (R_s + L_s \rho) i_{qs} + \omega_s L_s \rho i_{ds} + L_m \rho i_{qr} + \omega_s L_m i_{dr}$$

$$V_{ds} = (R_s + L_s \rho) i_{ds} - \omega_s L_s \rho i_{qs} + L_m \rho i_{dr} - \omega_s L_m i_{qr}$$

Remplazando los valores en la ecuación de voltaje.

$$V_{qs} = (R_s + L_s \rho) i_T + \omega_s L_a i_f + \omega_s \frac{L_m^2}{L_r} i_f = (R_s + L_s \rho) i_T + \omega_s L_a i_f$$

Donde L_a es:

$$L_a = \sigma L_s = \left(L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right)$$

Una vez que se realizan las ecuaciones de la parte eléctrica y mecánica del MI, a partir de las ecuaciones anteriores se obtiene el siguiente diagrama a bloques:

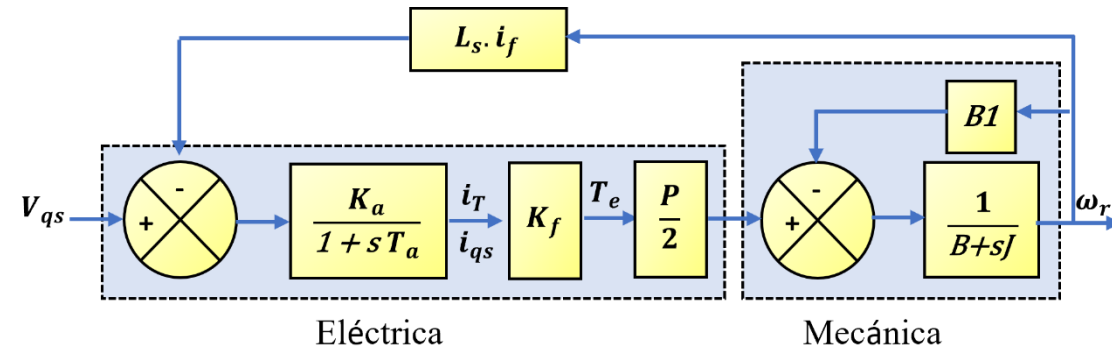


Figura 3 Diagrama de bloques del modelo del MI con enlaces constantes de flujo de rotor.

Fuente: R. Krishnan, *Electric Motor Drives Modeling, Analysis and Control*. Prentice Hall, 2001.

Este modelo es tan similar al modelo del motor de CD obtenido en (Chan, 2006) y (Isermann, 1996). Aunque la principal diferencia es que el parámetro de entrada es V_{qs} en lugar de la corriente de armadura I_A .

Generación de residuos mediante las ecuaciones de paridad

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{WY}(t) - \mathbf{WQU}(t)$$

Una condición importante para satisfacer tanto el primer y segundo término de (24), es que los términos sean iguales para que $\mathbf{r}(t)$ sea cero, entonces $\mathbf{WT} = 0$ (Isermann, 1996), donde \mathbf{W} se llama al espacio nulo de \mathbf{T} y se puede obtener proponiendo el mayor número de ceros posibles en las filas, teniendo en cuenta que las líneas son linealmente independientes.

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} R_a & \psi & L_a & 0 & 0 & 0 \\ -\alpha & \beta & 0 & J & 0 & 0 \\ \gamma & 0 & \delta & 0 & JL_a & 0 \\ 0 & \gamma & 0 & \delta & 0 & JL_a \end{bmatrix}$$

Tengamos en cuenta que durante el estado estacionario la derivada de $x(t)$ es cero, y $V_{qs}t = V_{qs}$, por lo tanto, el residuo se puede simplificar:

$$r_1(t) = R_a I_{qs}(t) + \psi \omega_r(t) - V_{qs} \quad r_3(t) = \gamma I_{qs}(t) - \beta V_{qs}$$

$$r_2(t) = -\alpha I_{qs}(t) + \beta \omega_r(t) \quad r_4(t) = \gamma \omega_r(t) - \alpha V_{qs}$$

Una forma sencilla de distinguir la falla es utilizando detectores de corriente clásicos in la corriente del estator, de valores límites con un ajuste adecuado.

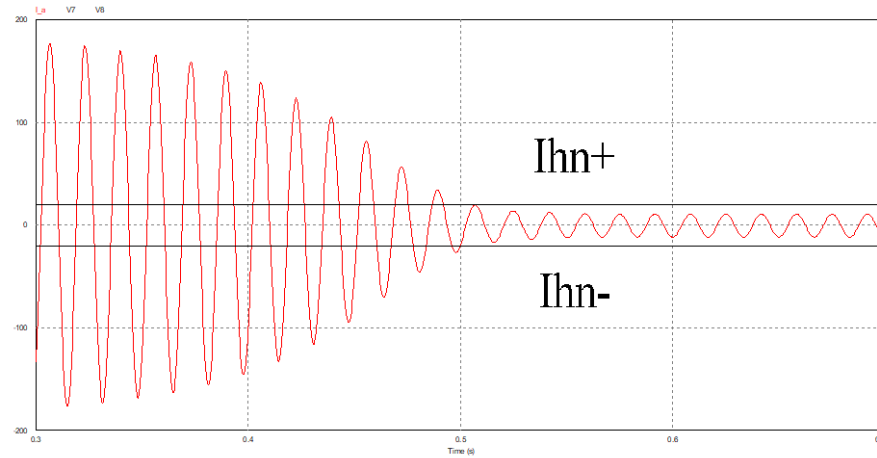


Figura 4 Umbrales limites en la corriente nominal del MI

Fuente: Elaboración propia.

Los valores límites de los umbrales están ajustados utilizando la condición “Libre de Fallas” del motor de inducción, el umbral se fija cerca de la corriente nominal.

$$f_n = \begin{cases} 1 \rightarrow & I_n > I_{hn+} \\ 1 \rightarrow & I_n < I_{hn-} \\ 0 \rightarrow & I_{hn-} > I_n > I_{hn+} \end{cases}$$

Fallas	R_1	R_2	R_3	R_4	
paramétrico	R_s		0	0	
	R_r		0	0	
	L_s		0		
	L_r				
	B	0			
	B_l	0			
aditivo	i_{qs^e}				0
	ω_r			0	
	V_{qs^e}		0		

Tabla 1 Matriz de detección de fallas en marco de referencia DQ

Fuente: Diseño propio

La tabla muestra los parámetros asociados con el diagnóstico de fallas eléctricas en el modelo del motor de inducción utilizando las ecuaciones de paridad basadas en el marco de referencia DQ para su linealización.

Donde “I” representa un cambio significativo que puede ser positivo o negativo.

Paridad en el modelo del motor de inducción trifásico

Las representaciones en espacio de estado a partir de las ecuaciones eléctricas del motor son:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_s \\ \dot{I}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -L_s^{-1}R_s & -L_s^{-1}\dot{M} \\ -L_r^{-1}\dot{M}^T & -L_r^{-1}R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s^{-1} & 0 \\ 0 & L_r^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -L_s^{-1}M & 0 \\ 0 & -L_r^{-1}M^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_r \\ \dot{I}_s \end{bmatrix}$$

Aplicando paridad se debe determinar una ω^T que satisfaga el aislamiento de parámetros de la ecuación

$$r(t) = \omega^T Y(t) - \omega^T Q_u U(t)$$

$$[\omega_{i1}^T \quad \omega_{i2}^T \quad \omega_{i3}^T] \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \end{bmatrix} = 0$$

Para la búsqueda de vectores que satisfagan la estructura deseada se debe cumplir con:

$$\omega_{i1}^T C \quad \omega_{i2}^T CA \quad \omega_{i3}^T CA^2 = 0$$

Como la matriz C es igual a una identidad con la finalidad de tomar mediciones físicas directamente de las corrientes del estator, entonces las ecuaciones de los residuos quedan de la siguiente forma:

$$\omega_{i1}^T C = \omega_{i2}^T CA + \omega_{i3}^T CA^2$$

$$\omega_{i2}^T C = \omega_{i1}^T C + \omega_{i3}^T CA^2$$

$$\omega_{i3}^T CA^2 = \omega_{i1}^T C + \omega_{i2}^T C$$

Para encontrar cada uno de los residuos la ω^T de las ecuaciones fue propuesta para ser insensible a los cambios en los parámetros asociados para cada una de las fases del estator en el MI, el resultando del comportamiento de los residuos de cada una de las fases del estator.

Fallas Paramétricas	R_1	R_2	R_3
R_{sa}	1	0	0
R_{sb}	0	1	0
R_{sc}	0	0	1
L_{sa}	1	0	0
L_{sb}	0	1	0
L_{sc}	0	0	1

Tablaa 2 Matriz de detección de fallas acotado a las fases de estator del MI.

Fuente: Chulines(2018)

Para el diagnóstico del modelo DQ al ser semejante al modelo eléctrico del MI, otorga un sistema semejante a un motor de corriente directa, una vez obtenida una matriz W es posible determinar los residuos y comprobar su flexibilidad de aislamiento.

Detección final de fallas

Se combinan estas dos técnicas para ser más precisos en cuanto al tipo de falla que se está presentando el sistema y así mejorar la vida útil del motor.

Esta combinación de técnicas se complementan ya que las fallas tienen un margen de error del 50% en el modelo DQ en la cual eran las paramétricas, con el modelo de inducción trifásico, hace lo propio para determinar las fallas pero en cada una de las fases de corrientes del estator y así complementar la detección de las fallas paramétricas en el MI de este sistema combinado, dando como resultado un sistema de detección más completa.

Los residuos combinados obtenidos por medio de la combinación de ecuaciones de paridad, la cual las fallas paramétricas tanto de R_s y L_s hacen que el sistema nos brinde mejor detección y se conozca con exactitud la fase dañada, para posteriormente aplicar un mantenimiento preventivo o correctivo.

Fallas		R_1	R_2	R_3	R_4
paramétrico	R_s	1	0	0	1
	R_r	1	0	0	1
	L_s	1	0	1	1
	L_r	1	1	1	1
	B	0	1	1	1
	B_l	0	1	1	1
aditivo	i_{qs^e}	1	1	1	0
	ω_r	1	1	0	1
	V_{qs^e}	1	0	1	1

Tabla 3 Matriz de detección de fallas en marco de referencia DQ

Fuente: Elaboración propia

El resultado de la matriz del modelo de estator muestra claramente que ahora la detección puede identificar la fase dañada, a diferencia del modelo basado en el marco de referencia DQ. Así mismo los residuos obtenidos considerando el modelo sin restricción DQ basado en las fases del estator agregan síntomas adicionales que mejoran la detección de otros parámetros como son las corrientes y los voltajes de cada una de las fases del MI. Entonces, ahora puede tener detección simultánea de múltiples fallas de R_s y L_s .

Modelo de estator				
Fallas	r_1	r_2	r_3	Fallas en las fases
R_s	1	0	0	R_{sa}
	0	1	0	R_{sb}
	0	0	1	R_{sc}
	1	1	0	R_{sa}, R_{sb}
	1	0	1	R_{sa}, R_{sc}
	0	1	1	R_{sb}, R_{sc}
	1	1	1	R_{sa}, R_{sb}, R_{sc}
L_s	1	0	0	L_{sa}
	0	1	0	L_{sb}
	0	0	1	L_{sc}
	1	1	0	L_{sa}, L_{sb}
	1	0	1	L_{sa}, L_{sc}
	0	1	1	L_{sb}, L_{sc}
	1	1	1	L_{sa}, L_{sb}, L_{sc}

Tabla 4 Matriz de detección de fallas con ecuaciones de paridad del modelo de estator basados en fallas en R_s y L_s

Fuente: Elaboración propia

3. Conclusiones

- Dado que el modelo del motor de inducción se puede emparejar con el modelo de motor de C.D., el análisis permite asegurar la existencia del espacio de paridad y, por tanto, obtener las ventajas de la detección de fallas para este tipo de sistema. De esta forma, es conveniente considerar heurísticamente un tiempo muerto de diagnóstico desde el principio y umbrales de corrientes fijas, de acuerdo con el tiempo de estabilización y de la corriente nominal de entrada respectivamente.
- Usando la tabla 3, permite detectar las fallas paramétricas y aditivas, así como la localización de cada una de las fases afectada para L_s y R_s respectivamente. *La transformada de Park y operaciones algebraica simples son suficiente para desarrollar el algoritmo matemático del sistema de detección propuesto.* y son sencillas de implementar en cualquier procesador digital ya que los operadores son sumas, restas y multiplicación. Siendo este sistema combinado de detección la forma más factible por su corto tiempo de respuesta y a su vez que el sistema se puede mejorar para mayor precisión en el futuro

4. Referencias

- Chan, C. W., Hua, S., & Hong-Yue, Z. (2006). Application of fully decoupled parity equation in fault detection and identification of DC motors. *IEEE transactions on industrial electronics*, 53(4), 1277-1284.
- Chen, J., & Patton, R. J. (2012). Robust model-based fault diagnosis for dynamic systems (Vol. 3). *Springer Science & Business Media*.
- Chow, T. W. S., & Fei, G. (1995). Three phase induction machines asymmetrical faults identification using bispectrum. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 10(4), 688-693.
- Chulines, E., Rodríguez, M. A., Duran, I., & Sánchez, R. (2018). Simplified model of a three-phase induction motor for fault diagnostic using the synchronous reference frame DQ and parity equations. *IFAC*, 51(13), 662-667.
- Grigsby, L. L. (Ed.). (2012). Power system stability and control (Vol. 5). *CRC press*.
- Henry, D., Zolghadri, A., & Monsion, M. (1997). Robust fault diagnosis in induction motors using unknown input observers. SDEMPED'.
- Hernández López, Manuel. (junio 2011). Detección de Fallas Eléctricas en un Motor de Inducción Mediante el Enfoque Basado en el Modelo Utilizando Ecuaciones de Paridad. tesis de licenciatura.

- Isermann, R. (june de 1995). Model base fault detection and diagnosis methods. *American Control Conference-ACC'95,IEEE, 3*, 1605-1609.
- Isermann, R. (1997). Supervision, fault detection and fault diagnosis methods an introduction. *Control engineering practice, 5(5)*, 639-652.
- Isermann, R. (2005). *Fault-diagnosis systems: an introduction from fault detection to fault tolerance*. Springer Science & Business Media.
- Isermann, T. Höfling and R. (1996). “Fault detection based on adaptive parity equations and single-parameter tracking”. *Control Engineering Practice, 4(10)*, 1361–1369.
- Klima, J. (2003). Analytical investigation of an induction motor drive under inverter fault mode operations. *IEE Proceedings-Electric Power Applications, 150(3)*, 255-262.
- Kolla, S., & Varatharasa, L. (2000). Identifying three-phase induction motor faults using artificial neural networks. *ISA transactions, 39(4)*, 433-439.
- Kosow, I. L. (1993). *Máquinas eléctricas y transformadores*. Pearson Educación.

Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. (2002). Analysis of electric machinery and drive systems (Vol. 2). *IEEE press*.

Krishnan, R. (2001). *Electric motor drives: modeling, analysis, and control*. Pearson.

Kundur, P. (1994). Power system stability and control. *Edited by Neal J. Balu, and Mark G. Lauby, 4(2)*.

Loparo, K. A., Adams, M. L., Lin, W., Abdel-Magied, M. F., & Afshari, N. (2000). Fault detection and diagnosis of rotating machinery. *IEEE Transactions on Industrial Electronics, 47(5)*, 1005-1014.

Mendes, A. M. S., & Cardoso, A. M. (August de 2003). Performance analysis of three-phase induction motor drives under inverter fault conditions. *In 4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives. SDEMPED 2003.*, 205-210.



ECORFAN®

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- (www.ecorfan.org/booklets)