

Cálculo del par electromagnético de un motor de inducción con asimetrías rotóricas mediante modelos de elemento finitos

C. Rojas¹, M. Melero¹, J. Cano¹, M. Cabanas¹, G. Orcajo¹, F. Pedrayes¹

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica
E.P.S de Ingeniería de Gijón
Campus de Viesques, 33204 Gijón (España)
Tel.:+34 985182450, fax:+34 985182453, e-mail: jmcano@uniovi.es

1. Introducción

El siguiente artículo tiene como objeto el cálculo de la evolución de la variable de par electromagnético del motor de inducción en condiciones normales de funcionamiento y con distintas topologías de asimetrías rotóricas. El estudio se focaliza exclusivamente en el análisis de la influencia que ejerce este tipo de fallo sobre el par producido por la máquina. Para tal fin, se han desarrollado diversos modelos de elementos finitos en dos dimensiones, correspondientes a la máquina en ausencia de averías y con barras rotas localizadas en diferentes posiciones del conjunto de la jaula. Los resultados obtenidos se analizan tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia. Este trabajo se engloba dentro de una línea de investigación que trata sobre desarrollo de nuevos métodos y criterios de diagnóstico de fallos en equipamiento eléctrico.

Palabras llave: Máquina asíncrona, asimetría rotórica, método de elementos finitos.

2. Desarrollo del modelo

A Modelo de elementos finitos

Se ha desarrollado un modelo de elementos finitos de la sección transversal completa (360°) de un motor de inducción de 380V y 11kW de potencia nominal.

El modelo es alimentado en tensión, mediante la inclusión de una ecuación adicional que conecta la fuente de tensión con una impedancia serie. Con dicha impedancia, se logra incluir el efecto de las cabezas de bobinas. La barra rota se modela asignando una conductividad nula a la porción de la malla que tiende sobre la geometría de la barra. La exactitud del modelo desarrollado ha sido suficientemente contrastada [1]. En el siguiente cuadro se resumen las características principales del modelo desarrollado:

Tabla 1. Datos del modelo

Alimentación	Fuente trifásica de tensión definida como circuito externo
Conexión devanados	Estrella
Simetría	360°
Material magnético	No lineal (con saturación)
Elementos de mallado	Triangulares
Número de elementos	19.938
Número de nodos	10.150
Criterio de adaptación para el mallado	5% entre dos mallados progresivos consecutivos
Condiciones de contorno	Homogénea de Dirichlet (A = 0)
Efectos tridimensionales	Emulación de cabezas de bobina mediante circuitos externos

B. Cálculo de par electromagnético

La estimación del par electromagnético de la máquina se desarrolla aplicando el método de las fuerzas de Maxwell en la región del entrehierro [2]:

$$F = \int_S \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_t^2) \cdot ds \vec{n} + \int_S \frac{1}{\mu_0} B_n B_t ds \cdot \vec{t} \quad (1)$$

donde, B_n , B_t , t y n son las densidades de campo y vectores unitarios en las direcciones normal y tangencial y S es la superficie formada por los puntos considerados. Los modelos desarrollados son bidimensionales, por lo que la superficie de integración se transforma en una línea cerrada, quedando la fuerza de Maxwell expresada como una densidad de fuerza lineal (N/m). Únicamente, la componente tangencial de la fuerza de Maxwell genera

par útil. Dicha fuerza, en cada punto del camino circular viene dada por:

$$F_t = \frac{l}{\mu_0} B_n B_t \quad (2)$$

Las componentes de la densidad de campo se obtienen a partir del Potencial Vector Magnético, resultado de la simulación:

$$\nabla \times \vec{A} = \mathbf{B} \quad (3)$$

El par electromagnético total es la sumatoria del producto del radio por la fuerza en todos los puntos, extendido a la longitud axial del núcleo magnético:

$$T = r \cdot d \left(\sum \frac{1}{\mu_0} B_n B_t \right) l \quad (4)$$

Donde r es el radio del camino de integración, d la longitud del camino y l la longitud axial del núcleo magnético.

3. Simulación

En la siguiente tabla se recogen los casos simulados

Tabla 2. Casos simulados

Caso 1	Máquina sin averías
Caso 2	Máquina con 3 barras rotas consecutivas
Caso 3	Máquina con 3 barras rotas en posición opuesta

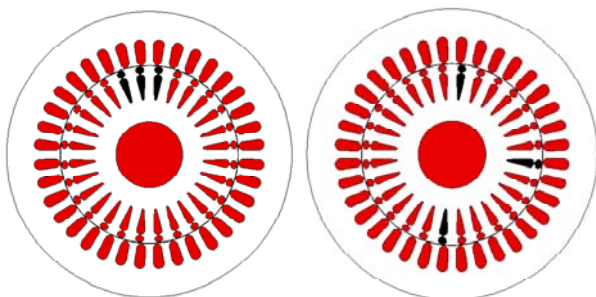


Fig. 1. Casos dos y tres. El color negro indica la ubicación de las barras rotas

En la siguiente figura se representa la onda de par electromagnético de la máquina sin averías:

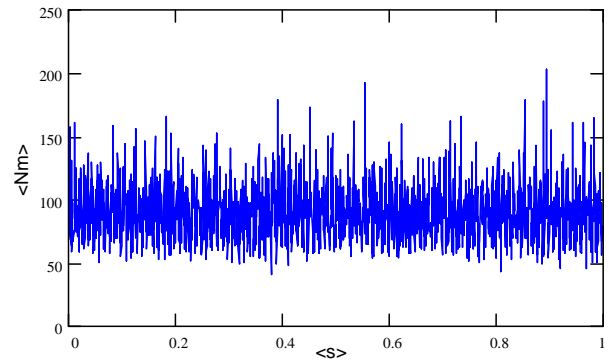


Fig. 2. Par electromagnético de la máquina sin averías. Valores simulados

El par estimado mediante las simulaciones presenta un alto contenido de armónicos de orden elevado, debido fundamentalmente al hecho de que los modelos desarrollados, dada su naturaleza bidimensional, no consideran el efecto de la inclinación de las ranuras. Dicha inclinación, reduce sensiblemente el rizado de las ondas de par además de producir una disminución de su valor medio. Adicionalmente, debe considerarse un error marginal de cálculo por la imposibilidad de hacer coincidir en cada grado de giro del rotor, los nudos situados sobre la banda de elementos fija y la banda móvil en la porción de la malla que reproduce el entrehierro de la máquina. La ubicación de cualquier nudo de una de las bandas en los lados de un elemento hace necesaria la interpolación de los valores del potencial vector magnético \vec{A} , en las coordenadas de coincidencia.

Las siguientes figuras representan el par electromagnético de la máquina con tres barras rotas consecutivas, y con tres barras rotas enfrentadas.

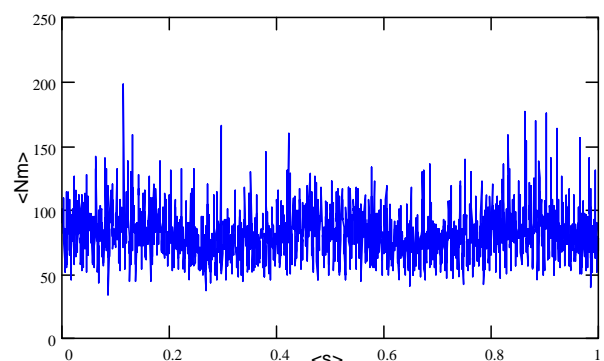


Fig. 3. Par electromagnético de la máquina con tres barras rotas consecutivas (caso 2). Valores simulados

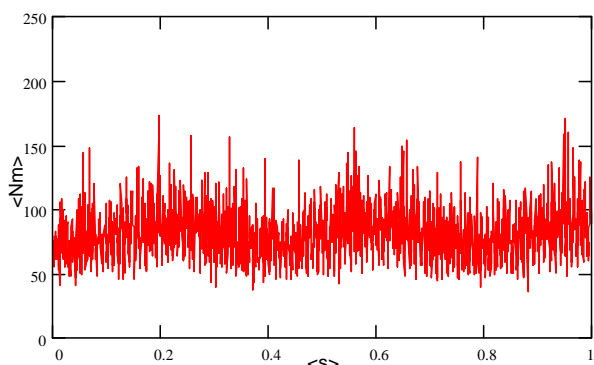


Fig.4. Par electromagnético de la máquina con tres barras rotas distribuidas (caso 3). Valores simulados

En la tabla siguiente se computa el factor de rizado y el par medio producido por la máquina en las distintas condiciones de fallo.

Tabla 3 Cálculos a partir de la onda de par

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Par medio <N-m>	90,22	80,77	80,31
Factor de rizado	1,87%	3,04%	5,01%

Para el cálculo del factor de rizado se ha utilizado la expresión:

$$Kr = \frac{V_{rms}}{V_0} \times 100 \quad (4)$$

Donde V_{rms} es el valor eficaz de la onda de par y V_0 su componente de continua.

De la tabla y gráficas obtenidas se constata:

- 1) Un claro incremento del rizado (y por tanto de la fluctuación de par), como consecuencia de la introducción del fallo. Este incremento es sensiblemente mayor en el caso de la rotura de tres barras espaciadas en la jaula, que cuando el fallo se produce en barras consecutivas. El incremento del rizado respecto al caso de la máquina sin averías es de 62,56% si el fallo es por rotura de tres barras consecutivas y de un 167,91% si las barras rompen de forma espaciada.
- 2) La pérdida de par electromagnético como consecuencia del fallo, si se toma como referencia una misma velocidad de giro, si se toma como referencia una misma velocidad de giro. La pérdida se sitúa en torno a los 10N-m (-11%), no detectándose diferencias significativas entre las dos tipos de asimetrías (barras rotas de forma consecutivas y barras rotas espaciadas).

4. Espectros de frecuencia

Partiendo de los datos de simulación, se han elaborado los espectros de frecuencia de las ondas de par electromagnético de los tres casos estudiados. En la

siguiente tabla se resumen las características principales de las muestras:

Tabla 4 Datos fundamentales de los espectros de frecuencias

Tiempo de registro	1 seg.
Periodo de muestreo	0.5 ms.
Número de muestras	2000
Rango de frecuencias	0~1000 Hz.
Resolución	1 Hz.

En la tabla anterior, *El tiempo de registro* (T), corresponde al intervalo de tiempo en el que se simuló la operación de la máquina, *El período de muestreo* (t_r), es el tiempo transcurrido entre la toma de dos puntos consecutivos, *número de muestras* (N), es la cantidad de datos registrada en el período de muestreo, el *rango de frecuencia* fija la banda de frecuencias que es posible reproducir a partir de la muestra de datos y la *Resolución* (R), indica la mínima separación entre dos líneas de frecuencia del espectro.

La siguiente figura corresponde a los espectros de frecuencia de la máquina sin averías y con asimetría por rotura de tres barras consecutivas. En esta, se aprecia la amplificación de la componente de frecuencia de $2sf$, producto de la avería. En la expresión, s es el deslizamiento y f la frecuencia de red.

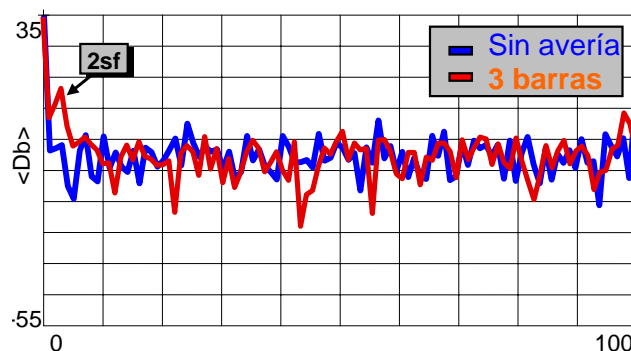


Fig. 5. Espectro de frecuencia en los casos de la máquina sin averías y con asimetría por rotura de 3 barras. Datos obtenidos mediante simulación.

El espectro muestra claramente un incremento de la componente de $2sf$, que es el parámetro utilizado para la detección de la avería en base al análisis de la onda de par. Además, se detecta una sensibilidad superior de esta componente (mayor amplificación de la línea de frecuencia), que la registrada en la de frecuencia de $(1+2s)f$, comúnmente utilizada para el diagnóstico mediante el análisis espectral de las corrientes de alimentación.

En la siguiente figura se representa, medido en decibelios, los valores de amplitud de la componente del espectro de frecuencia $2sf$, para todos los casos contemplados en el estudio.

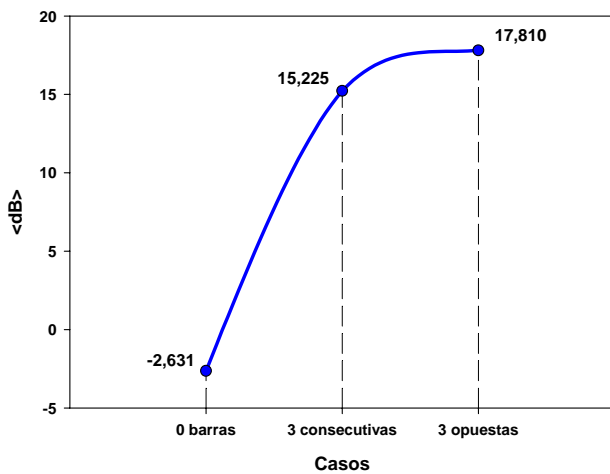


Fig. 5. Amplitudes de las componentes de frecuencia de $2sf$ para los tres casos estudiados

4. Conclusiones

Se han desarrollado diversas simulaciones del motor con asimetrías rotóricas y analizado la evolución del par electromagnético de la máquina en condición de fallo. Los resultados obtenidos reflejan un incremento del rizado de la onda y una pérdida de par útil como consecuencia de la rotura de las barras. Este efecto es más acusado si la rotura no se produce en barras consecutivas. Tal característica puede inducir a diagnósticos erróneos sobre la severidad del fallo. Además, se observó que la variable de par es más sensible a los efectos de las roturas de las barras que la propia corriente de alimentación. Esto se deduce del análisis de amplitudes de los espectros de frecuencia

El análisis desarrollado contempló exclusivamente las variaciones en el par debido a la asimetría.

Referencias

- [1] C. Rojas et Al. "New data about the current distribution in the rotor of squirrel-cage asynchronous motors after a bar breaking". IEEE Sdemped'01. Gorizia Italy – September 2001
- [2] Salon, S. "Finite Element Analysis of Electrical Machines". Edt. Krhuwer A. Publisher. Boston 1995
- [3] J. Bangura, "Diagnosis and Characterization of effects of broken bars and connectors in squirrel-cage induction motors by time-stepping coupled finite element-state space modeling approach". IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No.4, December 1999
- [4] Carlos H. Rojas, Manuel. G. Melero, Manés. F. Cabanas, Gonzalo A. Orcajo, José M. Cano, Manuel P. Donsión. Evaluación experimental de los nuevos métodos de detección de asimetrías rotóricas en motores asíncronos de jaula de ardilla. VII Jornadas Hispano Lusas de Ingeniería Eléctrica. Madrid, July 01.
- [5] C. H. Rojas, M. G. Melero, M. F. Cabanas, G. A. Orcajo, J. R. Cano. Analysis by the FEM of the squirrel cage IM with broken rotor bar: influence caused in current spectrum by the variable speed. 8º Congresso Luso-Espanhol de Engenharia Electrotécnica, Vilamoura, Portugal, Julio 03