

Análisis estructural del motor de inducción de rotor devanado para diagnóstico de fallas eléctricas

Juan A. Mejía, Nancy Visairo, and Ricardo Álvarez *

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UASLP,
Dr. Manuel Nava 8, 78290, San Luis Potosí, S.L.P.
Teléfono-fax: (52)444-817-3381
jamejiav@gmail.com, {nvisairoc, ralvarez}@uaslp.mx

Resumen El objetivo de este artículo es mostrar la detectabilidad y aislabilidad del motor de inducción de rotor devanado a través del análisis estructural para un conjunto de fallas. El modelo estructural se determina a partir del modelo matemático del motor en condiciones normales utilizando el marco de referencia ABC. En este trabajo sólo se consideran fallas eléctricas. El modelo estructural del motor consta de 25 restricciones, 14 variables conocidas, 16 variables desconocidas y 3 perturbaciones. Con la descomposición canónica de *Dulmage-Mendelsohn* se muestra que el modelo del motor es sobre-restringido lo cual permite generar relaciones redundantes. Se genera la matriz de incidencia para obtener los *aparejamientos (matchings)* que muestran si es posible calcular variables desconocidas a través de las variables conocidas. De esta forma, se obtiene la máxima *aislabilidad* entre las fallas consideradas.

Key words: Análisis estructural (AE), motor de inducción, diagnóstico de fallas.

1. Introducción

Aunque inicialmente en las máquinas eléctricas existieron sistemas de protección para sobrecorrientes, sobrevoltajes, fallas a tierra, etc. para asegurar una operación fiable, el monitoreo y diagnóstico han tenido gran interés en los últimos 20 años, [7]. En particular, las máquinas de inducción son las más empleadas en la industria moderna por su bajo costo, robustez, bajo mantenimiento y su relación peso-potencia. Sin embargo, son susceptibles a fallas (eléctricas, en baleros y excentricidad), las cuales pueden sacarlas de operación y generar costos elevados en mantenimientos de emergencia y como consecuencia, bajo rendimiento económico [12].

* Los autores agradecen a los proyectos P/CA-78-SEP y C07-FAI-11-26.62 que financiaron esta investigación.

Es así como la industria se ha interesado en adoptar técnicas de monitoreo y diagnóstico para evaluar las condiciones de operación de las máquinas de inducción. Estas técnicas permiten, entre otras cosas, incrementar considerablemente la confiabilidad y proporcionar seguridad a los usuarios satisfaciendo los nuevos requerimientos en los complejos industriales [3].

Para esto, diversas técnicas de diagnóstico de fallas para máquinas de inducción se han desarrollado. Entre las más frecuentes están: las basadas en el espectro en frecuencia en las que el diagnóstico consiste en un monitoreo en línea y un procesamiento de las corrientes del estator para detectar los espectros típicos en frecuencia [6]; las basadas en el fasor instantáneo de Park, esta técnica consiste en realizar una transformación a dos ejes en cuadratura y, extrayendo información del fasor espacial resultante se consigue el diagnóstico para diversos tipos de fallas considerando una falla a la vez [5], [10]; están también las técnicas basadas en modelos matemáticos, en estas técnicas se utiliza la identificación de parámetros u observadores de la teoría de Control Automático, [2]. Cada una de las técnicas existentes son válidas considerando la importancia de la máquina, la cantidad de las fallas a detectar y el mantenimiento al que se ve sometida cada máquina; sin embargo, hasta ahora no se ha presentado un análisis que muestre las propiedades de la máquina relacionadas con el diagnóstico de fallas, es decir, un análisis que permita determinar la detectabilidad y aislabilidad para el conjunto de fallas de interés.

Lo anterior motivó el desarrollo de este trabajo en el cual, por medio de la teoría de Análisis Estructural, se determinan las propiedades estructurales de la máquina de inducción para propósitos de diagnóstico de fallas eléctricas, en particular, se considera el motor de inducción de rotor devanado. Este análisis permite entonces determinar características importantes tales como robustez a perturbaciones, detectabilidad y aislabilidad del conjunto de fallas de interés.

Así, este artículo está organizado de la siguiente manera. En la Sección 2 se dan los conceptos fundamentales del Análisis Estructural mostrando la metodología seguida en este trabajo. En la Sección 3 se presenta el modelo matemático del motor de rotor devanado considerando el marco ABC. En la Sección 4 se desarrolla el análisis estructural aplicado al motor basado en su modelo estructural. La Sección 5 discute las propiedades estructurales del motor. Finalmente, en la Sección 6 se dan las conclusiones.

2. Análisis Estructural

En esta sección se dan los conceptos básicos para realizar el análisis estructural [1].

Considere un modelo general en espacio de estado

$$\dot{x}(t) = g(x(t), u(t), \theta(t), f(t), d(t)). \quad (1)$$

$$y(t) = h(x(t), u(t), \theta(t)). \quad (2)$$

$$0 = m(x(t), u(t)). \quad (3)$$

con los estados $x(t) \in \mathcal{R}^n$, entradas $u(t) \in \mathcal{R}^m$, fallas $f(t) \in \mathcal{R}^f$, perturbaciones $d(t) \in \mathcal{R}^d$, salidas $y(t) \in \mathcal{R}^p$, y parámetros $\theta(t) \in \mathcal{R}^g$ los cuales pueden ser considerados como variables con valores conocidos o desconocidos, y las funciones m restricciones estáticas. Entonces el conjunto de ecuaciones (1-3) están dadas respectivamente por:

$$\mathcal{Z} = \mathcal{X} \cup \mathcal{U} \cup \mathcal{Y} \cup \theta \cup \mathcal{F} \cup \mathcal{D} \quad \mathcal{C} = g \cup h \cup m$$

donde $\mathcal{Z}$ es el conjunto de variables y parámetros, y $\mathcal{C}$ es el conjunto de las restricciones.

- El modelo del comportamiento del sistema se define por el par $(\mathcal{C}, \mathcal{Z})$, que es independiente tanto de la forma de las restricciones como de las variables.
- El modelo estructural de un sistema $(\mathcal{C}, \mathcal{Z})$ es un grafo bipartita $(\mathcal{C}, \mathcal{Z}, \varepsilon)$, donde

$$\varepsilon \subset \mathcal{C} \times \mathcal{Z}. \quad (4)$$

es el conjunto de aristas definidas por

$$(c_i, z_j) \in \varepsilon. \quad (5)$$

si la variable z_j aparece en la restricción c_i .

La matriz de incidencia (**MI**) de un grafo bipartita es una matriz booleana donde las filas corresponden a las restricciones y las columnas a las variables, los vertices se asocian con 1 cuando hay intersección entre una restricción y una variable, esto es:

$$MI = \{m_{i,j} \mid m_{i,j} = 1 \text{ si } (c_i, z_j) \in \varepsilon \text{ de lo contrario } m_{i,j} = 0\}. \quad (6)$$

Definition 1. El subconjunto $M \subset \varepsilon$ es un aparejamiento que asigna elementos de $\mathcal{Z}$ con elementos de $\mathcal{C}$ si para cualquier pareja $e_1, e_2 \subset M$ tal que $e_1 \neq e_2$ implica

$$p_c(e_1) \neq p_c(e_2) \text{ y } p_z(e_1) \neq p_z(e_2). \quad (7)$$

donde

e_1, e_2 : pueden ser aristas dirigidas: variable a restricción o restricción a variable.
 $p_c(e_z)$: es una proyección de la arista sobre el conjunto de restricciones.
 $p_z(e_c)$: es una proyección de la arista sobre el conjunto de variables.

El proceso de aparejamiento es en esencia un camino para especificar en un sistema cuáles son las restricciones que son necesarias para encontrar una solución para una variable desconocida. Una forma de optimizar los aparejamientos se logra con la descomposición Dulmage-Mendelsohn, Figura 1.

Theorem 1. Descomposición de una matriz de incidencia (**MI**).
 Cualquier **MI** de dimensión finita puede ser únicamente descompuesta en 3 secciones:

- Sobre-restringida: $S^+ = (C^+, Z^+)$ tal que $Q(C^+) = Z^+$, y existan parejas completas sobre Z^+ pero no sobre C , implicando una existencia de una redundancia de información.
- Justo-restringida: $S^0 = (C^0, Z^0)$ tal que $Q(C^0) = Z^0 \cup Z^+$, y existan parejas completas sobre ambas Z^0 y en C^0 .
- Sub-restringida: $S^- = (C^-, Z^-)$ tal que $Q(C^-) = Z^- \cup Z^0 \cup Z^+$, y existan parejas completas sobre C^- pero no sobre Z^- .

donde $Q(C^i)$ son las proyecciones respectivas, $i = +, -, 0$.

	Z^+	Z^0	Z^-
C^+		0	0
C^0			0
C^-			

Figura 1. Descomposición Dulmage-Mendelsohn

Para determinar la detectabilidad y la aislabilidad se utilizan las relaciones redundantes (ARR's) que son ecuaciones basadas sólo en señales conocidas tales como las de actuadores o de sensores, y son siempre iguales a cero cuando no hay una falla presente y diferente de cero cuando cierto conjunto de fallas ocurre. El resultado de una ARR es también llamado señal de residuo [9], y se obtienen a partir de las restricciones que no son consideradas en el aparejamiento.

3. Modelo del Motor de Rotor devanado

Los motores de inducción de rotor devanado se construyen con espiras aisladas en el rotor similares a las de los devanados de estator. Los devanados de rotor son usualmente del tipo trifásico con tres conectores para aislar los anillos conductores (conocidos como anillos deslizantes) montados en la parte interna del eje del rotor y se usan cepillos de carbón para las conexiones externas.

Por lo general, estos motores están disponibles en rangos desde 5 HP hasta 15,000 HP, y son ideales para distintas aplicaciones tales como grúas, bombas, transportadoras, mezcladoras, etc. [11].

Este motor tiene la capacidad de aumentar la velocidad en equipos con gran inercia y cargas grandes de manera suave y fácil. El motor de rotor devanado puede incluso desarrollar un torque muy grande al arranque y mantenerse en

baja velocidad. Además, ofrece la posibilidad de un control completo de ambos lados de la máquina (rotor y estator) de una manera equivalente. Esto es una característica importante debido a que da una mayor libertad de operación como motor eléctrico. Debido a que el motor de rotor devanado es controlado por medio de inversores, uno para el rotor y otro para el estator (Figura 2), da la posibilidad de mediciones en estos dos componentes de la máquina, lo que no es posible en otros motores eléctricos como el motor de inducción jaula de ardilla [8].

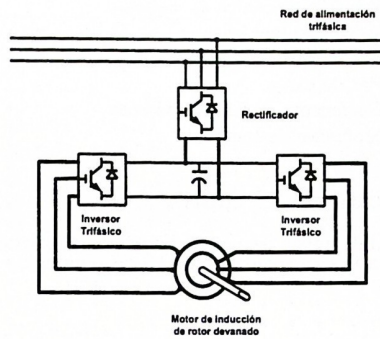


Figura 2. Motor de Inducción de rotor devanado alimentado por 2 inversores

Para obtener el modelo del motor de rotor devanado se toma el modelo del motor de inducción jaula de ardilla [4] asumiendo que el rotor se modela como un circuito trifásico. De esta forma, sólo es necesario considerar en el modelo que el voltaje del rotor devanado no es cero ya que posee terminales externas. Así, las ecuaciones del motor de rotor devanado están dadas por:

$$[V_S] = [R_S] [I_S] + \frac{d[\Psi_S]}{dt}, [V_R] = [R_R] [I_R] + \frac{d[\Psi_R]}{dt}. \quad (8)$$

$$[\Psi_S] = [L_S] [I_S] + [M_{SR}(\theta_r)] [I_R], [\Psi_R] = [L_R] [I_R] + [M_{SR}(\theta_r)]^T [I_S]. \quad (9)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_m. \quad (10)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{P}{2J} [I_S]^T \left[M_{SR}(\theta_r + \frac{\pi}{2}) \right] [I_R] - \frac{B}{J} \omega_m - \frac{1}{J} T_l. \quad (11)$$

P :	Número de pares de polos
$R_S = \text{diag}[R_{sa} R_{sb} R_{sc}]$:	Resistencia del estator por fase
L_{ls} :	Inductancia de dispersión del estator
$R_R = \text{diag}[R_{ra} R_{rb} R_{rc}]$:	Resistencia del rotor por fase
L_{lr} :	Inductancia de dispersión del rotor
L_{ms} :	Coefficiente de la inductancia mutua entre dos fases del estator
L_{mr} :	Coefficiente de la inductancia mutua entre dos fases del rotor

M_{SR} :	Inductancia mutua máxima entre una fase del estator y una fase del rotor
$V_S = [V_{sa} V_{sb} V_{sc}]^T$:	Tensiones de alimentación de las fases del estator
$I_S = [I_{sa} I_{sb} I_{sc}]^T$:	Corrientes en las fases del estator
$\Psi_S = [\psi_{sa} \psi_{sb} \psi_{sc}]^T$:	Flujos en las fases del estator
$\Psi_R = [\psi_{ra} \psi_{rb} \psi_{rc}]^T$:	Flujos en las fases del rotor
$V_R = [V_{ra} V_{rb} V_{rc}]^T$:	Tensiones en las fases del rotor
$I_R = [I_{ra} I_{rb} I_{rc}]^T$:	Corrientes en las fases del rotor
θ_r :	Posición angular del rotor
θ_m :	Posición mecánica $\theta_r = \frac{P}{2} \theta_m$
ω_m :	Velocidad mecánica
T_{em} :	Par electromagnético
T_l :	Par de carga
B :	Coefficiente de fricción viscosa
J :	Momento de Inercia

4. Análisis Estructural del motor

El modelo dinámico del motor de rotor devanado contiene 25 restricciones c_i 's. Cuenta con 14 variables conocidas $\mathcal{X}_k$, 16 desconocidas $\mathcal{X}_x$, 3 perturbaciones $\mathcal{D}$ y 16 parámetros θ .

$$c_1 : f(\theta_m, I_{sa}, I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}, \dot{I}_{sa}, \dot{I}_{sb}, \dot{I}_{sc}, \dot{I}_{ra}, \dot{I}_{rb}, \dot{I}_{rc}, \dot{\theta}_m, V_{sa}). \quad (12)$$

$$c_2 : f(\theta_m, I_{sb}, I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}, \dot{I}_{sa}, \dot{I}_{sb}, \dot{I}_{sc}, \dot{I}_{ra}, \dot{I}_{rb}, \dot{I}_{rc}, \dot{\theta}_m, V_{sb}). \quad (13)$$

$$c_3 : f(\theta_m, I_{sc}, I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}, \dot{I}_{sa}, \dot{I}_{sb}, \dot{I}_{sc}, \dot{I}_{ra}, \dot{I}_{rb}, \dot{I}_{rc}, \dot{\theta}_m, V_{sc}). \quad (14)$$

$$c_4 : f(\theta_m, I_{ra}, I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}, \dot{I}_{sa}, \dot{I}_{sb}, \dot{I}_{sc}, \dot{I}_{ra}, \dot{I}_{rb}, \dot{I}_{rc}, \dot{\theta}_m, V_{ra}). \quad (15)$$

$$c_5 : f(\theta_m, I_{rb}, I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}, \dot{I}_{sa}, \dot{I}_{sb}, \dot{I}_{sc}, \dot{I}_{ra}, \dot{I}_{rb}, \dot{I}_{rc}, \dot{\theta}_m, V_{rb}). \quad (16)$$

$$c_6 : f(\theta_m, I_{rc}, I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}, \dot{I}_{sa}, \dot{I}_{sb}, \dot{I}_{sc}, \dot{I}_{ra}, \dot{I}_{rb}, \dot{I}_{rc}, \dot{\theta}_m, V_{rc}). \quad (17)$$

$$c_7 : f(\dot{\theta}_m, \omega_m). \quad (18)$$

$$c_8 : f(\dot{\omega}_m, \omega_m, \theta_m, J, B, T_l, I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}, I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}). \quad (19)$$

$$c_{17} : f(I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}). \quad (20)$$

$$\begin{aligned}
c_9 : \dot{I}_{sa} &= \frac{dI_{sa}}{dt} = f(I_{sa}, \dot{I}_{sa}) & c_{18} : YI_{sa} &= I_{sa} = f(I_{sa}, YI_{sa}) \\
c_{10} : \dot{I}_{sb} &= \frac{dI_{sb}}{dt} = f(I_{sb}, \dot{I}_{sb}) & c_{19} : YI_{sb} &= I_{sb} = f(I_{sb}, YI_{sb}) \\
c_{11} : \dot{I}_{sc} &= \frac{dI_{sc}}{dt} = f(I_{sc}, \dot{I}_{sc}) & c_{20} : YI_{sc} &= I_{sc} = f(I_{sc}, YI_{sc}) \\
c_{12} : \dot{I}_{ra} &= \frac{dI_{ra}}{dt} = f(I_{ra}, \dot{I}_{ra}) & c_{21} : Y\theta_m &= \theta_m = f(\theta_m, Y\theta_m) \\
c_{13} : \dot{I}_{rb} &= \frac{dI_{rb}}{dt} = f(I_{rb}, \dot{I}_{rb}) & c_{22} : Y\omega_m &= \omega_m = f(\omega_m, Y\omega_m) \\
c_{14} : \dot{I}_{rc} &= \frac{dI_{rc}}{dt} = f(I_{rc}, \dot{I}_{rc}) & c_{23} : YI_{ra} &= I_{ra} = f(I_{ra}, YI_{ra}) \\
c_{15} : \dot{\theta}_m &= \frac{d\theta_m}{dt} = f(\theta_m, \dot{\theta}_m) & c_{24} : YI_{rb} &= I_{rb} = f(I_{rb}, YI_{rb}) \\
c_{16} : \dot{\omega}_m &= \frac{d\omega_m}{dt} = f(\omega_m, \dot{\omega}_m) & c_{25} : YI_{rc} &= I_{rc} = f(I_{rc}, YI_{rc}).
\end{aligned} \quad (21) \quad (22)$$

La representación estructural de una restricción no especifica la manera en que interactúan las variables y se incluyen las restricciones diferenciales (21) c_9 - c_{16} para hacer diferencia estructural entre las variables de estado y sus derivadas, y (22) c_{18} - c_{25} , para referir a las señales de sensor. Estos sensores podrían ser omitidos mediante la adición de más restricciones, pero se incluyen ya que en este modelo es posible, además de que proporcionan mayor redundancia.

4.1. Matriz de incidencia

El modelo estructural del motor se puede expresar por medio de su matriz de incidencia. La tabla 1 muestra esta representación en función de variables desconocidas.

Cuadro 1. Matriz de incidencia

γ	Desconocidas																	Perturbaciones	Conocidas
	I_{ra}	I_{rb}	I_{rc}	I_{sa}	I_{sb}	I_{sc}	I_{ra}	θ_m	ω_m	I_{sa}	I_{sb}	I_{sc}	I_{ra}	I_{rb}	I_{rc}	θ_m	ω_m		
c_1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	0	T_{BJ}	V_{sa}
c_2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0		V_{sb}
c_3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0		V_{sc}
c_4	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0		V_{ra}
c_5	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0		V_{rb}
c_6	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	0	1	0		V_{rc}
c_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
c_8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		
c_9	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		
c_{10}	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		
c_{11}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		
c_{12}	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		
c_{13}	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
c_{14}	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		
c_{15}	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		
c_{16}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1		
c_{17}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0		
c_{18}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		η_{sa}
c_{19}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	η_{sb}	
c_{20}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	η_{sc}	
c_{21}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	η_{ra}	
c_{22}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	η_{rb}	
c_{23}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	η_{rc}	
c_{24}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	η_{sa}	
c_{25}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	η_{sb}	
c_{26}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	η_{sc}	

4.2. Generación de las Relaciones Redundantes (ARR's)

Para el proceso apareamiento y generación de las ARR's se realizó la descomposición Dulmage-Mendelsohn, la cual arroja sólo un sistema sobre-restringido, como se muestra en la tabla 2. Los apareamientos se denotan por $\otimes$. Observando la tabla 2 se puede obtener el conjunto de restricciones redundantes: $C_{red} = \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7, c_8, c_{17}\}$.

$$c_1 : (V_{sa}, c_{15}(c_{21}(\eta_{sa})), c_{18}(YI_{sa}), c_9(c_{18}(YI_{sa})), c_{10}(c_{19}(YI_{sb})), c_{11}(c_{20}(YI_{sc})), c_{21}(\eta_{sa}), c_{23}(YI_{ra}), c_{24}(YI_{rb}), c_{25}(YI_{rc}), c_{12}(c_{23}(YI_{ra})), c_{13}(c_{24}(YI_{rb})), c_{14}(c_{25}(YI_{rc}))) = 0. \quad (23)$$

$$c_2 : (V_{rb}, c_{15}(c_{21}(\eta_{sa})), c_9(c_{18}(YI_{sa})), c_{19}(YI_{sb}), c_{10}(c_{19}(YI_{sb})), c_{11}(c_{20}(YI_{sc})), c_{21}(\eta_{sa}), c_{23}(YI_{ra}), c_{24}(YI_{rb}), c_{25}(YI_{rc}), c_{12}(c_{23}(YI_{ra})), c_{13}(c_{24}(YI_{rb})), c_{14}(c_{25}(YI_{rc}))) = 0. \quad (24)$$

$$c_3 : (V_{sc}, c_{15}(c_{21}(\eta_{sa})), c_9(c_{18}(YI_{sa})), c_{10}(c_{19}(YI_{sb})), c_{20}(YI_{sc}), c_{11}(c_{20}(YI_{sc})), c_{21}(\eta_{sa}), c_{23}(YI_{ra}), c_{24}(YI_{rb}), c_{25}(YI_{rc}), c_{12}(c_{23}(YI_{ra})), c_{13}(c_{24}(YI_{rb})), c_{14}(c_{25}(YI_{rc}))) = 0. \quad (25)$$

$$c_4 : (V_{ra}, c_{15}(c_{21}(\eta_{sa})), c_{18}(YI_{sa}), c_9(c_{18}(YI_{sa})), c_{19}(YI_{sb}), c_{10}(c_{19}(YI_{sb})), c_{20}(YI_{sc}), c_{11}(c_{20}(YI_{sc})), c_{21}(\eta_{sa}), c_{23}(YI_{ra}), c_{24}(YI_{rb}), c_{25}(YI_{rc}), c_{12}(c_{23}(YI_{ra})), c_{13}(c_{24}(YI_{rb})), c_{14}(c_{25}(YI_{rc}))) = 0. \quad (26)$$

$$c_5 : (V_{rb}, c_{15}(c_{21}(\eta_{sa})), c_{18}(YI_{sa}), c_9(c_{18}(YI_{sa})), c_{19}(YI_{sb}), c_{10}(c_{19}(YI_{sb})), c_{20}(YI_{sc}), c_{11}(c_{20}(YI_{sc})), c_{21}(\eta_{sa}), c_{24}(YI_{rb}), c_{12}(c_{23}(YI_{ra})), c_{13}(c_{24}(YI_{rb})), c_{14}(c_{25}(YI_{rc}))) = 0. \quad (27)$$

Cuadro 2. Matriz de incidencia. Aparejamiento

		Desconocidas														Perturbaciones	Conocidas
		I_{ra}	I_{rb}	I_{rc}	I_{ra}	I_{rb}	I_{rc}	ϕ_m	I_{ra}	I_{rb}	I_{rc}	I_{ra}	I_{rb}	I_{rc}	ϕ_m		
BR's	1	c_1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	γ_{ra} γ_{rb} γ_{rc} γ_{ra} γ_{rb} γ_{rc} γ_{ra} γ_{rb} γ_{rc} γ_{ra} γ_{rb} γ_{rc}
	2	c_2	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	
	3	c_3	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	
	4	c_4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	
	5	c_5	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	
	6	c_6	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	
	7	c_7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	
	8	c_8	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	
	9	c_{17}	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	

$$c_6 : (V_{rc}, c_{15}(c_{21}(Y\theta_m)), c_{18}(YI_{sa}), c_9(c_{18}(YI_{sa})), c_{19}(YI_{sb}), c_{10}(c_{19}(YI_{sb})), c_{20}(YI_{sc}), c_{11}(c_{20}(YI_{sc})), c_{21}(Y\theta_m), c_{25}(YI_{rc}), c_{12}(c_{23}(YI_{ra})), c_{13}(c_{24}(YI_{rb})), c_{14}(c_{25}(YI_{rc}))) = 0. \quad (28)$$

$$c_7 : (c_{15}(c_{21}(Y\theta_m)), c_{22}(Y\omega_m)) = 0. \quad (29)$$

$$c_8 : (T_l, B, J, c_{23}(YI_{ra}), c_{24}(YI_{rb}), c_{25}(YI_{rc}), c_{18}(YI_{sa}), c_{19}(YI_{sb}), c_{20}(YI_{sc}), c_{21}(Y\theta_m), c_{22}(Y\omega_m), c_{16}(c_{22}(Y\omega_m))) = 0. \quad (30)$$

$$c_{17} : (c_{18}(YI_{sa}), c_{19}(YI_{sb}), c_{20}(YI_{sc})) = 0. \quad (31)$$

5. Análisis de aislabilidad del conjunto de fallas

En esta parte del análisis es necesario especificar los grupos de fallas que se pretenden detectar, y en qué restricciones se presentan.

Las fallas consideradas son:

- f_1 : Cuando existe un corto circuito entre espiras de la fase A de estator son afectados los parámetros (L_{lsa} , L_{ms} y R_{sa})
- f_2 : Cuando existe un corto circuito entre espiras de la fase B de estator son afectados los parámetros (L_{lsb} , L_{ms} y R_{sb})
- f_3 : Cuando existe un corto circuito entre espiras de la fase C de estator son afectados los parámetros (L_{lsc} , L_{ms} y R_{sc})
- f_4 : Cuando existe un corto circuito entre espiras de la fase A de rotor son afectados los parámetros (L_{lra} , L_{mr} y R_{ra})
- f_5 : Cuando existe un corto circuito entre espiras de la fase B de rotor son afectados los parámetros (L_{lrb} , L_{mr} y R_{rb})

- f_6 : Cuando existe un corto circuito entre espiras de la fase C de rotor son afectados los parámetros (L_{lr_c} , L_{mr} y R_{rc})

5.1. Matriz de sensibilidad

Se puede observar que todas las fallas aparecen en las ARR's y de esta forma es fácil detectarlas. Cabe destacar que se toman como entradas desconocidas o perturbaciones a T_l , B , J pues están sujetas a cambios debido a la carga mecánica, por lo tanto, en el análisis de sensibilidad no es incluida la ARR8 ya que es afectada por las perturbaciones.

El análisis de aislabilidad se hace posible cuando se conjuntan todas las ARR's con su respectiva sensibilidad a las fallas. Ya que una ARR puede ser sensible a diferentes fallas, combinaciones de ARR's pueden dar información de aislabilidad.

Cuadro 3. Matriz de sensibilidad

	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6
ARR1	1	1	1	0	0	0
ARR2	1	1	1	0	0	0
ARR3	1	1	1	0	0	0
ARR4	0	0	0	1	1	1
ARR5	0	0	0	1	1	1
ARR6	0	0	0	1	1	1
ARR7	0	0	0	0	0	0
ARR9	0	0	0	0	0	0

Observando la matriz de sensibilidad resultante, tabla 3, se muestra que la aislabilidad sólo es posible entre rotor y estator, pero no entre fases.

Ya que L_{ms} y L_{mr} son parámetros que, ante una falla, varían en una proporción mucho más pequeña que R_S y R_R , respectivamente, se pueden no tomar en cuenta para poder aislar completamente las 6 fallas.

Se puede observar en la tabla 3 que las ARR's 7 y 9 no son sensibles a ninguna falla considerada, sin embargo, al considerar otro tipo de fallas, estas ARR's podrían ser de gran utilidad para la detección y aislamiento.

6. Conclusiones

En este trabajo se presentó un análisis para el diagnóstico de fallas del motor de rotor devanado por medio del análisis estructural, la descomposición Dulmage-Mendelsonh encontró un sistema sobre-restringido en el cual se implementó uno de los posibles apareamientos para el sistema. A partir de las

ecuaciones redundantes se encontraron las ARR's, las cuales muestran que varias de ellas tienen las mismas firmas de falla logrando sólo aislabilidad entre rotor y estator.

La generación de los residuos se puede hacer fácilmente a partir de las ARR's, lo cual demuestra que el análisis estructural es una herramienta muy útil para el diagnóstico de fallas.

Referencias

1. M. Blanke and M. Kinnaert and J. Lunze and M. Staroswiecki: *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*, Springer, Berlin (2003).
2. Claudio Bonivento and Alberto Isidori and Lorenzo Marconi and Andrea Paoli: Implicit fault-tolerant control, application to induction motors, *Automatica*, (40), pp. 355-371, (2004).
3. V. Devanneaux and H. Kabbaj and B. Dagues and J. Faucher: A versatile model of squirrel cage induction machines for design, monitoring and diagnosis purposes, *European Power Electronics and Drives*, pp. 1-11, (2001).
4. Krause P.C., Wasynczuk O., and Sudhoff S.D., *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*: IEEE Press & Wiley Interscience 2nd Edition, (2002).
5. Dalgerti Lelis-Milanez and Alexander Eigeles-Emanuel: The instantaneous-space-phasor a powerful diagnosis tool, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 52(1), pp. 143-147, (2003).
6. J. Milimonfared and H. Meshgin and S. Nandi and A. Der Minassians and H. Toliyat: A novel approach for broken-rotor-bar detection in cage induction motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, (34), pp. 1000-1006, (1999).
7. S. Nandi and H. Toliyat and X. Li: Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motor. A review, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, (20), pp. 719-729, (2005).
8. Gautam Poddar and V. T. Ranganathan, Senior Member, IEEE: Sensorless Field-Oriented Control for Double-Inverter-Fed Wound-Rotor Induction Motor Drive: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(5), pp. 1089-1096, (2004).
9. Linda Rattfalt: A comparative study of two structural methods for fault isolability analysis, Master's Thesis: Department of Electrical Engineering at Linköping University, Germany, (2004).
10. José Silva and A. J. Marques-Cardoso: Bearing failures diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach, *31st Annual Conference of IEEE*, 6(10), pp. 2591-2595, (2005).
11. TECO-Westinghouse: Wound Rotor, TECO-Westinghouse, <http://www.tecowestinghouse.com/PDF/woundrotor.pdf>, (2008).
12. C. J. Verucchi and G. G. Acosta: Técnicas de detección y diagnóstico de fallos en máquinas eléctricas de inducción, *IEEE Latin American Transactions*, 5(1), pp. 41-49, (2007).