

EFFECTO DEL INVERSOR PWM EN LOS RODAMIENTOS DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

EFFECT OF PWM INVERTER ON INDUCTION MOTOR BEARINGS

Antonio Zamarrón Ramírez

Tecnológico Nacional de México IT de León, México
zamarron@leon.tecnm.mx

Recepción: 29/octubre/2020

Aceptación: 27/noviembre/2020

Resumen

Cada vez más los motores de inducción trifásicos son accionados por inversores PWM para controlar su par, velocidad o posición. Sin embargo, no se toma en cuenta el efecto adverso que tiene el inversor sobre los rodamientos debido al dv/dt generado por la alta frecuencia de conmutación de los dispositivos de potencia. En este artículo se presenta de forma teórica y práctica el mecanismo de falla que ocasiona una disminución significativa del tiempo de vida de los rodamientos de los motores de inducción cuando es accionado por un inversor PWM. Con experimentos en el que se acciona un motor de inducción usando un inversor PWM industrial, se obtienen las señales de corriente que causan el deterioro de los rodamientos. Los resultados muestran la necesidad de implementar un mecanismo para reducir la corriente que circula por los rodamientos para evitar su deterioro prematuro.

Palabras Clave: Falla en rodamientos, inversor PWM, motor de inducción.

Abstract

Increasingly three-phase induction motors are driven by PWM inverters to control their torque, speed or position. However, the adverse effect that the inverter has on the bearings due to high dv/dt generated by the high frequency switching of the power devices is not taken into account. This article presents in theory and practice the failure mechanism that causes a significant decrease in the life time of the induction motor bearings when driven by PWM inverter. Through experiments, an induction motor is driven by an industrial PWM inverter and signals bearing currents

are collected. Results show the need to implement a mechanism to reduce the bearings current to avoid premature deterioration.

Keywords: *Bearing failure, Induction motor, PWM inverter.*

1. Introducción

La circulación de corriente a través de los rodamientos se presenta tanto en motores conectados directamente a la línea como en aquellos accionados por un inversor PWM [Erdman, 1996] [Ramachandran, 2017]. En el primer caso, la corriente en los rodamientos se debe al voltaje inducido por pequeñas asimetrías del campo magnético en el entrehierro que es inherente a la máquina. Este voltaje también puede ser inducido de forma electroestática en cualquier situación donde la acumulación de carga electroestática en el rotor se pueda dar. La mayoría de los motores son diseñados para tener un voltaje de rotor con respecto a la carcasa menor a 1 Vrms como máximo [Erdman, 1996]. El voltaje inducido en la flecha, aunque es pequeño en magnitud, puede resultar en una corriente grande que circula a través de ambos rodamientos ya que la impedancia de este camino es muy pequeña.

Cuando el motor de inducción es accionado por un inversor PWM, el voltaje de alta frecuencia de modo común o voltaje de secuencia cero, es el que induce voltajes de acoplamiento capacitivo en la flecha del rotor lo suficientemente grandes como para romper el dieléctrico del lubricante de los rodamientos, causando descargas dentro de estos conocidas como mecanizado por descargas eléctricas o EDM (por sus siglas en inglés de Electrical Discharge Machining).

En la figura 1 se muestran las corrientes de alta frecuencia inducidas en la flecha del motor debido a la conmutación de los dispositivos de potencia del inversor, esta circulación de corriente se presenta a cualquier velocidad del rotor, incluso a una velocidad cero. Una vez que el rotor está girando a determinada velocidad y las bolas de los rodamientos quedan rodeados por una pequeña película de lubricante, la capacitancia del rodamiento empieza a adquirir carga eléctrica y elevar su voltaje. Este voltaje crece cada vez más con cada conmutación del inversor hasta que rompe el dieléctrico del lubricante y se produce una descarga, esta descarga genera

una corriente por EDM que circula por el rodamiento y se fuga hacia tierra a través de la carcasa del motor. En la figura 2 se puede observar, además de las corrientes de alta frecuencia generadas por el dv/dt de cada conmutación del inversor, las corrientes por EDM y un esquema de cómo se podría estar generando la descarga eléctrica en el rodamiento.

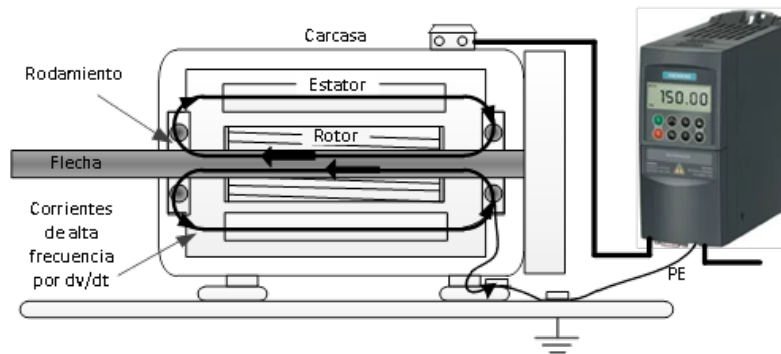


Figura 1 Corrientes de alta frecuencia que circulan a través de los rodamientos.

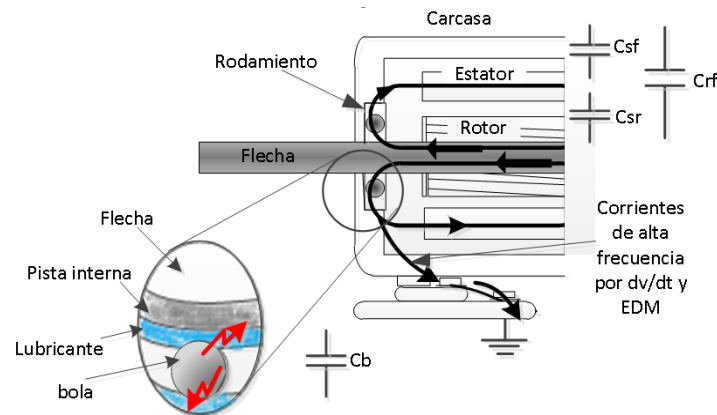


Figura 2 Corrientes de alta frecuencia por dv/dt y EDM.

Estas descargas eléctricas producen corrientes relativamente grandes en los rodamientos causando miles de diminutas picaduras en las pistas exterior e interior que con el tiempo generan un patrón de esmerilado produciendo ruido, posteriormente se forman surcos y por último se presenta la falla del rodamiento [William, 2008]. En la figura 3 se presenta el proceso de daño del rodamiento, las diminutas picaduras tienen normalmente de 5 a 10 micrones de diámetro [AEGIS, 2016].

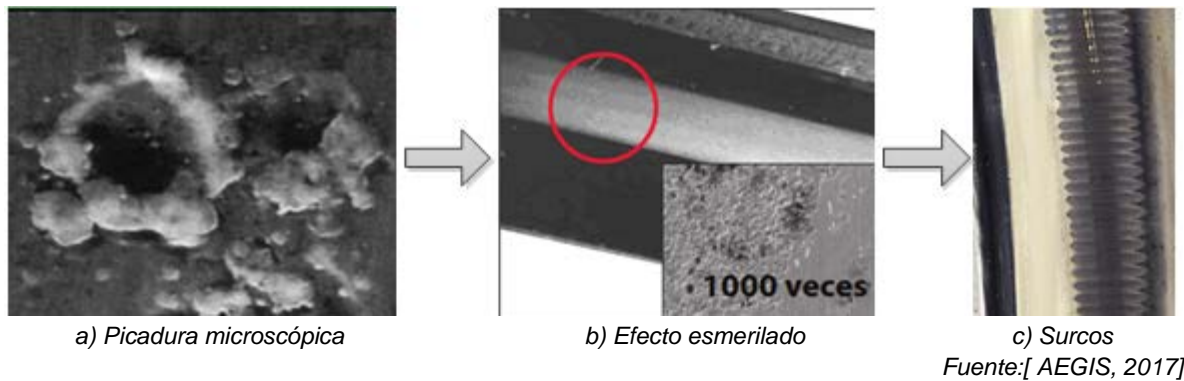


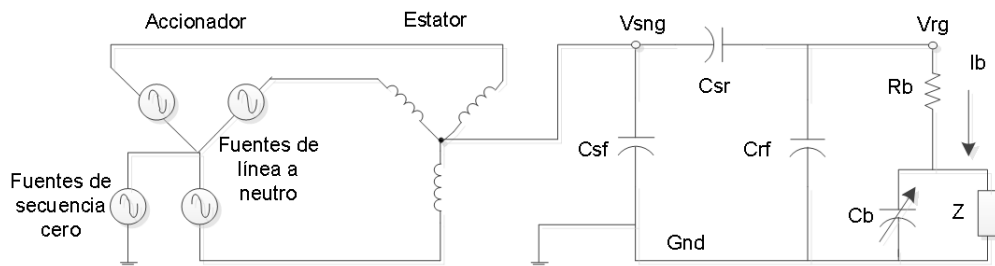
Figura 3 Desarrollo de la falla en el rodamiento.

La corriente que pasa a través de los rodamientos no afecta a éstos si el voltaje inducido en la flecha, requerido para romper el dieléctrico del lubricante en el rodamiento, es menor a un voltaje de umbral crítico V_{th} , el cual está en función del espesor del lubricante y rugosidad de la superficie de la pista. V_{th} tiene un valor entre 0.2 y 1 V_{rms} cuando el motor es conectado a una fuente sinusoidal de 60 Hz. Cuando el voltaje inducido en la flecha es ligeramente más grande que V_{th} , circulan pequeñas corrientes a través de los rodamientos y provocan un cambio químico en lubricantes de baja resistividad, reduciendo la vida del rodamiento por corrosión [Busse, 1997].

Voltajes mucho más grandes que V_{th} crean corrientes verdaderamente dañinas en lo rodamientos debido a que la pequeña película de lubricante actúa como un capacitor en lubricantes de alta resistividad, cargándose éste a niveles de voltaje de modo común. Cuando las bolas se mueven sobre la pista áspera del rodamiento, el campo eléctrico de la película de aceite se incrementa hasta la ruptura de su rigidez dieléctrica, lo anterior provoca el EDM, que crea altas temperaturas en puntos focalizados de la pista creando pequeñas cavidades [Busse, 1997].

En la figura 4 se presenta el modelo de modo común o secuencia cero del motor de inducción cuando es alimentado por un accionador con inversor PWM. El capacitor del rodamiento C_b se carga a través del capacitor de acoplamiento C_{sr} creado entre el estator y el rotor. El voltaje de rotor a tierra V_{rg} , se determina con el voltaje del neutro a tierra de la estrella del devanado del motor V_{sng} , aplicando un divisor de voltaje entre el capacitor formado entre el devanado del estator y el rotor C_{sr} y el

circuito paralelo en el que se encuentran el capacitor de rotor a carcasa C_{rf} y el capacitor del rodamiento C_b . Ya que el voltaje V_{sng} (voltaje de modo común) está modulado alrededor del eje de 0 V con picos de $\pm 1/2$ del voltaje del bus de directa, el voltaje del rotor alcanza altos voltajes de circuito abierto, antes que las bolas hagan contacto con las asperezas de la pista y causen un rompimiento de la rigidez dieléctrica de la pequeña película del lubricante. Con magnitudes grandes de V_{sng} , los inversores PWM generan corrientes EDM más grandes que las observadas con fuentes de voltaje de onda sinusoidal.



Fuente: [Busse, 1997]

Figura 4 Modelo en modo común o secuencia cero del motor de inducción.

En la figura 5 se puede observar una representación gráfica de la ubicación de las capacitancias parásitas del motor de inducción.

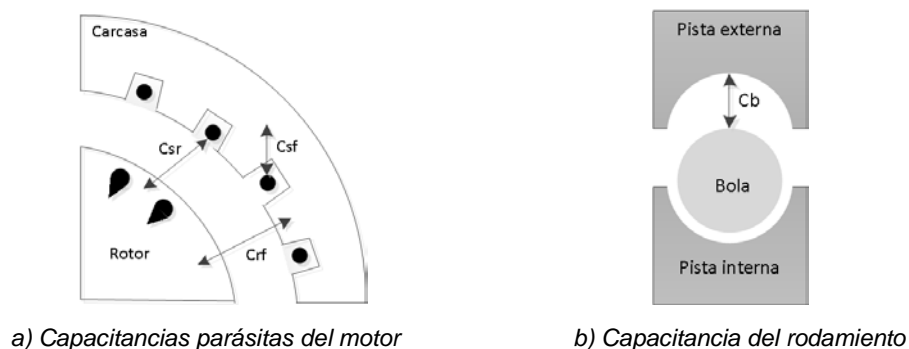


Figura 5 Descripción física del modelo capacitivo.

Cabe mencionar que al estar unidos mecánica y eléctricamente el núcleo del estator y la carcasa, se consideran como el mismo punto eléctrico. La magnitud de la corriente es sensitiva al tipo de grasa utilizada en el rodamiento, la grasa de aceite

mineral de alta resistividad actúa como capacitor con un alto valor de V_{th} , lo cual produce una corriente EDM y un arco de descarga. Corrientes de 189 mA rms (267 mA pico) causan una descomposición de la grasa convirtiéndose en óxido de litio y hierro, provocando un incremento en el desgaste y una falla prematura en el rodamiento [Murray, 1967], mientras que valores de 0.5 A rms aceleran la corrosión y el desgaste. La densidad de corriente ha sido propuesta en las máquinas con alimentación sinusoidal para predecir el tiempo de vida de un rodamiento bajo la influencia de corrientes que pasan a través de los rodamientos. Haus [Haus, 1964] determinó que una densidad de corriente de 0.7 A/mm² dan en promedio 50,000 horas de vida al rodamiento, mientras que 1.4 A/mm² acortan la vida a 500 horas. Krumpole [Krumpolc, 1990] determinó que una densidad de corriente de 0.1 A/mm² es completamente segura. Por su parte Kulda [Kulda, 1965] establece que 1.0 A/mm² es tolerable, 1.4 A/mm² como nivel de destrucción después de 500 horas y valores mayores a 2 A/mm² causan destrucción después de 5 horas. Endo [Endo, 1978] establece que 1.0 A/mm² es un valor de densidad crítico, mientras que por experiencia en el campo una densidad de corriente de 1.8 A/mm² causa fallas en 2 horas y valores menores a 0.15 A/mm² e incluso hasta 0.39 A/mm² son valores que no causan signos de surcos en pistas del rodamiento.

2. Métodos

Para obtener las señales de voltaje y corrientes de modo común, así como la corriente que pasa por los rodamientos, se implementó un banco de pruebas y se tomó en consideración el estándar [IEEE, 2017]. El banco incluye un variador de velocidad con inversor PWM de 3 HP y 220 V y dos motores de inducción de 1 HP, 220 V, en conexión doble estrella. El primer motor tiene terminales adicionales para poner en corto circuito espiras de una de las fases y el segundo ha sido modificado de tal manera que los rodamientos han quedado aislados de las tapas, y se puede medir tanto el voltaje y corriente de la flecha como el voltaje y corriente del rodamiento. La figura 6 muestra un diagrama del banco de pruebas utilizado, el voltaje de modo común V_{sng} se mide del neutro de la estrella del devanado con respecto a la tierra física y V_{rg} de la flecha al mismo punto de tierra.

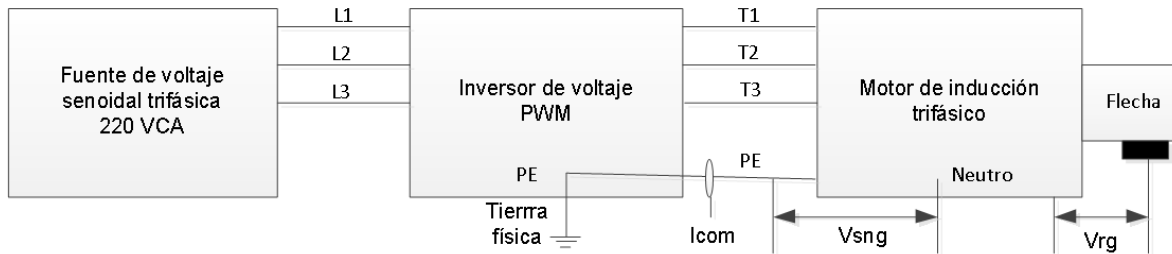


Figura 6 Esquema del banco de pruebas para medir las diferentes variables eléctricas.

La medición de V_{rg} se realiza mediante una escobilla y una malla de aluminio que ayuda a mejorar el contacto con la flecha. Mediante un sensor de efecto Hall se mide la corriente de modo común I_{com} y la corriente I_b de los rodamientos. En la figura 7 se presenta el esquema del motor modificado para medir la corriente del rodamiento y el voltaje de la flecha, mientras que en la figura 8 se muestran fotografías de la conexión del rodamiento aislado y la flecha. Para evitar el contacto eléctrico del rodamiento con la tapa del motor se colocó un aislante de Nylamid entre el anillo metálico y la tapa. Básicamente se realizaron dos tipos de experimentos, el primer tipo con la intención de mostrar que las asimetrías magnéticas inducen voltaje en la flecha del motor cuando el motor se alimenta desde una fuente sinusoidal. Y el segundo tipo de experimentos para mostrar que el dv/dt , generado por la alta frecuencia de conmutación de los dispositivos de potencia del inversor PWM, induce voltajes en el rotor a través de los capacitores parásitos, creando corrientes por dv/dt y EDM.

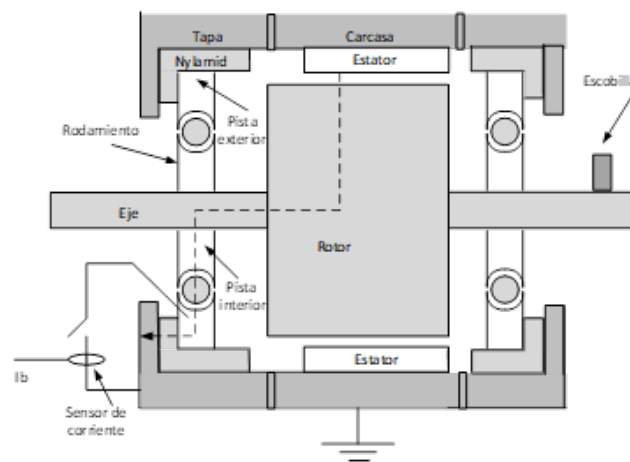
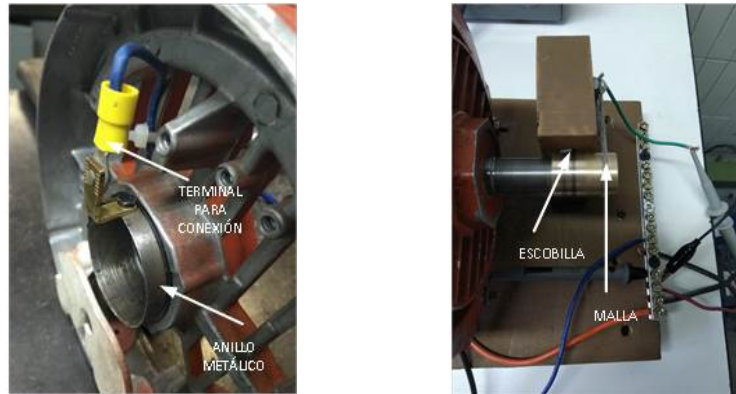


Figura 7 Esquema del motor modificado para medir las variables eléctricas.



a) Conexión en la tapa. b) Conexión en la flecha.
 Figura 8 Conexión eléctrica al rodamiento y flecha del motor.

Para el primer experimento se utiliza un motor de 1 hp, 220 V, de cuatro polos y con los rodamientos sin aislar. Este motor tiene modificado una fase del devanado del estator de tal manera que pueden conectarse una o más espiras contiguas en corto circuito para crear una asimetría magnética fija en el espacio. El resto de los experimentos se realizan con el motor que tiene aislado los rodamientos y es alimentado desde un variador de velocidad con inversor PWM.

3. Resultados

Para corroborar que la magnitud del voltaje de modo común en un motor de inducción jaula de ardilla conectado directamente a la línea, se debe a asimetrías magnéticas, se utilizó un motor con el devanado modificado de tal manera que se pueden cortocircuitar algunas espiras en una de las fases del devanado trifásico. En la tabla 1 se muestran los datos obtenidos del voltaje de modo común colocando en corto circuito de una a cinco espiras. Se observa que a medida que se cortocircuitan más espiras, el voltaje rms de modo común disminuye.

Tabla 1 Voltaje rms de modo común al variar espiras en cortocircuito.

# espiras en corto	1	2	3	4	5
Vsng (rms)	15.04	14.87	14.81	14.66	14.45

En principio, se podría pensar que el voltaje de modo común debería aumentar a medida que se incrementa el número de espiras en corto circuito, ya que, al tener

más espiras en esa situación, se tiene un campo magnético fijo en el espacio (no giratorio) que acentúa la asimetría magnética del motor. Sin embargo, en este caso específico no sucede así, ya que el voltaje de modo común es la suma de varios voltajes inducidos y dependiendo de su naturaleza se presentan a frecuencias, magnitudes y fases diferentes. Por lo anterior, el voltaje total de modo común podría aumentar o disminuir (acentuando o atenuando una asimetría magnética por excentricidad estática del rotor, por ejemplo).

En la figura 9 se presenta la evolución en el tiempo del voltaje de modo común y el voltaje en la flecha, así como su respectivo espectro de frecuencias para el mismo motor sin espiras en corto circuito. El motor es conectado directamente a la línea y sin carga. El voltaje de modo común en la figura 9a se compone básicamente de cuatro armónicos mientras que la señal de voltaje medida en la flecha de la figura 9b muestra un solo armónico predominante a 60 Hz, lo que indica que el voltaje inducido en la flecha del motor se debe principalmente al efecto de la asimetría del campo magnético giratorio fundamental. La señal de alta frecuencia muy pequeña que se observa montada sobre el voltaje de la flecha se debe al efecto del ranurado entre rotor y estator.

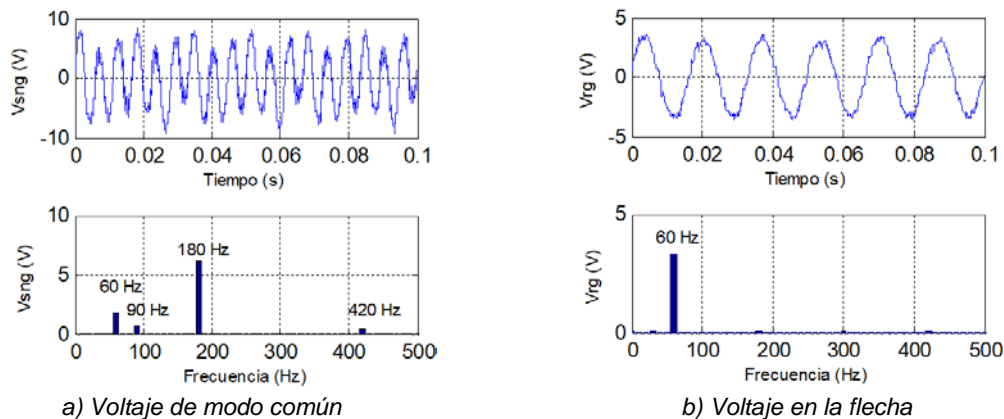


Figura 9 Señal en el tiempo y su espectro de V_{sng} y V_{rg} para un motor de 1 hp.

Para los experimentos con el inversor PWM el motor fue alimentado con el variador de velocidad Micromaster 440 de Siemens, 220 V, 60 Hz y una potencia de salida de 2.238 kW (3 HP). Por defecto, la frecuencia de conmutación de los dispositivos de potencia de este variador de frecuencia es de 15.6 kHz aunque se puede

modificar hasta 8 kHz cambiando el valor de uno de sus parámetros. En la figura 10 se presentan las señales medidas de voltaje y corriente de modo común, así como la corriente a través de los rodamientos cuando el motor es accionado a 30 Hz. Como se puede observar en la figura 10a, la señal de voltaje de modo común es de alta frecuencia, coincidiendo esta con la frecuencia de conmutación de los dispositivos de potencia del inversor. Su gran amplitud se debe al voltaje instantáneo y asimétrico entre las fases del inversor. En un pequeño recuadro se puede apreciar la forma de onda de esta señal en el tiempo, teniendo cada pulso un tiempo de subida o bajada de 6 μ s aproximadamente, resultando un dv/dt relativamente alto.

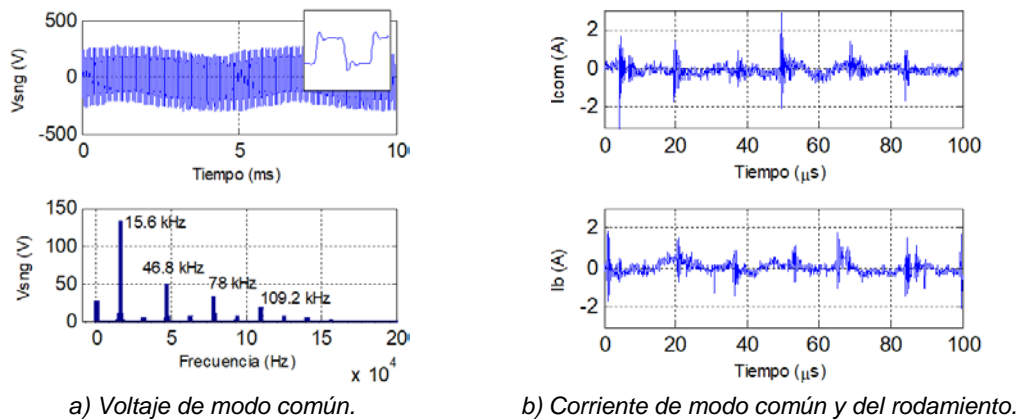


Figura 10 Voltaje de modo común y corrientes en el rodamiento.

En la figura 10b se tiene la señal en el tiempo de la corriente de modo común (corriente que se drena a tierra física) y la corriente que pasa a través del rodamiento capturados de forma independiente. Es posible observar que la señal de modo común presenta en determinados momentos pico de corriente mayores a 2 A, aunque en promedio los picos que más se repiten rondan los 1.5 A. Por otro lado, la corriente a través de los rodamientos es ligeramente menor, sin embargo, en ocasiones presenta picos de corriente cercanos a los 2 A. Estos picos de corriente repetitivos (al menos 5 picos de corriente importantes en tan solo 100 μ s) es lo que va dañando las pistas y bolas de los rodamientos, acortando su vida útil. Recordemos que los picos de corriente por EDM a través de los rodamientos se presentan cuando el voltaje en la capacitancia C_b sobre pasa el voltaje de rigidez

dieléctrica del lubricante cuando se presenta un dv/dt . En la figura 11 se tienen dos momentos en los que se rompe la rigidez dieléctrica del rodamiento, se genera un pico de corriente y el voltaje en el rodamiento cae de forma amortiguada a cero voltios.

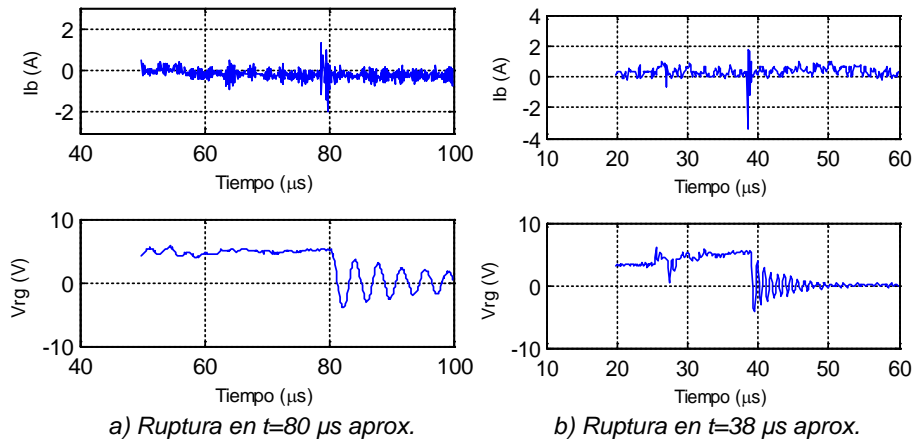


Figura 11 Señales de voltaje y corriente en el rodamiento.

4. Discusión

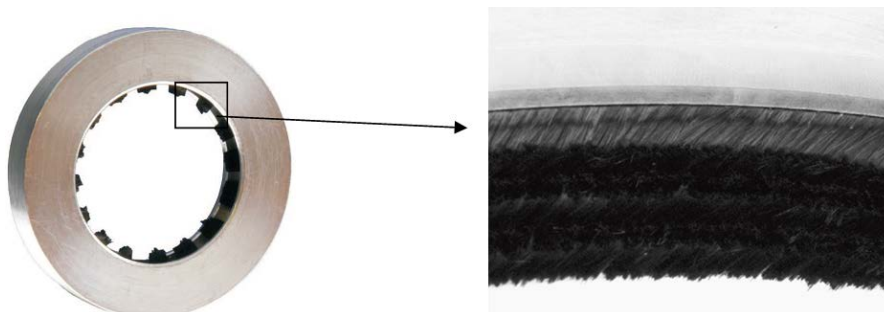
Independientemente si el motor es alimentado directamente a la línea o al inversor PWM de un variador de voltaje, se inducen voltajes en la flecha del motor y se crean corrientes en los rodamientos. Cuando el motor es conectado directamente a la línea, el voltaje inducido en la flecha se debe principalmente a las asimetrías magnéticas, las cuales pueden ser generadas por el desbalance del voltaje aplicado, desbalance estático o dinámico del rotor, efecto del ranurado rotor-estator o en su caso, fallas en el devanado como espiras en corto circuito. También se puede inducir voltaje en la flecha cuando se tiene fricción en motores con polea y banda o cuando se tiene aire ionizado producto de la fricción del aire con las aspas del ventilador que se mueven a gran velocidad. El voltaje de modo común o de secuencia cero del motor conectado directamente a la línea, no tiene un impacto significativo en el voltaje inducido en la flecha, sin embargo si contiene información importante si se quiere en determinado momento monitorear determinado tipo de fallas. Cuando el motor se conecta al inversor PWM, el voltaje ya no es sinusoidal, más bien son pulsos que conmutan a alta frecuencia entre dos niveles de voltaje de

cd. Debido a que la suma de los voltajes de fase instantáneos del PWM no es cero, en el neutro del devanado del motor aparece el voltaje de modo común a la misma frecuencia de conmutación de los dispositivos de potencia del inversor PWM y con una amplitud elevada.

Cuando el motor es alimentado con voltajes de baja frecuencia, los capacitores parásitos de la figura 4 no tienen efecto. Sin embargo, cuando el voltaje es de alta frecuencia y tiene dv/dt elevados como los del inversor PWM, estas capacitancias tienen un gran significado, en especial la capacitancias C_{sr} , C_{rf} y C_b que forman un divisor de voltaje y de allí se obtiene el voltaje de la flecha V_{rg} . Cuando el voltaje en la flecha es pequeño, el voltaje en el rodamiento no alcanza valores que puedan romper la rigidez dieléctrica del lubricante, por lo que las corrientes en el rodamiento serán de baja magnitud producidas por el dv/dt . El voltaje es pequeño principalmente cuando el contacto entre las bolas y las pistas es relativamente sólido, esto se presenta cuando el rotor gira a baja velocidad o existe una carga radial importante. Sin embargo, después de cierta velocidad se forma una capa microscópica de lubricante entre las pistas y las bolas del rodamiento modificando el valor de C_b . Si el voltaje V_{rg} carga a este capacitor y alcanza un nivel importante como para superar la rigidez dieléctrica de la fina película del lubricante se produce una descarga eléctrica que genera las corrientes de EDM.

Los experimentos realizados alimentando el motor con el inversor PWM nos muestran que el voltaje de modo común es una señal de alta frecuencia que coincide con la frecuencia de conmutación del inversor y tiene valores de dv/dt importantes. Cada conmutación de los dispositivos de potencia contribuye a formar la onda de la señal del voltaje de modo común, y es en cada conmutación donde se presenta principalmente la posibilidad de que se rompa la rigidez dieléctrica del lubricante y se generen las corrientes de EDM. La alta frecuencia de conmutación hace que los picos de corriente por EDM sean abundantes y continuos impactando severamente y de forma paulatina en las pistas del rodamiento. El resultado de los experimentos también muestra que, en cada pico de corriente importante en el rodamiento, el voltaje de la flecha cae en forma amortiguada de cierto valor a cero, debido a que el capacitor C_b libera su carga almacenada.

Ya que en cada conmutación se presenta la posibilidad de producirse una corriente de magnitud importante en los rodamientos, es lógico pensar que al disminuir la frecuencia de conmutación del inversor PWM disminuirían también la aparición de estos picos de corriente, sin embargo, no es la mejor solución para disminuir el daño en las pistas del rodamiento ya que una menor frecuencia de conmutación produce ruido audible y más armónicos en las corrientes de línea del motor. Dentro de las soluciones que se tienen para mitigar el daño en los rodamientos por corrientes de dv/dt y EDM son aquellas que evitan precisamente la circulación de corriente a través de los rodamientos. Empresas de rodamientos como SKF® han lanzado al mercado rodamientos con el anillo exterior cubiertos por una capa aislante con una rigidez dieléctrica de hasta 1000 V. También tienen otro tipo de rodamiento donde las bolas están fabricadas con nitrato de silicón, lo cual las hace complemente aislantes. La empresa AEGIS® presenta una alternativa utilizando un anillo con miles de microfibras conductoras en su circunferencia interior que funcionan como escobilla para drenar la corriente de la flecha hacia la carcasa aterrizada del motor, el aspecto de este anillo se presenta en la figura 12. El anillo se instala en la tapa frontal del motor creando un camino alternativo a la corriente producida por dv/dt y por EDM.



Fuente: [Muetze, 2008]

Figura 12 Aspecto del anillo con microfibras.

5. Conclusiones

Como se ha presentado en este artículo, el uso de inversores PWM para accionar motores de inducción jaula de ardilla crean un voltaje en la flecha del motor y una corriente de magnitud importante que circula a través de los rodamientos. Esta

corriente llega a dañarlos de forma prematura en muy poco tiempo, lo que ocasiona gastos de mantenimiento adicionales y paros de producción inesperados. El camino que recorre esta corriente está bien establecido y lo que se busca es evitarla desde su origen o hacerla circular fuera de los rodamientos. Sin duda cuando se seleccione un motor para ser accionado por un inversor PWM se debe tomar en consideración que incluya rodamientos aislados o la posibilidad de poderle acondicionar un mecanismo externo para el desvío de las corrientes fuera de los rodamientos. No es recomendable eliminar el cable de tierra física para evitar la circulación de esta corriente ya que pone en riesgo por descargas eléctricas la integridad de los operarios cercanos al motor. Si la flecha del motor esta acoplada de forma directa (sin aislamiento eléctrico) a la flecha de un moto-reductor, mecanismo o máquina, es muy probable que parte de la corriente que circula por los rodamientos se desvíe a estos dispositivos, por lo que es necesario verificar si no hay riesgos de generación de chispas, principalmente en ambientes explosivos.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] AEGIS, (2016). Bearing Protection Handbook. Electro Static Technology.
- [2] AEGIS, (2017). <https://www.est-aegis.com/bearing-protection-EDM-fluting.php>.
- [3] Andreason S., (1996). Passage of electrical current thru rolling bearings. SKF, Gothenberg.
- [4] Busse D., Erdman J., Kerkman R. J., & Skibinski D., (1997). An Evaluation of the Electrostatic Shielded Induction Motor: A Solution for Rotor Shaft Voltage Buildup and Bearing Current. IEEE Transactions on Industry Applications, 1563-1570.
- [5] Busse Erdman J., Kerkman R., Schlegel D., & Skibinski G., (1997). Bearing Currents and Their Relationship to PWM Drives. IEEE Transaction on Power Electronics, 243-253.
- [6] Erdman J., Kerkman R., Schlegel D., & Skibinski G., (1996). Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages. IEEE Transaction on Industry Application, 250-259.

- [7] Endo H., (1978). Analysis of Current Density at D.C. Motor Bearing. Shinko Electric Ltd.
- [8] Haus O., (1964). Shaft voltage and bearing currents—Causes, effects and Remedies. 105-112.
- [9] IEEE-Std-112-2017, (2017). Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard Test, IEEE Std 112-201, IEEE Power and Energy Society.
- [10] Krumpolc E., (1990). Bearing currents and shaft voltages in electric machines. *Electrotechnik*, 88-91.
- [11] Kulda V., (1965). Bearing currents in electrical machines. *The Electrical Engineer*, 323-326.
- [12] Muetze A., & Oh H. W., (2008). Design Aspects of Conductive Microfiber Rings for Shaft Grounding. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1749-1757.
- [13] Murray S., & Lewis P., (1967). Effect of electrical currents on ball bearing. ASLE Annual meeting.
- [14] Ramachandran A., & Reddy M. C., (2017). Simulation and Experimental Measurement of Shaft Voltage, Bearing Current in Induction Motor Drive. *IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering*, pp. 732-737.
- [15] William H., Oh A. W., (2008). Shaft Grounding—A Solution to Motor Bearing Currents. *ASHRAE Transactions*, 246-251.