

Recibido 13 Septiembre 2019. Aceptado 29 Noviembre 2019. Publicado 20 Diciembre 2019.

ISSN 2448-7775

Detección de fallas en máquinas eléctricas por medio del flujo magnético disperso

Dr. Adrián González Parada^{1,*}, Dr. Rubén Jaramillo Vacío², Eduardo González Salazar¹

¹ Depto. de Ingeniería Eléctrica, DICIS Universidad de Guanajuato

² Depto. de Sistemas de Distribución, LAPEM - CFE

gonzaleza@ugto.mx (*Autor de correspondencia)

ruben.jaramillo@cfe.gob.mx

eduardo.g.s_95@hotmail.com

RESUMEN En la industria en general el empleo de las máquinas eléctricas rotativas es de vital importancia; ya que muchas de las veces una sola máquina es el componente clave del sistema. Por tal motivo el tenerlas en condiciones óptimas de operación o el hecho de anticiparse a una posible falla puede ser muy importante, evitando así paros inesperados del sistema debido al fallo de la máquina. En este trabajo se presenta la caracterización y detección anticipada de falla de una máquina eléctrica rotativa, por medio del flujo magnético de dispersión presente en la máquina; detectando fallas en los devanados y el rotor, así como su interpretación a una posible solución de detección anticipada del inicio de la falla, analizando en el dominio de la frecuencia el flujo magnético de dispersión. Se desarrollaron los sensores y se realizó la detección en un banco de simulación de fallas en motores eléctricos.

PALABRAS CLAVE— Mantenimiento predictivo, Motores eléctricos, detección de fallas, sensores de campo, flujo magnético de dispersión.

I. INTRODUCCIÓN

En la industria el desarrollo de sistemas de mantenimiento predictivo, ha cobrado una gran relevancia, esto debido principalmente a que el objetivo es desarrollar sistemas que permitan evitar los paros de producción por fallas en los sistemas eléctricos y mecánicos; por lo que el desarrollo de sistemas de monitoreo en tiempo real y con alarmas de advertencia de una posible falla o el inicio de la misma, viene a ser una prioridad en la operación de los sistemas de mantenimiento predictivo y preventivo.

En el caso del mantenimiento predictivo o mantenimiento basado en la condición, se evalúa el estado del sistema y en base a su condición se pueden tomar acciones de intervención para evitar el paro, lo que representa un ahorro significativo en los costos de operación y mantenimiento en la industria.

El motor de inducción es la máquina eléctrica más utilizada en la actualidad, es utilizada en el 70% de las aplicaciones industriales y estos consumen más del 50% de la energía generada en las naciones industrializadas. Una falla imprevista en un motor de inducción puede llevar a un paro no planeado en una línea de producción lo cual se puede convertir en pérdidas de hasta miles de dólares por minuto. Es por eso por

lo que es crucial monitorear el estado del motor de manera continua y detectar la falla de una manera anticipada [1-4].

Una detección temprana prolonga el periodo de la vida útil del motor, reduce el costo en partes de repuesto y asegura la programación de un mantenimiento predictivo en lugar de un mantenimiento correctivo. Por otro lado, de acuerdo con las estadísticas de falla un motor o máquina eléctrica rotativa se presentan principalmente tres puntos principales de falla, los cuales se presentan; en el devanado del estator, en el rotor y en los rodamientos.

En la Fig. 1. se pueden observar las estadísticas de las condiciones de fallas más comunes, en porcentaje, en un motor de inducción.

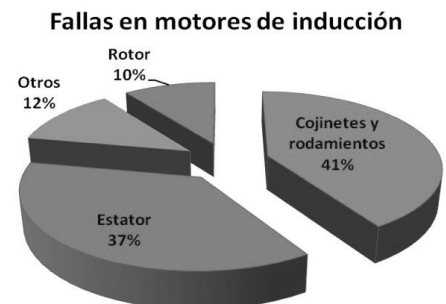


Fig. 1. Distribución de las fallas más comunes en motores de inducción [1].

Para el monitoreo del comportamiento de las máquinas eléctricas rotativas, se han desarrollado un sinnúmero de técnicas que involucran principalmente el análisis de alguna de las variables del motor, como pueden ser: la corriente que consume, el estado de las vibraciones producidas por el movimiento, el ruido producido por su funcionamiento, la temperatura que se tiene durante su operación y la detección de puntos calientes en la misma máquina; destacando en la literatura a nivel mundial, los siguientes métodos y análisis:

1. Análisis de la excentricidad del motor. Basado en el monitoreo de la corriente que consume y el análisis en frecuencia de las bandas laterales sobre la armónica principal a determinadas frecuencias, siendo la principal ventaja que no requiere conocimiento del diseño del motor [5].
2. Daño en los rodamientos del motor. Detectado a partir del análisis de las vibraciones presentes en el motor y la frecuencia a las que se presentan debido al tipo de falla en el rodamiento; pista interior, pista exterior, o bola [5].
3. Barras rotas en el rotor. Al igual que el anterior se monitorea la corriente que consume y basado en el análisis en frecuencia de esta corriente y considerando frecuencias específicas, se analizan las bandas laterales a frecuencias específicas, siendo el aumento del valor de estas bandas laterales el número de barras rotas presentes en el rotor [6], [7].
4. Análisis espectral de la corriente (MCSA), por sus siglas en inglés, en donde a partir de técnicas de análisis en función de la frecuencia, se puede determinar si existe una falla en el devanado, las barras del rotor y/o los rodamientos en función de la frecuencia a las que se presentan el tipo de falla [8-11].

II. METODOLOGÍA DE MONITOREO

En el caso de los motores de inducción, el flujo magnético generado en el estator interactúa con el rotor y produce el movimiento y el par asociado a este. Este flujo magnético circula por todo el núcleo del motor y una pequeña parte se puede dispersar sobre la periferia del núcleo. El flujo magnético generado por el estator, se ve afectado por las variaciones que se presenten debido al comportamiento del motor, en el caso de un corto circuito en el devanado, este puede verse afectado ocasionando una disminución de este o teniendo una variación en la frecuencia; en caso de tener barras rotas en el rotor la variación resultante se va a ver reflejado en el aumento de corriente demandada por el motor, ya que va a ser necesario compensar la pérdida de corriente en el rotor por la ausencia de algunas barras. En el presente trabajo se presenta el desarrollo de los sensores de detección, la metodología de monitoreo y el análisis de las señales obtenidas para correlacionarla con fallas

específicas, controladas en un banco de pruebas construido para ese fin.

A. BANCO DE PRUEBAS

Para el desarrollo de esta investigación, se diseñó y construyó un banco de pruebas con motores idénticos y fallas específicas, las cuales se pueden controlar en cuanto a su magnitud y duración.

Las características generales de los motores utilizados se muestran en la Tabla I.

En el banco de pruebas se consideraron dos tipos característicos de falla, corto circuito en los devanados y barras rotas en el rotor. Para el corto circuito en los devanados se bobinó el motor con porcentajes de vueltas en corto circuito (CC), considerando niveles de corto circuito para cada una de las fases del 10 %, 20%, 30% y 40%, del total de las espiras en el devanado; las cuales pueden ser controladas por medio de un interruptor de acuerdo con nivel de falla que se requiera en su magnitud y la fase específica.

En el caso de barras rotas (BR) del rotor, se realizaron barrenos en dos barras consecutivas, controlando la falla por medio de opresores, los cuales se pueden quitar o poner de acuerdo con el número de BR que se desean.

En la Fig. 2, se muestra el banco de pruebas en donde se observa la colocación del motor en CC con los interruptores de control de fallas para cada una de las fases y el motor de BR.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE MOTORES

Descripción	Valor
Potencia	0.75 Hp
Tensión de operación	230/430 V
Corriente	3.2/1.5 A
Velocidad	1725 rpm
Número de Polos	4
Frecuencia	60 Hz
Conexión	YY/Y



Fig. 2. Banco de pruebas de fallas de motores de inducción en corto circuito (CC) y barras rotas (BR) en el rotor.

La señal asociada al tipo de falla se obtiene por medio de un osciloscopio con dos canales aislados y sistema de adquisición de datos en tiempo real, el cual es conectado directamente a las terminales de los sensores desarrollados.

B. DESARROLLO DE SENSORES

En los motores de inducción se presenta una interacción entre el campo magnético producido por el estator con el rotor, dando lugar a la rotación y producción de par en la máquina; este campo magnético se ve afectado por cualquier variación que se presente en las condiciones de operación de la máquina eléctrica, ya sea por un corto circuito en el estator o una rotura de alguna barra en el rotor.

En la Fig. 3 se muestra la distribución del campo magnético en un motor cuando en este se presenta un corto circuito en una de las fases.

Observando que se presenta una anomalía en la distribución del campo magnético en el estator, mostrando una

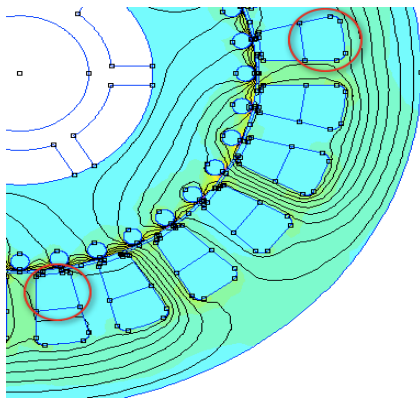


Fig. 3. Distribución del campo magnético debido a la falla por corto circuito en una de las fases de un motor de inducción.

disminución del flujo magnético marcado entre los dos círculos rojos, que es donde la falla por CC se encuentra presente; por lo que ésta se puede ver reflejada si se mide el flujo magnético que circula por la periferia del motor, esta disminución de campo se puede presentar de acuerdo con el lugar de falla y es de manera estática en la posición que se presenta, pero afectando el comportamiento completo del motor.

En el caso cuando se presenta una falla por BR en el rotor; la Fig. 4, muestra la distribución de campo magnético con dos barras rotas en el rotor.

En donde se observa que la concentración de campo magnético producida por el efecto de dos barras rotas en el rotor, afecta directamente al campo magnético en el estator, pero debido a que el rotor se encuentra girando en el interior del estator, esta distorsión se presentará de manera dinámica conforme el rotor se encuentra girando dentro del campo magnético del estator.

Considerando que se presenta un flujo magnético de dispersión en el exterior del estator, este flujo magnético se ve afectado por la interacción del rotor con el estator, en condiciones estables, este tiene una forma de onda definida y se ve modificada cuando existe una variación en el comportamiento del motor, como puede ser una falla que afecte la forma de onda original.

Este flujo magnético puede ser detectado de acuerdo con la ley de inducción de Faraday, en donde se puede detectar la variación del campo magnético por medio de una bobina por la que circula un flujo magnético en el interior de esta.

Para el desarrollo de los sensores de detección de campo se consideró una geometría de forma rectangular de tal manera que pudiera ser colocada de manera horizontal sobre el estator. En la Fig. 5 se muestra la construcción del sensor sobre una base de fibra de vidrio y resina epóxica para darle protección contra los agentes externos y rigidez mecánica.

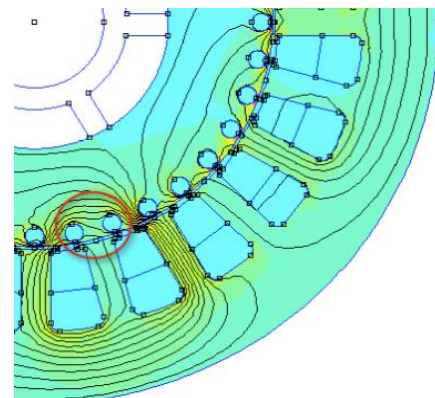


Fig. 4. Distribución del campo magnético debido a la falla por barras rotas en un motor de inducción.

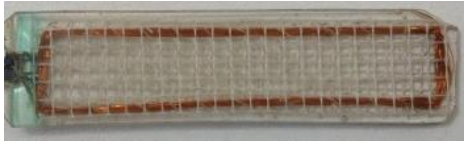


Fig. 5. Construcción del sensor para la medición del flujo magnético de dispersión sobre la superficie del estator.

En la Fig. 6 se muestra la posición de los sensores que fueron colocados a 45°, 135°, 225° y 315°, aprovechando el diseño electromagnético del motor, sobre el hueco que se presenta entre el estator y la carcasa de este.

En la Fig. 7 se observa la colocación del sensor en el motor, el cual se ubica entre el estator y la carcasa, esto con el fin de proteger el sensor de agentes externos.

III. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL MOTOR

Para verificar el comportamiento del motor se realizaron evaluaciones previas del comportamiento de los sensores en donde se desarrollaron las siguientes evaluaciones:

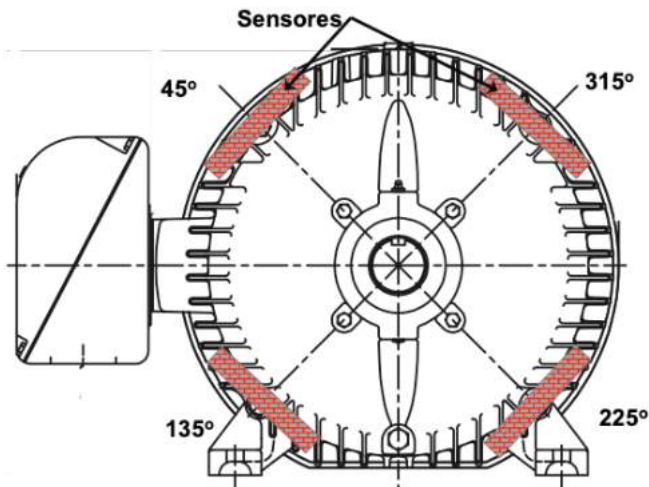


Fig. 6. Colocación de los sensores de acuerdo con el diseño electromagnético del motor.



Fig. 7. Colocación física del sensor entre el núcleo del estator y la carcasa del motor.

- Comportamiento en estado normal, sin falla.
- Comportamiento con falla en el estator.
- Comportamiento con falla en el rotor.

A. COMPORTAMIENTO EN ESTADO NORMAL

Para determinar el comportamiento en el estado normal del motor se realizaron las mediciones de las cuatro posiciones de los sensores dentro del motor, encontrándose que la caja de conexión ejerce una influencia sobre la magnitud del flujo magnético de dispersión, principalmente sobre los sensores ubicados a 45° y 135° cercanos a esta. La Fig. 8 muestra este comportamiento, donde los valores picos de ambas posiciones, se ven afectados por este comportamiento; por un lado, se ven reducidos (45°) y por otro lado se ven aumentados (135°).

Considerando lo anterior y tomando en cuenta este comportamiento, para el análisis del comportamiento en condiciones de falla únicamente se considerarán los sensores en la parte opuesta a la caja de conexiones (225°, 315°), con el fin de evitar la interferencia sobre los valores obtenidos con los sensores, del efecto de la caja de conexiones del motor.

B. COMPORTAMIENTO CON FALLA EN EL ESTATOR

El banco de pruebas está diseñado para tener fallas de CC en el estator a diferentes porcentajes, y en diferente combinación de fases del motor; para el caso de la evaluación con falla de CC en el estator se consideraron los puntos extremos de la falla, el 10% y el 40% de CC entre espiras del estator y únicamente la fase A; siendo estos los puntos representativos de la falla, los cuales para los otros puntos estos no cambiarían sino únicamente en la magnitud de la falla dependiendo de las fases que se tengan en CC y el porcentaje de esta.

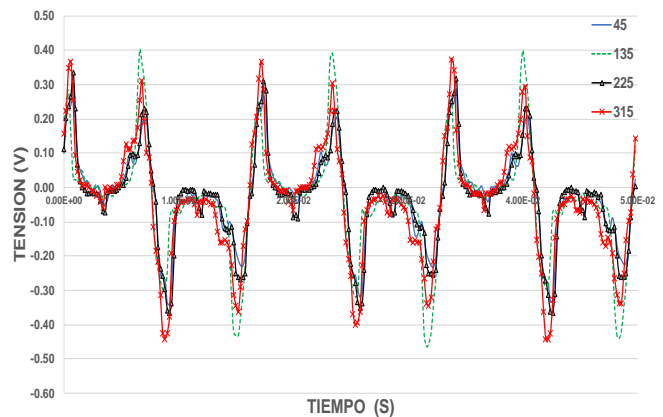


Fig. 8. Comportamiento del flujo magnético de dispersión del motor en condiciones de operación sin falla

En la Fig. 9, se observa que la magnitud de la falla por CC en la fase A; únicamente aumenta en su valor en la magnitud si comparamos el valor del 10% contra el 40% respecto al valor original y la medida obtenida con los sensores a 225° y 315°, es similar y esta se encuentra en fase, siendo únicamente la diferencia en la magnitud respecto al porcentaje de la falla.

C. COMPORTAMIENTO CON FALLA EN EL ROTOR

La falla por barras rotas del motor se consideró únicamente dos barras adyacentes, de acuerdo con la simulación de la Fig. 4, en donde se observa la distorsión del campo magnético en el estator, debido a la concentración de esta falla debido a la ausencia de barras del rotor, tal y como se mencionó anteriormente, este tipo de falla es dinámica debido a la rotación del rotor.

En la Fig. 10 se observa que la distorsión de la forma de onda cambia en los picos máximos, aumentando su valor, y cambiando también la frecuencia a la que se presenta este aumento del pico máximo de la forma de onda.

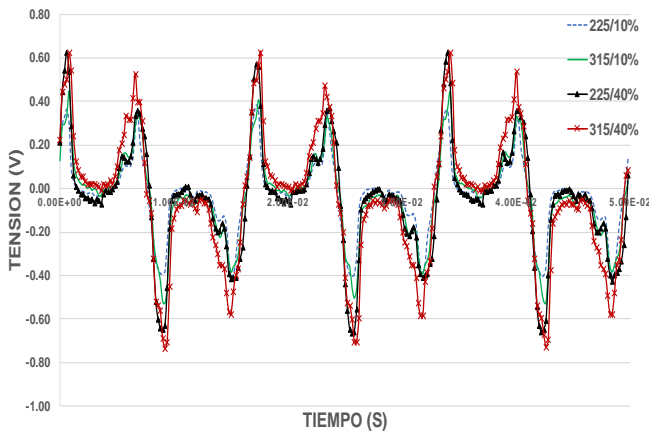


Fig. 9. Falla de CC del 10% y 40% en la fase A del motor.

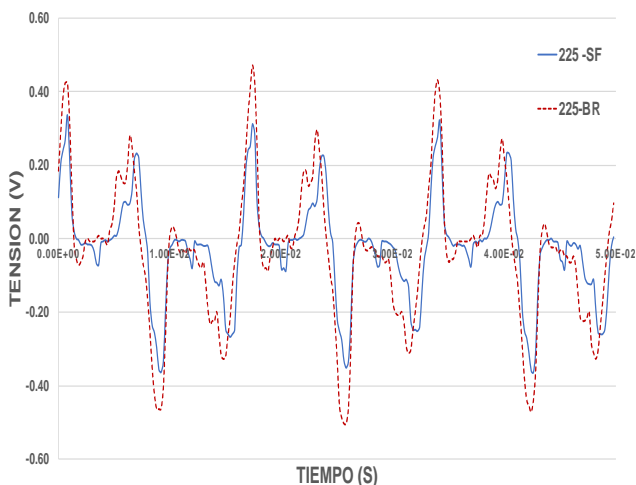


Fig. 10. Flujo magnético de dispersión en el motor sin falla (SF) y Barras Rotas (BR), en la posición de 225°.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las formas de onda obtenidas del flujo de dispersión muestran una distorsión armónica importante, lo cual es debido a que en principio es un flujo que circula a través de todo el motor y que se dispersa en dos puntos principales; el espacio en el entrehierro y el espacio fuera del núcleo del estator.

Tomando en cuenta las ondas obtenidas es necesario realizar un análisis comparativo que permita conocer las variaciones que se presentan en las formas de onda con falla y sin falla de acuerdo con el tipo que presentan; una de las formas más sencillas de hacer es por medio de realizar un análisis empleando la transformada rápida de Fourier (FFT), que nos permite descomponer señales periódicas en sus componentes armónicas principales. Con base en esta descomposición se hará el análisis del comportamiento del motor comparándola con la señal original sin falla

A. ANÁLISIS DE FALLA EN EL DEVANADO DEL ESTATOR

La Fig. 11 muestra el comportamiento de la FFT del flujo magnético de dispersión sin falla (SF) y comparándolo con el 10% de CC y el 40% de CC en el devanado. Se observa un incremento en tanto en los valores de la fundamental (60 Hz) y el resto de las componentes armónicas del 3°, 5°, 7° y existe una variación entre el resto de los armónicos del 9° al 15°. Tomado como base esto el análisis principal se puede hacer con el análisis de los tres primeros armónicos (3°, 5° y 7°) en donde la tendencia en cuanto se presenta la falla es a presentar un incremento tanto en la componente fundamental como en las componentes armónicas.

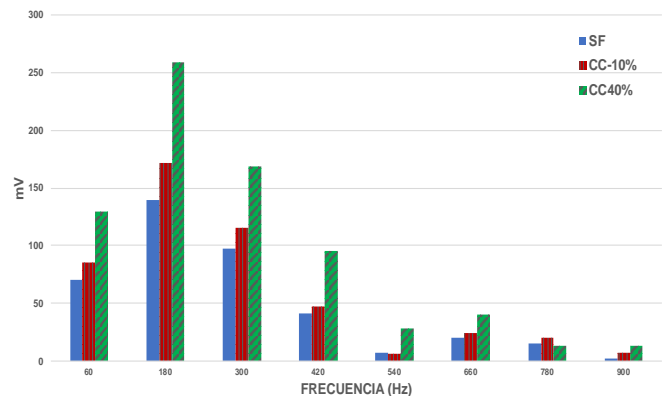


Fig. 11. Descomposición armónica del campo magnético de dispersión sin falla y con falla al 10% y 40% de CC en el devanado.

B. ANÁLISIS DE LA FALLA CON BARRAS ROTAS EN EL ROTOR

Tomando como base el mismo procedimiento de análisis, se hace la descomposición armónica por medio de la FFT de las señales sin falla (SF) y con falla de barras rotas en el rotor (BR), en la Fig. 12, se muestran los resultados de la descomposición armónica de ambas señales.

El comportamiento de la parte armónica se presenta con mayor relevancia sobre la componente fundamental y el 3° armónico, siendo no tan relevante para el resto de los armónicos, en este caso el porcentaje de incremento presenta un porcentaje mayor y de manera súbita con respecto al incremento presentado en el caso de CC, siendo del 80% para la fundamental y 40% para el 3° armónico.

V. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos muestran una clara tendencia sobre el comportamiento del contenido armónico de la señal sin falla y con falla; esta tendencia se desarrolla con base en el incremento del contenido armónico de la señal con falla, por lo que este comportamiento puede ser un indicativo clave en el análisis de fallas incipientes, ya que se muestra una tendencia que se incrementa cuando la falla se empieza a producir (pocas espiras), y va aumentando progresivamente hasta tener una falla franca.

En el caso de las fallas presentes en el devanado el incremento del contenido armónico puede ser de manera paulatina pudiendo llegar hasta un incremento del 80% -100% del contenido armónico, cuando la falla es aproximadamente el 40% de CC en el devanado. Este proceso de incremento paulatino puede ser detectado y ser un indicador del inicio de falla.

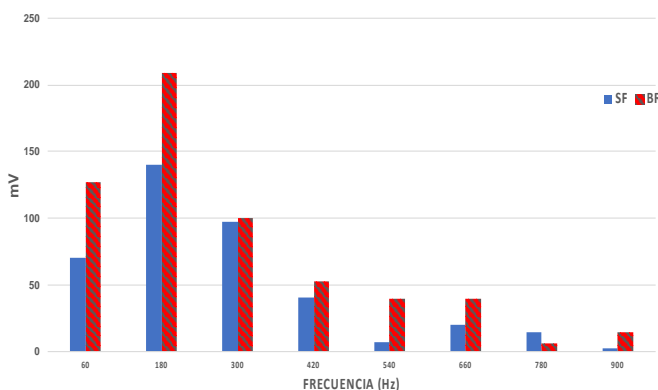


Fig. 12. Descomposición armónica del campo magnético de dispersión sin falla y con falla BR del rotor

Para el caso de barras rotas, se presenta un incremento súbito del contenido armónico de la fundamental y el 3° armónico sobre el 80%, cuando el tipo de falla es por BR, esto puede ser un indicativo sobre la tendencia e identificación del tipo de falla; adicionalmente a esto se observa en la Fig. 10, un ligero desfase sobre la forma de onda fundamental lo cual también es indicativo del tipo de falla que se presenta.

Se han sentado las bases para iniciar con el desarrollo de una nueva técnica de análisis para la detección temprana de fallas por medio de la detección del flujo magnético disperso en el núcleo de un motor de inducción.

REFERENCIAS

- [1] M El Hachemi Benbouzid, "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection", *IEEE Transactions on industrial electronics*, Vol. 47, No. 5, pag 984-993, Oct, 2000.
- [2] Ye Zhongming, Wu Bin, "A review on induction motor online fault diagnosis", *Proceedings IPEMC 2000*. Third International Power Electronics and Motion Control Conference (IEEE Cat. No.00EX435).
- [3] R.M. Tallam, S.B. Lee, G.Stone, G.B. Kliman, J. Yoo, T.G. Habetler, R.G. Harley, "A survey of methods for detection of stator related faults in induction machines", *4th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, 2003. SDEMPED 2003.
- [4] P.J. Tavner, "Review of condition monitoring of rotating electrical machines", *IET Electric Power Application*, Vol. 2, No. 4, pp 215-247, July 2008.
- [5] R.R. Schien, T.G. Habetler, F. Kamran, R.G. Bartfield, "Motor bearing damage detection using stator current monitoring", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol: 31, No. 6, pp 1274-1279, Nov/Dec 1995.
- [6] N.M. Elkasabgy, A.R. Eastham, G.E. Dawson, "Detection of broken bars in the cage rotor on an induction machine", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 28, No. 1, pp 165-171, Jan/Feb 1992.
- [7] Abbaszadeh, J. Milimonfared, M. Haji, H.A. Toliyat, "Broken bar detection in induction motor via wavelet transformation", *IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 29 Nov.-2 Dec. 2001.
- [8] J. Penman, H.G. Sedding, B.A. Lloyd, W.T. Fink, "Detection and location of interturn short circuits in the stator windings of operating motors", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 4, pp 652-658, Dec 1994.
- [9] M.E.H. Benbouzid, M. Vieira, C. Theys, "Induction motors' faults detection and localization using stator current advanced signal processing techniques", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 14, No. 1, pp 14-22, Jan 1999.
- [10] A.J. Marques Cardoso, S.M.A. Cruz, D.S.B. Fonseca, "Inter-turn stator winding fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, pp 595-598, Sep 1999.
- [11] M. Florkowski, J. Furgal, "Detection of winding faults in electrical machines using the frequency response analysis method", *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, No. 10, Agust 2004.

BIOGRAFÍAS



Adrián González Parada. Ingeniero Eléctrico por el Instituto Tecnológico de Querétaro, realizó estudios de Maestría en Ingeniería Eléctrica con especialidad en Alta Tensión en la F.I.M.E.E. de la Universidad de Guanajuato, Doctorado por la Universidad Politécnica de Cataluña en Barcelona, España becado por el CONACYT, en diseño y construcción de

motores superconductores de flujo axial de alta temperatura. Actualmente es el responsable del laboratorio de Superconductividad Aplicada y Máquinas Eléctricas Especiales. Sus áreas de investigación son la superconductividad aplicada en equipos eléctricos y el uso eficiente de la energía en los sistemas eléctricos.



Rubén Jaramillo Vacio. Recibió el grado de Ingeniero Electromecánico en ITESI (2002), Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (2005), Maestría en Ingeniería Administrativa y Calidad en la Universidad La Salle (2010). Doctor en Ciencias por el CIATEC (Centro de Investigación de CONACYT) en 2015. Posdoctorado en Cómputo Aplicado por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez en 2016. Actualmente es ingeniero de pruebas en CFE-LAPEM, signatario ante EMA, experto técnico en redes subterráneas, transformadores de distribución y equipo de desconexión. Es autor de más de 100 artículos de investigación, incluyendo

1 libro científico y 6 capítulos de libro, artículos indexados y estrictamente arbitrados. Sus áreas de interés son la evaluación y diagnóstico de redes subterráneas, minería de datos, inteligencia artificial y teoría de aprendizaje competitivo.



Eduardo González Salazar. Estudiante de Ingeniería Eléctrica en la DICIS-UG, con inclinación a los fenómenos de fallas eléctricas, modelos de rompimiento e instrumentación para pruebas de equipos. Docente de medio tiempo en Cetis no. 149 campus valle de Santiago (2015). Ganador del programa para impulso internacional de talentos (PIIT) con sede en Montreal Canadá. De EDUCAFIN. (Nov. 2018). Participación en el panel “Mejores Prácticas en Comercialización de Tecnología” Guanajuato, Gto. (Oct. 2017).Curso de capacitación en sistemas fotovoltaicos, DICIS UG, Salamanca, Gto. (Sep. 2018).