

Diagnóstico de un motor de imanes permanentes por medio del MEF

Diagnostic of a permanent magnet motor by means of FEM

Juan Gabriel Osorio-Cucalón*
 Sindy Lorena Ramírez-Perdomo**
Universidad del Valle (Colombia)

* Ingeniero Electricista, Universidad del Valle. Estudiante de Maestría en ingeniería Eléctrica de la Universidad del Valle. jg.osorio@hotmail.com.

** Ingeniera Electricista, Universidad del Valle. M.Sc en Ingeniería Eléctrica, Universidad del valle. Estudiante de Doctorado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica, integrante del Grupo de Investigación en Alta Tensión. sindy.lorena.ramirez@correounivalle.edu.co.

Correspondencia: Sindy Lorena Ramírez Perdomo, Universidad del Valle, Calle 13 No. 100-00, edificio 356, teléfono 057 (2) 3334252, Cali - Colombia.

Resumen

Este artículo presenta el diagnóstico para una falla de apertura de fase en el estator de un Motor Síncrono de Imanes Permanentes (MSIP) usando el Método de los Elementos Finitos (MEF) en 2D. El análisis se basó en el comportamiento de las respuestas de las variables del motor en estado estable bajo operación normal de la máquina, así como de su comportamiento en estado transitorio y post-falla. Este análisis se hace con el objetivo de categorizar el tipo de falla según el contenido de armónicos en las corrientes de las fases de la máquina síncrona. Se utilizaron cinco métodos de diagnóstico conocidos en la literatura para determinar el tipo de falla con solo observar el contenido de armónicos en las corrientes del estator. Los métodos de diagnóstico utilizados fueron: 1). Transformada rápida de Fourier, 2). Lugar geométrico del Vector de Park, 3). Densidad espectral de energía, 4). Clasificación múltiple de señal y 5). Método de la Impedancia de Secuencia Inversa. Los resultados encontrados fueron coherentes para la misma falla.

Palabras clave: armónicos, diagnóstico de fallas, falla de fase abierta, Métodos de los Elementos Finitos (MEF), motor de imanes permanentes.

Abstract

This paper presents a fault diagnosis for opening phase in the stator of a synchronous permanent magnet motor (MSIP) using the finite element method (FEM) in 2D. The analysis was based on the behavior of the responses of the motor variables in steady state under normal operation of the machine, as well as their behavior in transitional and post-failure state. This analysis is done with the aim of categorizing the type of fault according to the content of harmonics in the currents of the stator. Five diagnostic methods known in the literature were used to determine the type of fault just observing the content of harmonics in the stator currents. The diagnostic methods used were: 1-Fast Fourier Transform, 2-Geometric place of the Park Vector, 3-spectral density of energy, 4- Multiple Signal Classification and 5-Method of the Impedance of Reverse Sequence. The results found were consistent for the same fault.

Keywords: Harmonics, Fault diagnosis, open-phase fault, Finite Element Methods (FEM), permanent magnet motor.

Fecha de recepción: 27 de octubre de 2014
Fecha de aceptación: 01 de diciembre de 2015

INTRODUCCIÓN

Las máquinas síncronas de imanes permanente son máquinas cuyas ventajas en comparación con las máquinas síncronas convencionales son notables en cuanto a densidad de potencia mecánica, eficiencia, fácil control y tamaño. La máquina síncrona de imanes permanentes en general está excitada por una fuente trifásica en su estator y por imanes de alto rendimiento que hacen las veces de excitación DC en el rotor [1], [2].

Debido a que las condiciones de operación en falla representan para la máquina una reducción en su vida útil, se hace necesaria la utilización de herramientas computacionales que simulen el comportamiento de la máquina con un grado de precisión y exactitud aceptables. Es por esta razón que se cuenta con metodologías de evaluación virtuales como el MEF, técnica no invasiva en la cual se puede analizar el comportamiento de la máquina en escenarios que en la realidad la llevarían a la destrucción y que aumentarían los costos de investigación para el diagnóstico de fallas [3], [4]. Los sistemas de diagnóstico de fallas se utilizan como una herramienta para el mantenimiento y la protección contra fallas de sistemas de alto costo [5].

Para este trabajo se realizó el análisis y estudio de falla sobre la calidad de alimentación en donde se evaluó, para la máquina bajo estudio, un desbalance extremo de las señales de tensión del estator (apertura de una de fases). Se utilizó como método de diagnóstico el análisis espectral de las corrientes del estator - MCSA - (Motor Current Signature Analysis), para el análisis de los resultados, determinando cuáles componentes armónicas de las corrientes del estator son las que preponderan durante la operación de la MSIP en falla [6].

En los resultados se encontró una particular aparición del tercer armónico para los cinco métodos de diagnóstico en las señales eléctricas, cuando se presentó una alimentación asimétrica de tensión a las diferentes velocidades a las que fue sometido el modelo de la MSIP en elementos finitos. Los resultados muestran que la metodología utilizada valida el diagnóstico de fallas para máquinas de imanes permanentes.

MARCO TEÓRICO

Máquinas síncronas de imanes permanentes

- Teoría y clasificación

La clasificación de las MSIP esta bifurcada de acuerdo con dos criterios; el primero es la disposición física de los imanes permanentes en el rotor de máquina, y el segundo es la orientación del flujo magnético de excitación con respecto a la alineación del eje de su rotor (Figura 1) [7].

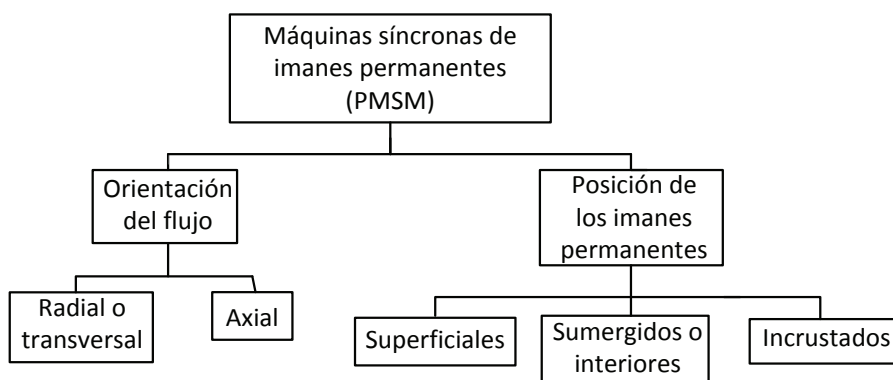


Figura 1. Clasificación de las MSIP.

En el mantenimiento predictivo de máquinas eléctricas, la detección de fallas se orienta a seis zonas de posible falla. Estas seis zonas están clasificadas en: Calidad de alimentación, Condición del circuito de potencia, Aislamiento, Estator, Rotor, Entrehierro.

La zona de Calidad de alimentación se refiere a las características en las cuales se encuentran las señales de excitación en el estator de la máquina en cuanto a calidad de energía se trata. Una distorsión armónica (THD) excesiva en las variables eléctricas de la máquina, puede causar recalentamiento en el sistema de aislamiento, generación de pérdidas eléctricas y disminución de la eficiencia [8], [9]causing different machine copper loss and core losses. An accurate model of the current total harmonic distortion (THD).

Los métodos de diagnóstico actuales pretenden determinar exactamente el tipo de falla por medio de la aplicación de tecnologías modernas y principios fisicomatemáticos con el objetivo de dar un estado de falla preciso de la máquina. Los métodos actualmente utilizados son [10]: Monitoreo de campo electromagnético, Medida de la temperatura, Análisis por medio de infrarrojo, Monitoreo de las emisiones de radio frecuencia, Monitoreo del ruido y vibraciones producidas por las máquinas eléctricas, Análisis químico, Mediciones de ruido acústico, Análisis de las señales de corriente producidas por el motor (Motor Current Signature Analysis - MCSA), Modelos basados en inteligencia artificial y las aplicaciones de redes neuronales [11].

La técnica de análisis de las corrientes del estator (MCSA), consiste en que cualquier agente que afecte el campo magnético en el entrehierro del motor se verá reflejado en componentes de frecuencia característica en el espectro de las corrientes del estator, con lo cual se establece que cualquier falla en el motor, ya sea corto entre espiras, desequilibrios en la pista de rodamientos y entre otras más, causarán cambios en la densidad de flujo magnético a través del entrehierro que se manifestará en últimas en las corrientes inducidas en el devanado de la máquina [6], [12].

METODOLOGÍA

Desarrollo del modelo MEF

Como se ha mencionado anteriormente, las MSIP son máquinas de imanes permanentes cuya forma de onda de Fem es sinusoidal, por lo tanto, poseen semejanza constructiva con las máquinas síncronas convencionales [13]. La máquina objeto de estudio se muestra en la Figura 2, en la cual se modela la sección transversal de la máquina de IP con el objeto de estudiar las variables en estado estable y bajo condición de falla de fase abierta.

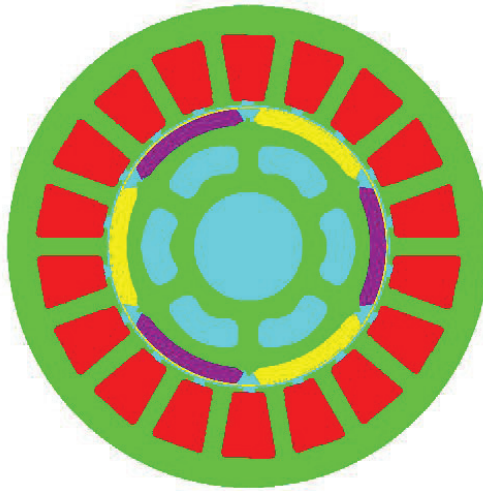


Figura 2. Modelo 2D en MEF de la máquina bajo estudio.

La característica magnética del material del núcleo tanto del estator como del rotor, se presenta en la Figura 3.

La característica que determina el comportamiento de los imanes permanentes se modeló en Flux 2D® a partir de una característica lineal la cual está compuesta del valor de densidad de flujo remanente $B_r = 1.19 \text{ T}$ y el valor de la permeabilidad magnética relativa $\mu_r = 1.015 \text{ H/m}$, con características físicas establecidas para imanes permanentes del prototipo Vacodym®.

La representación del material de los conductores eléctricos del bobinado del inducido se parametriza por medio del circuito eléctrico acoplado al modelo geométrico de la MSIP, tal como se ve en la Figura 4. En esta, se establece el valor de la resistencia que tendrán por defecto los conductores de las tres fases del devanado del estator. En cuanto a la permeabilidad magnética que éstos tendrán frente a los fenómenos magnéticos presentados en la operación de la máquina, se establecerá como nula en las propiedades físicas del material.

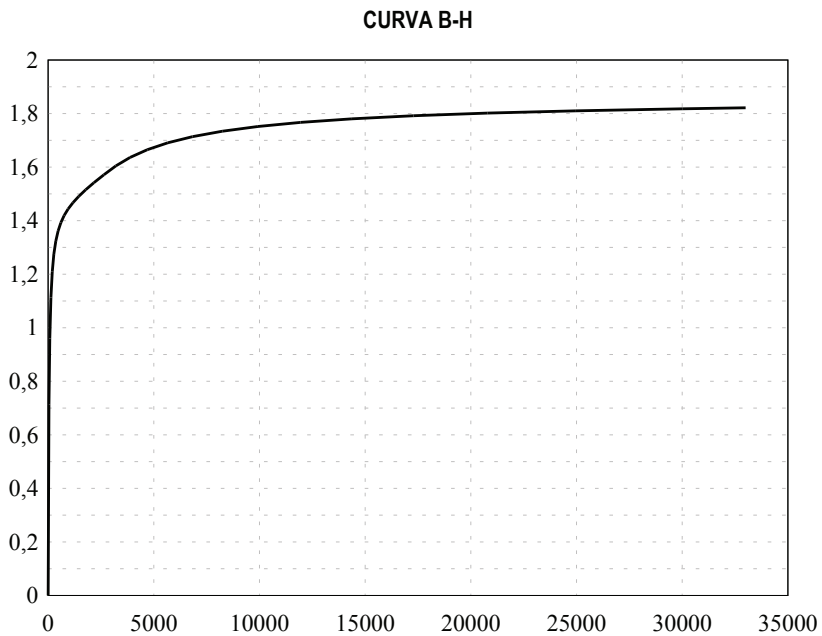


Figura 3. Curva características del material magnético del rotor y estator.

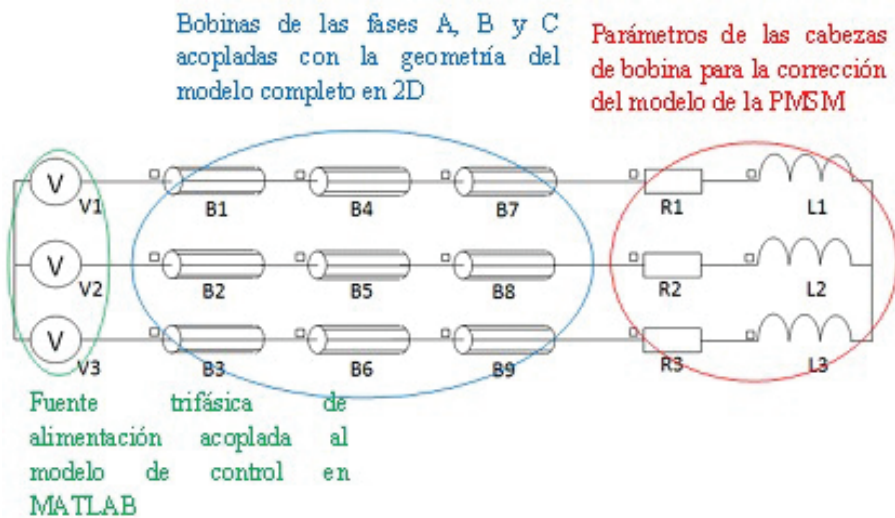


Figura 4. Circuito eléctrico de acople al modelo geométrico de la PMSM.

Con el empleo de todos los datos, parámetros y características constructivas de la PMSM objeto de estudio, se procedió a la elaboración del modelo en 2D para el análisis del comportamiento de la máquina tanto en estado sin falla como en estado de falla.

La máquina de IP bajo estudio está acompañada de un sistema de control el cual está basado en el control del vector espacial por ancho de pulso (SVPWM) o control vectorial. Este hace las correcciones y ajustes necesarios de las variables eléctricas como corrientes de fase (I_a , I_b , I_c), y variables mecánicas como velocidad ω y/o posición θ , para realizar el control de la máquina de tal forma que esta no reaccione de manera brusca ante las cambios inesperados en las condiciones de funcionamiento, condición de falla o cambios programados en su operación normal establecida. El sistema de control real se implementó virtualmente en MATLAB tal como lo muestra la Figura 5.

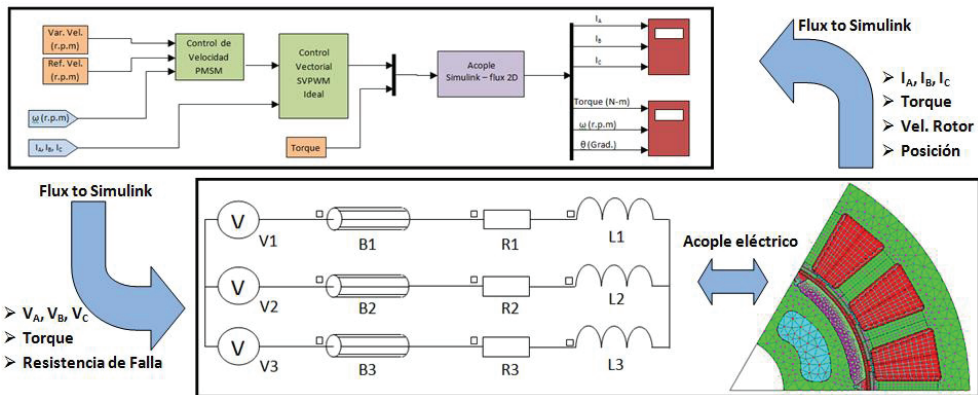


Figura 5. Sexta parte del dominio bajo estudio de la PMSM.

Por otro lado, teniendo en cuenta que el número de ranuras del estator es múltiplo del número de pares de polos del rotor, se realizó una simplificación de "condición periódica" en el dominio de análisis, la cual consiste en evaluar el modelo de la máquina en 2D considerando solo la sexta parte del dominio que para este caso fue posible simplificar de esta manera gracias también a que las dos condiciones de análisis de la máquina que se realizan en este trabajo, estado estable y falla de apertura de fase, se facilitan para la reducción máxima del modelo. Esta simplificación trae la ventaja de reducir

el tiempo de cómputo en un valor considerable, además de aumentar la precisión de los resultados del modelo [14].

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Comportamiento de las variables de la MSIP

Las simulaciones se realizaron con la MSIP en condiciones mecánicas iniciales estáticas ($v = 0$, $\theta = 0$), con el fin de representar las condiciones reales de la máquina, además de observar el comportamiento del sistema de control que regula la operación de la máquina desde que arranca hasta que establece los valores de velocidad. El sistema de control se implementó en MATLAB, considerando la acción del control real dispuesto para la máquina de IP en el laboratorio. Se llevaron a cabo múltiples simulaciones en el modelo propuesto de la MSIP en el MEF, el cual se diseñó para la realización de estudios tanto estáticos y dinámicos como transitorios. El modelo máquina-control se sometió a varias velocidades de funcionamiento. Se observa que al momento del arranque las corrientes de la máquina llegan a alcanzar hasta 4 veces su valor nominal, lo cual indica una respuesta satisfactoria en los fenómenos del modelo implementado para la MSIP bajo ensayo, ya que teóricamente las corrientes de arranque de la máquina sincrónica están entre 5 y 10 veces su corriente nominal.

En la Figura 6 se nota el incremento de las corrientes de las fases que aún se encuentran excitando al motor después de falla, además de la presencia de armónicos que distorsionan la forma de onda de la señal de corriente, aumentando de igual manera la energía que circula por los bobinados en funcionamiento. En la condición de operación de fase abierta no hay contribución al par motor de la fase dañada, por lo que las fases sanas han de incrementar su aporte de potencia para poder mantener el par exigido por la carga [15]. Esto se consigue a cambio de aceptar algunas perturbaciones en el par de la máquina.

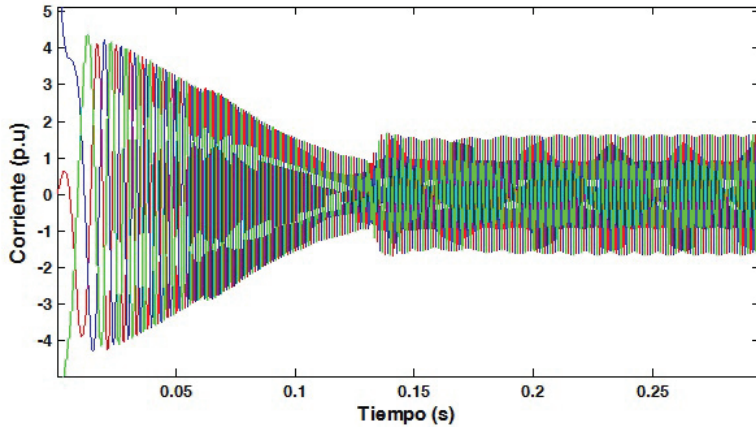


Figura 6. Corrientes de la PMSM en estado estacionario a 6.000 rpm.

La Figura 7 muestra las corrientes de las fases A, B y C obtenidas en laboratorio contra las obtenidas virtualmente. En estas se puede observar que la falla recae sobre la fase A, quedando las otras dos fases como únicas aportantes de todo el par necesario para mover la carga en el eje del motor.

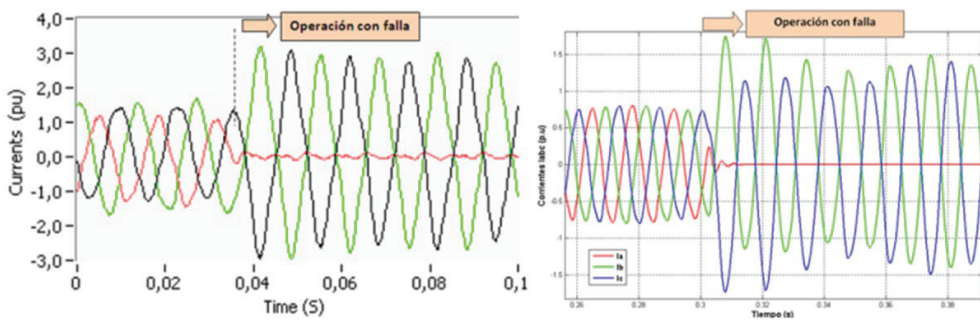


Figura 7. Corriente de la PMSM en estado de falla en prueba de laboratorio y bajo simulación a 1.500 rpm.

La Figura 8 muestra la respuesta de velocidad de la MSIP. La oscilación pulsante de la velocidad en estado estable durante falla es debida a la naturaleza pulsante que presenta la onda en el entrehierro de la máquina durante la apertura de la fase.

En la Figura 9 se puede observar que la densidad de flujo se conserva aún después de la ocurrencia de la falla. De ahí el incremento de las dos corrientes (I_B , I_C) que fluyen en el devanado de la máquina con el fin de conservar el flujo en el entrehierro. Este comportamiento se presenta en las cinco velocidades de ensayo.

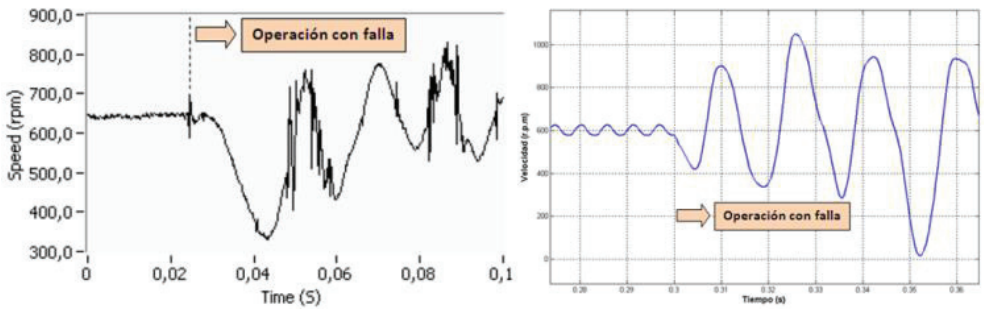


Figura 8. Respuesta de velocidad de la PMSM en laboratorio y simulación a 600 rpm.

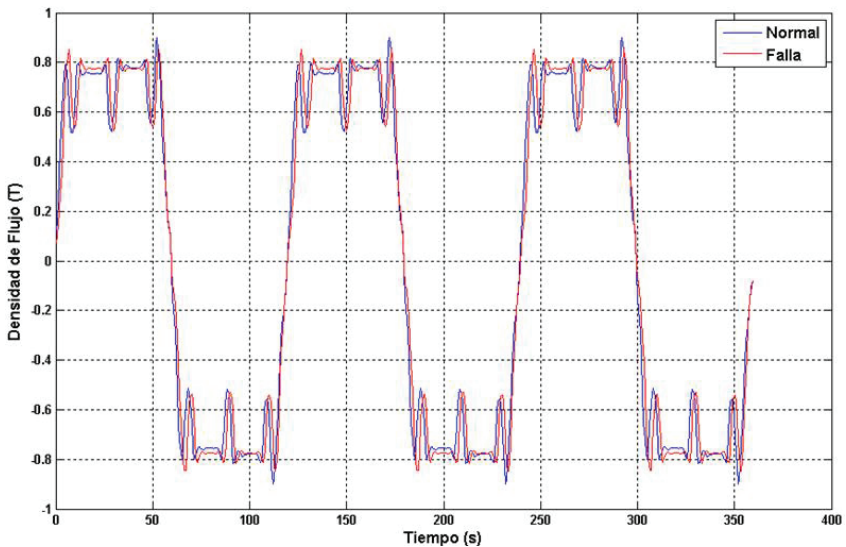


Figura 9. Densidad de flujo magnético en el entrehierro antes y después de falla a 4.500 rpm.

Diagnóstico de la MSIP

La máquina objeto de estudio se sometió a falla de fase abierta (en la fase A) de su bobinado estatórico. Aquí se presentan los resultados obtenidos en el modelo MEF en falla, los cuales son comparados con los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio realizadas en el MCIA de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Los resultados de las señales obtenidas en el modelo MEF realizado en Flux®, se trataron por medio del programa computacional MATLAB® para obtener el comportamiento de las variables del modelo de la MSIP durante el tiempo de análisis establecido para la falla.

La falla de fase abierta se introdujo en la máquina durante su funcionamiento en estado estable, luego del establecimiento de las variables al transitorio de arranque. Aquí la máquina ya se encontraba con su torque nominal y funcionando en estado estable.

- Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transformation - FFT):

En los espectros de corriente para cada velocidad se puede observar el prominente pico del tercer armónico producido por la falla de fase abierta (Figura 10). La variación del tercer armónico es propia de las fallas relacionadas con el desbalance de las fases del sistema trifásico que alimenta la máquina y éste en particular, es un desbalance extremo de la fuente de alimentación trifásica. El tercer armónico para fallas de desbalances de tensión aumenta conforme el desbalance se haga más fuerte. Para este caso, el tercer armónico presenta la intensidad más grande que pueda tener en fallas de desbalance de tensión de una sola fase.

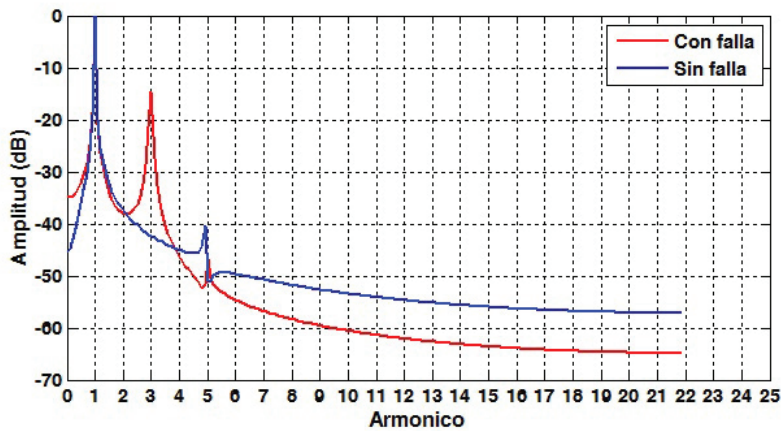


Figura 10. Espectro de frecuencia de corriente a 4.500 rpm.

- Lugar geométrico del Vector de Park (Park's Vector Approach - PVA).

Al momento de ocurrir la falla y durante ella, se presenta el comportamiento de las corrientes en el plano por medio de una recta de pendiente negativa, la cual representa la condición de falla de fase abierta en este método de diagnóstico. Tanto para los ensayos MEF como para los realizados en laboratorio la pendiente se mantiene constante a las distintas velocidades de prueba (Figura 11), la Figura 12 presenta los resultados simulados para el PVA.

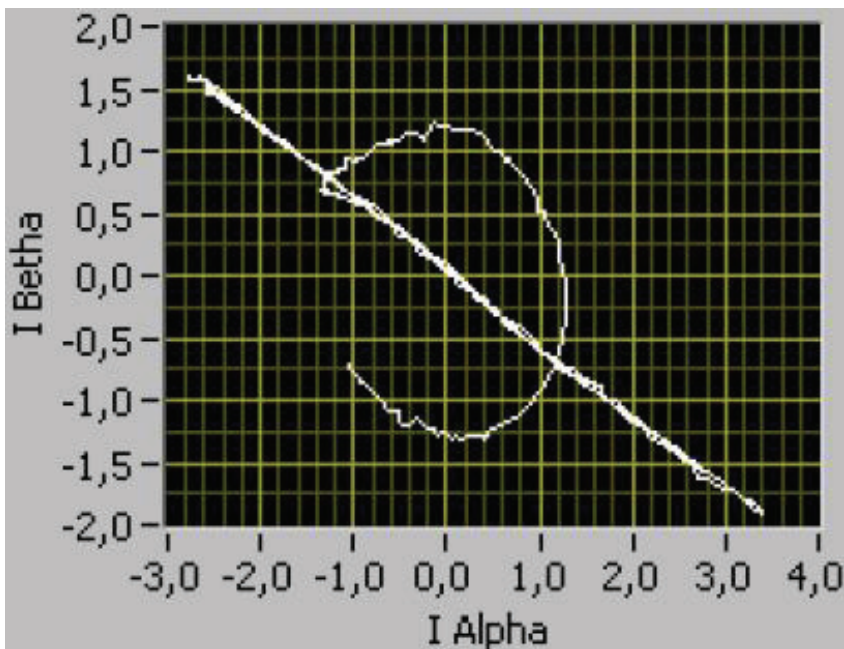


Figura 11. I_{Alpha} vs I_{Beta} 600 rpm en laboratorio.

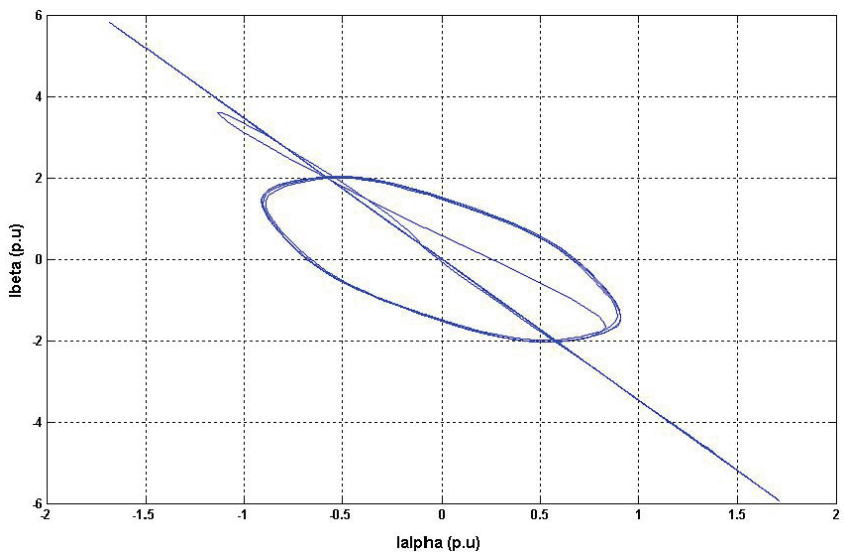


Figura 12. I_{Alpha} vs I_{Beta} 600 rpm simulado.

- Densidad espectral de energía (Power Spectral Density – PSD).

Este tipo de análisis es una derivación del método de la FFT en donde se presenta la intensidad de energía aportada por cada armónico que compone la señal. La ventaja de este método es que filtra las señales de ruido al cuantificar la variación de la magnitud con respecto a la frecuencia (Figura 13).

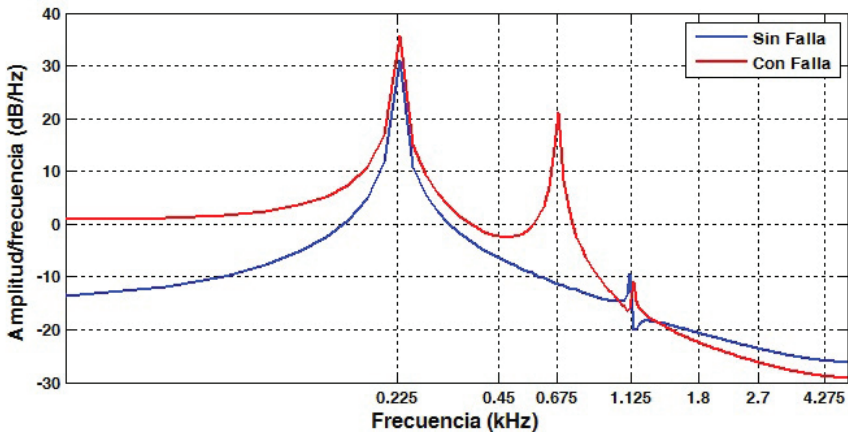


Figura 13. PSD a 4.500 rpm.

- Clasificación Múltiple de Señal (Multiple Signal Classification - MUSIC).

En este método se eliminan las frecuencias que perturba la señal y que además reducen el patrón armónico de fallo en el análisis frecuencial [7]. Al igual que el PSD, este método solo obtiene las frecuencias principales contenidas en la señal de análisis dando mayor resolución en la puesta de resultados.

La aplicación del MUSIC en la señal de corriente bajo análisis presenta una mejor resolución en el dominio frecuencial de la señal, permitiendo verificar la frecuencia de fallo a diferentes velocidades, la cual se centra en el tercer armónico (Figura 14).

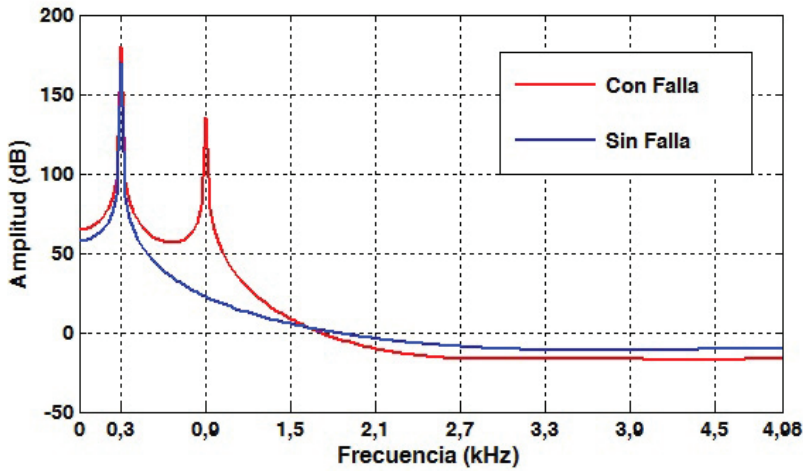


Figura 14. MUSIC a 6.000 rpm.

- Método de la Impedancia de Secuencia Inversa

Durante la operación sin falla, la máquina presenta valores de secuencia inversa tanto en corriente como en voltaje casi nulos (valores por el orden de magnitud de 10^{-4}). Al momento de la ocurrencia de la falla y durante esta, se incrementan los valores de secuencia inversa de ambas variables (se incrementa el orden de magnitud a 10^{-2}), dando alerta de que existe un desbalance en el sistema trifásico de la máquina.

En la Figura 15 se observa que el comportamiento de la impedancia con respecto a la velocidad se incrementa a medida que la velocidad del rotor es mayor, excepto para la velocidad de 600 rpm, debido a la estabilidad del control de la máquina lo cual aumenta los valores de corriente de secuencia inversa establecidos en esta.

Para este método se concluye que la impedancia de secuencia inversa en falla de apertura de fase, disminuye en valor en comparación con la impedancia de secuencia inversa sin falla.

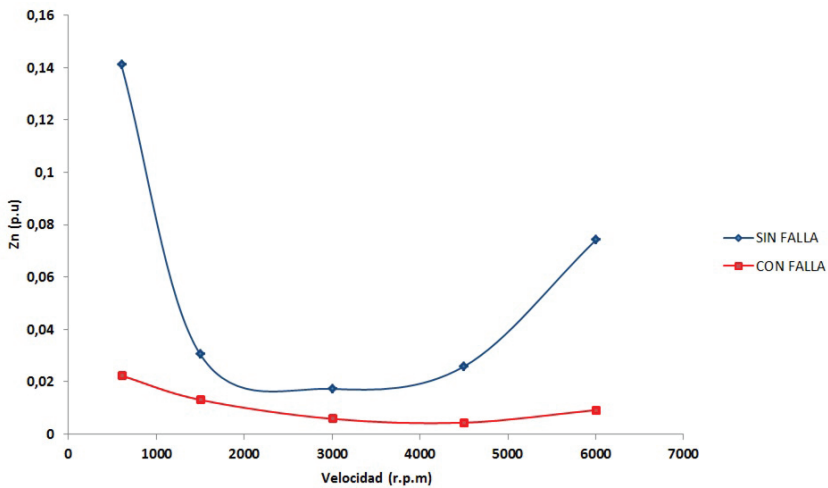


Figura 15. Impedancias de secuencia inversa para la falla a las velocidades de ensayo.

Éste método de diagnóstico es estudiado particularmente en motores de inducción que presentan falla de cortocircuito entre espiras. Los resultados obtenidos del método para la falla de apertura de fase no son completamente determinativos, debido a que en otras condiciones de falla aparecen corrientes de secuencia inversa, lo cual hace que este método deba de estar acompañado de otra técnica de diagnóstico para incrementar la validez de la determinación de la falla.

CONCLUSIONES

El modelo del sistema máquina-control implementado mediante la interface Flux to Simulink®, con el cual se evaluó el sistema motor real, presentó características de funcionamiento aceptables para la determinación del cambio de las variables de la máquina antes y durante falla de fase abierta, además de lograr un diagnóstico válido de la máquina para esta condición de falla.

El comportamiento de las variables de la máquina en estado estable sin falla con respecto a la velocidad sirve para validar el modelo y poder así dar veracidad y seguridad al diagnóstico de falla que se realizó en el MEF.

El flujo en el entrehierro durante la falla no se ve afectado por el hecho de que las corrientes de las dos fases que excitan el motor compensan el aporte

electromagnético que realizaba la fase en falla por medio del aumento en sus magnitudes. El aumento de las dos magnitudes de corriente va acompañado de aumentos en el armónico de tercer orden, el cual deforman la onda de las fases que entregan energía al motor después de la falla.

El MCSA puede detectar diferentes tipos de fallas, las cuales pueden estar dentro del dominio de la máquina a analizar o por fuera del mismo. Esto debido a que cualquier tipo de falla producida en la máquina se presentará en el flujo del entrehierro y por ende se verá reflejado en las corrientes del estator de la máquina.

Existen varias técnicas de análisis de corrientes en el estator para el diagnóstico de fallas, pero las dos más acertadas para la detección de las fallas por desbalance de tensión y apertura de fase son el método del Vector de Park y la Transformada Rápida de Fourier con sus diferentes derivaciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al grupo de investigación “MCIA-Motion Control and Industrial Applications Group” de la Universidad Politécnica de Cataluña España por los datos suministrados para el desarrollo de esta investigación. En memoria de la Dra. Martha Cecilia Amaya, profesora de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle.

REFERENCIAS

- [1] S. Huang, Z. Wang, A. Wang, L. Zhao, y S. Wang, “Study on doubly-fed hybrid poles permanent magnet synchronous machine,” in *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 2010, pp. 990-995.
- [2] B. Vaseghi, N. Takorabet, y F. Meibody-Tabar, “Fault Analysis and Parameter Identification of Permanent-Magnet Motors by the Finite-Element Method,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 9, pp. 3290-3295, Sep. 2009.
- [3] J. F. Gieras, E. Santini, y M. Wing, “Calculation of synchronous reactances of small permanent-magnet alternating-current motors: comparison of analytical approach and finite element method with measurements,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 34, no. 5, pp. 3712-3720, 1998.
- [4] R. Vartanian y H. A. Toliyat, “Design and comparison of an optimized permanent magnet-assisted synchronous reluctance motor (PMA-SynRM) with

- an induction motor with identical NEMA Frame stators," in *2009 IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 2009, pp. 107–112.
- [5] J. Faiz, B. M. Ebrahimi, B. Akin, y H. A. Toliyat, "Finite-Element Transient Analysis of Induction Motors Under Mixed Eccentricity Fault," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 1, pp. 66–74, Jan. 2008.
 - [6] H. Caballero y J. Huertas, "Diagnóstico de Motores Eléctricos Mediante Análisis Espectral de Corrientes," Merida, Venezuela, 1999.
 - [7] O. Almonacid, "Evaluación de Fallos de un Motor Síncrono de Imanes Permanentes Mediante el M.E.F," Universidad del Valle, 2008.
 - [8] M. Castelli y M. Andrade, "Metodología de monitoreo, detección y diagnóstico de fallos en motores asíncronos de inducción," in *URUMAN 2007*, 2007, pp. 65–76.
 - [9] L. Jin, "Current total harmonic distortion calculation of interior permanent magnet synchronous traction motors for HEV/BEV applications," in *2013 1st IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, 2013, pp. 268–271.
 - [10] J. A. Rosero, J. . Cusido, A. G. . Espinosa, J. A. . Ortega, y L. Romeral, "Broken Bearings Fault Detection for a Permanent Magnet Synchronous Motor under non-constant working conditions by means of a Joint Time Frequency Analysis," in *Industrial Electronics, 2007. ISIE 2007. IEEE International Symposium on*, 2007, p. 3415,3419.
 - [11] E. C. C. Lau, y H. W. Ngan, "Detection of Motor Bearing Outer Raceway Defect by Wavelet Packet Transformed Motor Current Signature Analysis," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 10, pp. 2683–2690, Oct. 2010.
 - [12] S. Oviedo, J. Quiroga, y C. Borrás, "Motor current signature analysis and negative sequence current based stator winding short fault detection in an induction motor," *DYNA*, vol. 78, no. 170, pp. 214–220, 2011.
 - [13] J. A. Rosero, L. Romeral, J. Cusido, A. Garcia, y J. A. Ortega, "On the short-circuiting Fault Detection in a PMSM by means of Stator Current Transformations," in *Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE*, 2007, p. 1936,1941.
 - [14] N. Bianchi, "Electrical Machine Analysis Using Finite Elements," in *Power Electronics and Applications Series*, Power Elec., Taylor Group, and Francis, 2005, pp. 61–63.
 - [15] A. Cabello, J. Restrepo, V. Guzmán, M. Giménez, y J. Lara, "Modelo dinámico de la máquina de reluctancia conmutada aplicado a simulaciones en procesadores digitales de señales," *Universidad, Cienc. y Tecnol.*, vol. 10, no. 37, pp. 29–34, 2006.