Análisis por Zonas de Falla

Seis zonas fallas en la identificación de la salud del motor

Noah P. Bethel
PdMA Corporation
5909C Hampton Oaks Pkwy.
Tampa, FL 33610

El personal de mantenimiento eléctrico por años ha estado limitado a solucionar los problemas con no mas de un multímetro y megohmetro. Esto lamentablemente no proporciona suficiente información para permitir a la mayor parte de los técnicos a determinar si existe un problema eléctrico o no. Un operador mecánico dijo una vez: "si existe un problema con una pieza de un equipo y hay un cable eléctrico a menos de quince pies de este, entonces debe ser un problema eléctrico". Si usted está relacionado con el mantenimiento eléctrico ha escuchado "esto debe ser el motor". Si trabaja con mantenimiento mecánico probablemente dirá: "posiblemente es la bomba, esta desalineada"

Esto ha sido una batalla continua, hasta hace poco, la tecnología ha sido principalmente desarrollada para el campo mecánico. El espectro de vibración muestra un pico a 2 veces la frecuencia de línea y eso quiere decir que el problema es eléctrico. Correcto? …no, incorrecto!!! Hay muchas variables que producen un ($2F_L$), por lo tanto enviar un motor de servicio para reparación eléctrica debido a ($2F_L$) es un error probablemente un error costoso. Es muy probable que el taller de reparación llame preguntando "que trabajo quiere que le haga a este motor que esta en buen estado" recientemente la batalla se ha desplazado de motor vs bomba a motor vs VFD. Al parecer, tan pronto se desarrolla una tecnología para resolver un debate, otro debate resulta, lo cual promueve el avance de la tecnlogía.

"La medición de la Resistencia a tierra es todo lo que necesitamos". Encuentro esta declaración difícil de creer. Cuántas veces hemos tenido el temor de equivocarnos después de verificar con un megohmetro que "el motor esta bien". El hecho es que numerosas razones pueden causar falla en un motor las cuales no serán detectadas por un megohmetro, tal como un corto entre espiras. El deterioro del aislamiento entre espiras de un devanado puede ocurrir entre una ranura del estator o en el final de la espira y estar completamente aislado de tierra. De la misma manera pueden ocurrir cortos de fase a fase, si estas fallas no son atendidas, se puede originar un rápido deterioro del devanado; finalizando con un reemplazo de motor. La restauración de un motor que presenta una falla debería ser considerada solo después de que esta ha sido bien valorada.

La solución de un problema eléctrico en un motor, no debería resultar en la declaración: "el motor está bien" aunque alguien con años de experiencia y gran credibilidad pueda escaparse del problema con una declaración tan simple, la mayor parte de técnicos no encontraron la misma respuesta positiva de su supervisor, ingeniero o director de planta. Para reportar con seguridad la condición eléctrica de un motor y asegurarse que la recomendación es tomada en serio, hay 6 áreas de interés conocidas como zonas de falla que deben revisarse durante la búsqueda de la solución. No tener en cuenta algunas de estas zonas, podría resultar en la omisión del problema y en la pérdida de la credibilidad en la habilidad de solución.

Las seis zonas eléctricas de falla:

- ✓ **Calidad de la alimentación**
- ✓ **Circuito de potencia**
- ✓ **Aislamiento**
- ✓ **Estator**
- ✓ **Rotor**
- ✓ **Entrehierro**

Calidad de la alimentación

Recientemente la calidad de la alimentación ha sido el centro de atención por la alta demanda y la atención que requieren las unidades de control de corriente alterna y corriente directa. La preocupación por la penalidad del factor de potencia y los costos energéticos han aumentado los variadores de frecuencia (VFD´s) y otras cargas no lineales incrementando significativamente los niveles de distorsión de voltaje y corriente. ¿Cómo puede esta distorsión ser minimizada?, ¿Que equipo es requerido, y es la preocupación puramente financiera o es por riesgo en el equipo? En esta primera parte discutiremos del verdadero significado de los problemas de calidad de potencia y como estos afectan la salud del motor. Hablaremos de la distorsión armónica de voltaje y corriente, voltaje, desbalances, factor potencia... etc

Circuito de potencia

El circuito de potencia se refiere a todos los conductores y conexiones que existen desde el punto donde se realice la prueba hasta los bornes terminales del motor. Este puede incluir interruptores, fusibles, contactores, protecciones contra sobrecarga, seccionadores y borneras. En 1994, en un proyecto demostrativo sobre un sistema de distribución industrial de potencia se encontró que las conexiones y los conductores fueron la fuente del 46% de las fallas que redujeron el impacto de los problemas del circuito de potencia sobre la salud del motor.

Condición de aislamiento

Se refiere al aislamiento entre los devanados y tierra. Altas temperaturas, humedad y contaminación dan lugar a una disminución de la vida del aislamiento. Se ha dicho que si las plantas usaran solamente el secado de aislamiento, entonces el alargamiento de la vida de nuestros motores no sería garantizado. En esta tercera parte hablaremos de los estándares que gobiernan la condición de aislamiento y como aplicarlos mejor para asegurar que el aislamiento a tierra posibilite una vida útil más larga a nuestros motores.

Condición del estator

Cuando mencionamos el estator, hacemos referencia a devanados DC o trifásicos AC, aislamiento entre las espiras de los devanados y el núcleo o laminaciones. Estas zonas de fallas crean mucho debate en cuanto a la causa y el tipo de falla. En esta cuarta parte discutiremos las diferentes causas de fallas y como identificar las condiciones que conducen a estas para ser corregidos.

Condición de rotor

Se refiere a las barras del rotor, a las laminaciones y anillos del rotor. En los años 80 un esfuerzo conjunto entre EPRI y General Electric mostró que el 10% de las fallas del motor fueron debidas al rotor. El rotor, aunque en pequeños porcentajes, puede influir a fallas en otras zonas. En esta quinta parte discutiremos sobre las posibles causas de falla, el impacto sobre la salud del rotor, la severidad de las fallas basados en el diseño del rotor.

Entrehierro

Se hace referencia al espacio de aire entre el rotor y el estator. Si este espacio no está uniformemente distribuido alrededor de los 360º del motor se pueden producir campos magnéticos desiguales. Estos desbalances magnéticos causan movimiento de los devanados del estator, provocando fallas en ellos y vibración eléctricamente inducida afectando también los rodamientos. Hablaremos de los diferentes tipos de excentricidad y como identificarlos usando métodos de medición estático y dinámico.

CONCLUSIÓN

En conclusión, el término "el motor está bien" no es suficiente para asegurar que una evaluación verdadera de la salud del motor ha sido realizada. Si la indecisión aumenta en cuanto a la solución o diagnostico de un problema, haga una revisión general y en lo posible no tome una decisión rápida. Divida el sistema en zonas individuales, pruebe cada zona de falla completamente con cada tecnología disponible y finalmente haga sus recomendaciones escritas o verbales usando la terminología adecuada en el análisis para expresar sus capacidades.

Parte 1: Calidad de la Alimentación

Desarrollando un proceso metódico paso a paso, los resultados de la prueba del análisis de potencia del EMAX rápidamente pueden evaluar tres de las seis zonas de falla. Estas zonas de falla son determinadas por las fallas eléctricas más comunes de los motores del sector industrial. Este artículo está enfocado principalmente en la calidad de la potencia, seguido por un proceso recomendado para evaluar los datos registrados durante la captura.

La Calidad de potencia se refiere a la condición de la señal de voltaje y de corriente. Dentro de los mecanismos que pueden desmejorar la calidad de la potencia se encuentran incluidas las cargas monofásicas y trifásicas no lineales, variadores de frecuencia, equipos de arranque y de frenado, picos de voltaje entre otros. Estos pueden causar armónicos excesivos sobre el sistema de distribución el cual puede resultar en sobrecalentamiento del sistema de aislamiento.

CALIDAD DE LA POTENCIA = CALIDAD DEL VOLTAJE

El término común es calidad de la potencia, pero lo que en realidad evaluamos es la calidad del voltaje que está siendo suministrado al circuito del motor. El sistema de alimentación puede únicamente controlar la calidad del voltaje; esto no tiene ningún control de las corrientes que una carga particular puede originar.

La prueba de análisis de potencia del EMAX de PdMA permite a un técnico tomar una foto de la calidad de la potencia para ver que señala la condición de voltaje y evaluar que efecto tendía sobre el motor. El tiempo real de la muestra para las medidas simultáneas de las corrientes y voltajes toma 0.17 segundos. De esta muestra el técnico se enfoca principalmente en los voltajes fase-a-fase que alimentan el motor y que efectos tienen ellos sobre su funcionamiento.

Datos usados para evaluar la calidad de la potencia están localizadas en la sección de voltaje de fase – a – fase de la página de resultados (Figura 1) RMS fundamental, RMS total, factor de cresta (CF) y distorsión armónica total (THD) están catalogados para cada uno de los voltajes fase-a-fase. El promedio de voltaje y el desbalance porcentual son también mostrados.

Además NEMA recomienda el factor de degradación provisto por el desbalance de voltaje fase-a-fase y el factor de armónico de voltaje (HVF).

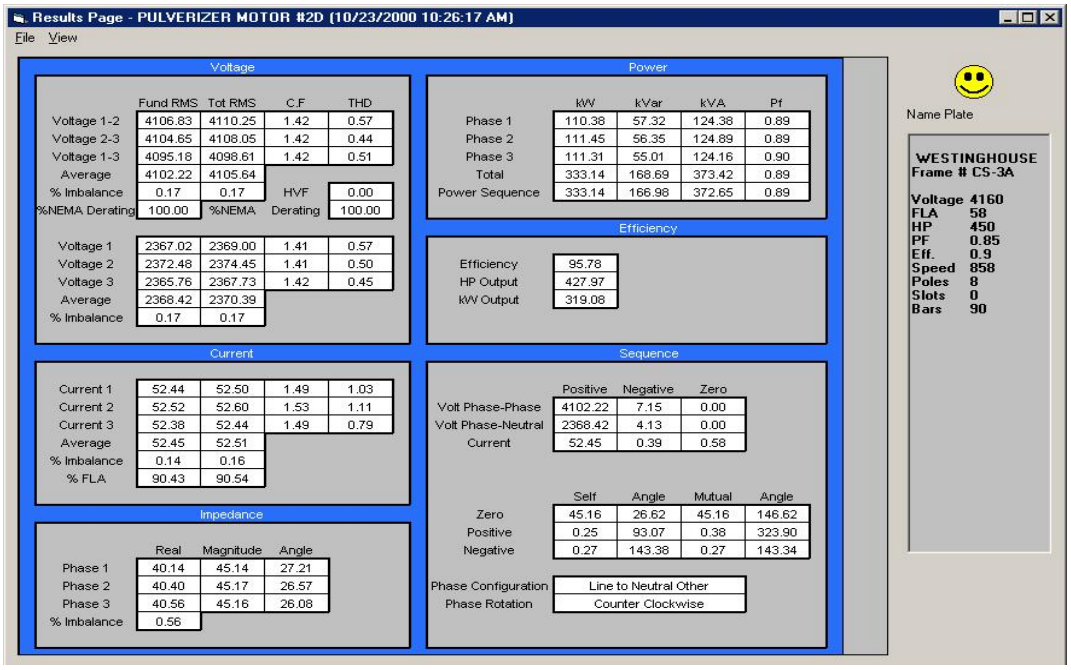


Figura 1

EL DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE FASE-A-FASE

Cuando los voltajes de línea aplicados a un motor de inducción no son iguales, corrientes de secuencias negativas son introducidas en los devanados del motor. Estas corrientes producen en el entre hierro un flujo opuesto al flujo rotatorio del motor. Esto reduce el par afectando la operación e incrementando la temperatura del motor.

NEMA recomienda niveles de degradación basados en el porcentaje de desequilibrio de voltaje. No opere un motor cuando el desequilibrio de voltaje se encuentra por encima de 5% (NEMA MG-1). Con un desequilibrio de voltaje fase-a-fase, el HP de placa debe ser multiplicado por el valor de la degradación. Si la aplicación requiere un valor mayor al calculado, el desequilibrio debe corregirse antes de volver a operar el motor. Continuar la operación del motor con un desequilibrio causa altas temperaturas internas y daños a las bobinas y al aislamiento.

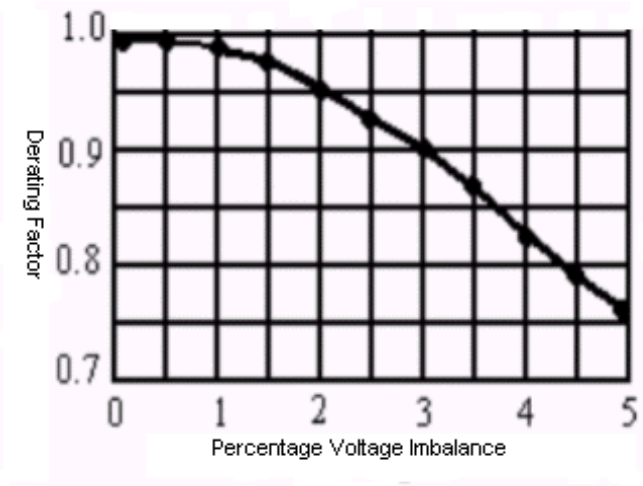


Figura 2

VOLTAJE TERMINAL

El voltaje terminal tiene un efecto importante sobre el funcionamiento del motor. El efecto de bajo voltaje es mejor comprendido que el efecto de alto voltaje. En los siguientes párrafos cubrimos estos efectos.

Bajo voltaje

Cuando un motor es operado por debajo de la tensión nominal, algunas características del motor cambiarán ligeramente y otras lo harán drásticamente. Para operar con una carga fija mecánica, un motor debe trabajar con una cantidad de potencia constante. La cantidad de potencia esta relacionada aproximadamente por el producto de voltaje y corriente. Con un voltaje inferior, habrá un aumento de la corriente para mantener la potencia requerida. Esto en sí no es alarmante, a no se que el aumento de corriente exceda el valor nominal del motor. Cuando esto sucede la acumulación de calor dentro del motor dañará el sistema de aislamiento.

Aparte de la posibilidad de recalentamiento y la disminución de la vida del aislamiento, es necesario entender otros efectos importantes del funcionamiento del motor tales como el Arranque, Las paradas, el torque, la señal aplicada (rms)… etc. De esta manera una reducción del 10% del voltaje de placa (100% a 90%, 480ª 432 voltios) reducirá el arranque, las paradas y el torque por un factor de 0.9 x 0.9. Los valores restantes serán 81% de los valores a voltaje nominal. Al 80% de voltaje, los resultados serían 64% de los valores a voltaje nominal. Claramente, sería difícil arrancar con aquellas cargas en determinadas condiciones. Similarmente el torque del motor sería mucho menor que durante las condiciones de voltaje.

Alto voltaje

Una idea falsa común es que el alto voltaje tiende a reducir la corriente utilizada en un motor. Esto es no siempre el caso. El alto voltaje en el motor tiende a saturar la parte magnética de este. Esto hace que se presente una corriente excesiva en el esfuerzo para magnetizar el hierro más allá del nivel al cual puede ser magnetizada rápidamente. Generalmente, los motores toleran un valor de voltaje por encima del nominal, sin embargo, niveles extremos de voltaje harán que el amperaje genere recalentamiento provocando una disminución en la vida del motor. Ejemplo: motores antiguos fueron diseñados para 220/440 con una tolerancia de +/- 10%. De esta manera, el rango de voltaje para 440 voltios sería de 396 a 484 voltios. Sin embargo, a pesar de esta tolerancia el mejor funcionamiento será al voltaje de diseño. La operación en los límites de este rango podría exigir innecesariamente el motor.

Estas tolerancias existen no para ser un estándar que pueda ser usado todo el tiempo, sino para las oscilaciones de voltaje normales de planta. La operación continua en uno de los extremos de tolerancia acertará la vida del motor.

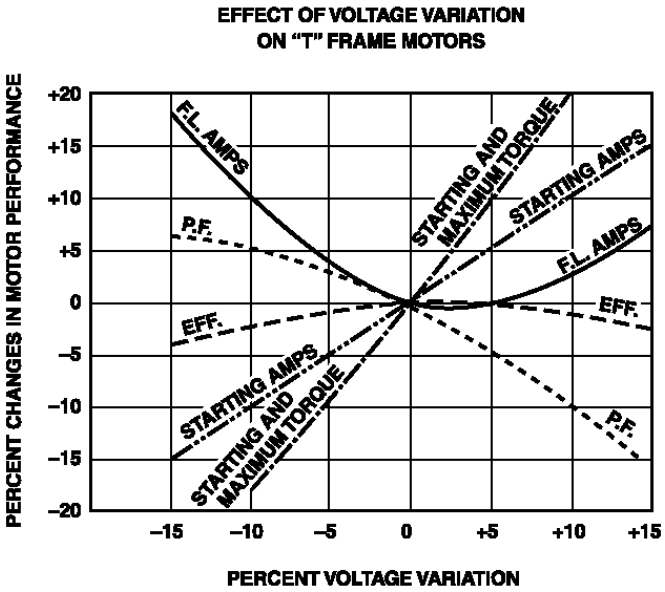


Figura 3

El gráfico mostrado en la Figura 3 es usado ampliamente para ilustrar los efectos generales de alto y bajo voltaje sobre el funcionamiento de motores de carcaza tipo T. Esto funciona para mostrar efectos generales, pero recuerde que estos efectos cambian significativamente de un diseño de motor a otro.

En plantas antíguas, some compromises may have to be made because of the diferencias en los estándares para motores antiguos (220/440) y los nuevos estándares de carcaza tipo T (234/460), pero un voltaje en el medio de estos rangos generalmente causará el mejor funcionamiento. Altos voltajes siempre tenderán a reducir el factor de potencia y aumento de perdidas que causarán altos costos para el equipo y el sistema.

Las siguientes directrices son proporcionadas para ayudar en la evaluación del voltaje del circuito del motor:

- Pequeños motores tienden a hacer más sensibles al recalentamiento y la saturación que los motores grandes.
- Los motores de carcasa tipo U son menos sensibles al recalentamiento que los de carcasa tipo T.
- Los motores de eficiencia Premium/High son menos sensibles al recalentamiento que los motores de eficiencia estándar.
- El sobre voltaje puede hacer subir el amperaje y la temperatura aun en motores ligeramente cargados; de esta manera la vida del motor puede ser reducido por el alto voltaje.
- La eficiencia a plena carga se cae con el alto y bajo voltaje.
- El factor de potencia mejora con el bajo voltaje y cae bruscamente con el alto voltaje.
- La corriente de arranque (In-Rush) aumentan con el alto voltaje.

Simplemente la mejor vida y operación eficiente de los motores eléctricos ocurre cuando estos trabajan a voltaje nominal.

ARMONICOS

NEMA degradación por contenido de armónicos, factor de voltaje armónico (HVF).

La presencia de la distorsión armónica en el voltaje aplicado al motor incrementará las pérdidas eléctricas y disminuirá la eficiencia. Estas perdidas incrementarán la temperatura del motor, causando aún más pérdidas. Para ayudar al técnico en la evaluación de los efectos que el contenido de armónicos de voltajes está teniendo sobre el funcionamiento del motor, EMAX proporciona el HVF y recomienda el factor de degradación.

Armónicos es el nombre dado a la distorsión de señales que son en forma sinusoidal y ocurren en los múltiplos de la frecuencia fundamental. Cargas no lineales generan estos armónicos.

Cargas lineales son dispositivos de cargas eléctricas que en el estado de operación permanente, presentan esencialmente impedancia constante a la fuente de potencia durante todo el ciclo del voltaje aplicado. Un ejemplo de una carga lineal es un motor. Note como la corriente es proporcional al voltaje en toda la onda sinusoidal (Figura 4).

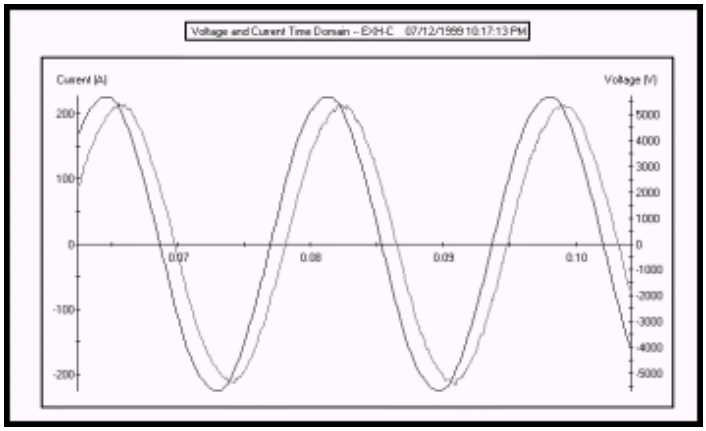


Figura 4

Cargas no lineales son cargas eléctricas en las cuales se muestra una corriente discontinuamente o cuya impedancia varía a través de todo el ciclo de la entrada de voltaje AC. Ejemplos de cargas no lineales en un sistema industrial de distribución son luminarias electrónicas, variadores de frecuencia VFD´s (6 y 12 pulsos) y motores DC, entre otros. Un ejemplo de una corriente discontinua es mostrada en la Figura 5, una fase de voltaje y corriente que suministrar un variador de frecuencia VFD.

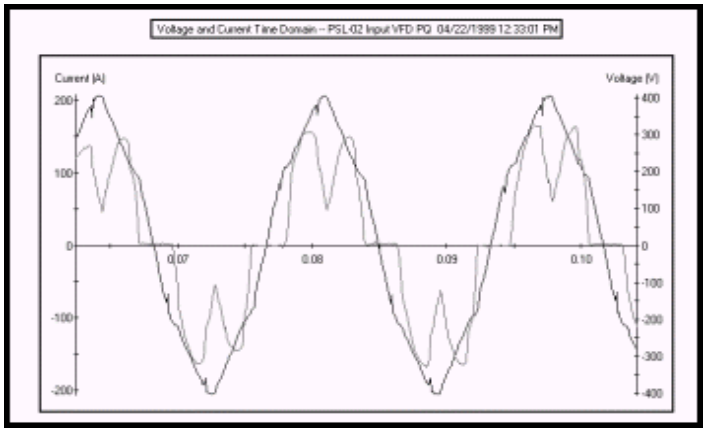


Figura 5

Altos armónicos pueden provocar altas temperaturas en el motor. NEMA ha hecho un seguimiento de esta temperatura durante la operación y si el motor necesita ser liberado de la distorsión armónica de la señal de voltaje. En el número de publicación MG1 de los estándares de NEMA, la curva de degradación y factor de voltaje armónico HVF es proporcionado para ayudar al técnico en la evaluaci9ón de la severidad del problema.

Realizando las pruebas de análisis de potencia (PA) del motor, el EMAX prueba la señal de voltaje aplicado. Esto analiza la forma de onda de voltaje, identifica la frecuencia fundamental y todos los armónicos presentes y su porcentaje de forma de onda. Con esta información el HVF es calculado y de ser requerido son proporcionadas las directrices recomendadas por NEMA. La curva de degradación de HVF es mostrada en la Figura 6.

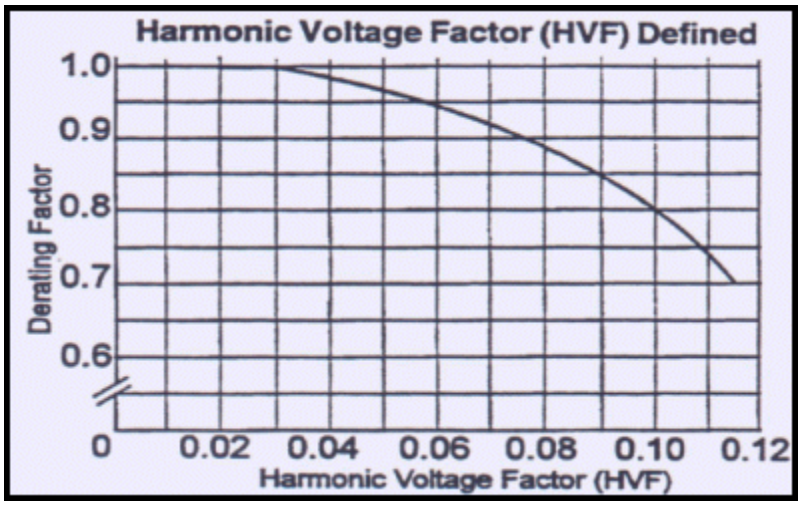


Figura 6

NOTA: La curva no se aplica cuando el motor es operado a otra frecuencia diferente a la nominal o cuando es operado a un voltaje variable a la fuente de frecuencia (VFD).

No hay por lo general ninguna necesidad de liberar los motores si la distorsión de voltaje está dentro de los límites establecidos por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) en el estándar 51-1992 del 5% para la distorsión armónica total (THD) y del 3% para cualquier armónico individual. Los problemas de calentamiento excesivos comienzan cuando la distorsión de voltaje alcanza del 8 al 10% o mas. Tal distorsión debe ser corregida para alargar la vida del motor.

CONCLUSION

La prueba de análisis de potencia del MCEMAX proporciona valiosa información detallada para identificar la calidad de la alimentación en el sistema de distribución. Además, proporciona también los datos requeridos para la evaluación detallada de un sistema que utiliza variadores de frecuencia (voltaje fase-a-fase, distorsión armónica, voltaje del bus, distorsión armónica total, diagrama vectorial, dominios de voltaje y corriente, etc) y sus efectos en el funcionamiento y la condición del motor. La prueba MCEMAX le suministra lo que usted necesita para saber que hacer en cuanto a decisiones que conducen a un plan acertado para mantener la óptima operación del motor.

Parte 2: Circuito de Potencia

Cuando evaluamos la condición de alguna zona de falla, es una buena práctica usar tantas tecnologías como sea posible. El objeto de este artículo es describir el circuito de potencia y como desarrollar metodologías para identificar anomalías con éste.

Circuito de potencia se refiere a todos los conductores y conexiones que existen desde las barras que suministra potencia hasta las terminales en el motor. Esto puede incluir interruptores, fusibles, contactores, protecciones contra sobrecarga, seccionadores y borneras. En 1994 un estudio en un sistema industrial de distribución encontró que las condiciones y los conductores fueron la causa del 46% de las fallas que reducían la eficiencia del motor. Muchas veces un motor, aunque inicialmente esta en perfecto estado de salud, es alimentado con un circuito defectuoso, causando problemas como desequilibrios de voltaje, desequilibrios de corriente, etc. Cuando estos problemas se hacen severos, se requiere de corrientes mayores para sostener la potencia de salida, provocando incrementar en la temperatura y daños en el aislamiento.

La prueba proporcionada por el MCEMAX para ayudar en el análisis del circuito de potencia es la prueba de potencia y se puede realizar sobre motores de inducción, síncronos, de rotor devanado y motores manejados

por variadores de frecuencia. Esta prueba indica anomalías en el circuito de potencia, la calidad de la energía y en el estator. El foco de esta parte es el circuito de potencia.

Altas resistencias por las conexiones en el circuito provocan un desbalance en el voltaje terminal del motor. Las consecuencias de esto son: Sobrecalentamiento de los elementos adyacentes a las conexiones, pérdida de par o torque, descomposición de corrientes entre fases, sobrecalentamiento del aislamiento y disminución de la eficiencia del motor. Desequilibrio de voltajes causarán que el motor necesite más corriente para realizar el trabajo requerido. Por lo tanto hace que el cliente no solo se enfrente al daño prematura del motor sino también a pagos potenciales de kilovatios –hora extra y probablemente una penalización.

Otra consecuencia del desequilibrio de voltaje es la aparición de corrientes de secuencia negativa. Las cuales desarrollan un campo magnético que se opone a la rotación del motor. Esta carga adicional requiere un aumento de corriente. El efecto a largo plazo será la disminución de la vida del aislamiento.

Los valores de la prueba de potencia son usados para evaluar la salud del circuito de potencia son: voltaje fase a fase, corriente fase a fase y sus respectivos desequilibrios. Estos valores medios son registrados y comparados con estándares de la industria. Debido a los efectos negativos provocados por el desequilibrio de voltaje, NEMA MG-1 recomienda que el motor no sea operado si el desbalance alcanza o supera el 5%. Adicionalmente proporciona una curva de degradación que muestra un factor para la compensación de la potencia (hp).

Una entrega de potencia desequilibrada, no solamente causa desequilibrio de voltajes sino también un alto porcentaje de desequilibrio de corriente. Algunas reglas se pueden tener en cuenta al momento de solucionar un problema en el circuito de potencia.

- Un desequilibrio de voltaje puede causar un desequilibrio de corriente del 6-7%, según la Asociación de Servicio de Aparatos Eléctricos (EASA).
- Un desequilibrio de voltaje del 3.5% puede aumentar la temperatura de los devanados en un 2.5%, según el Instituto de Investigación de Potencia Eléctrica (EPRI).
- Un incremento de 10ºC de la temperatura en los devanados a partir de la temperatura de diseño puede resultar en una reducción del 50% de la vida del motor.

El desequilibrio de voltaje causará que el motor marche a temperaturas por encima de la temperatura de diseño. Este sobrecalentamiento es debido a la aparición de las corrientes de secuencia negativa que causan en el motor una rotación opuesta a la rotación de funcionamiento. Estas temperaturas también provocarán la degradación del aislamiento y disminución de la vida del motor. El porcentaje de aumento de la temperatura es aproximadamente dos veces el cuadrado del desequilibrio de voltaje. Por ejemplo, un desequilibrio de voltaje del 3% causará aproximadamente un aumento de temperatura del 18%. $3^2 \times 2 = 18$

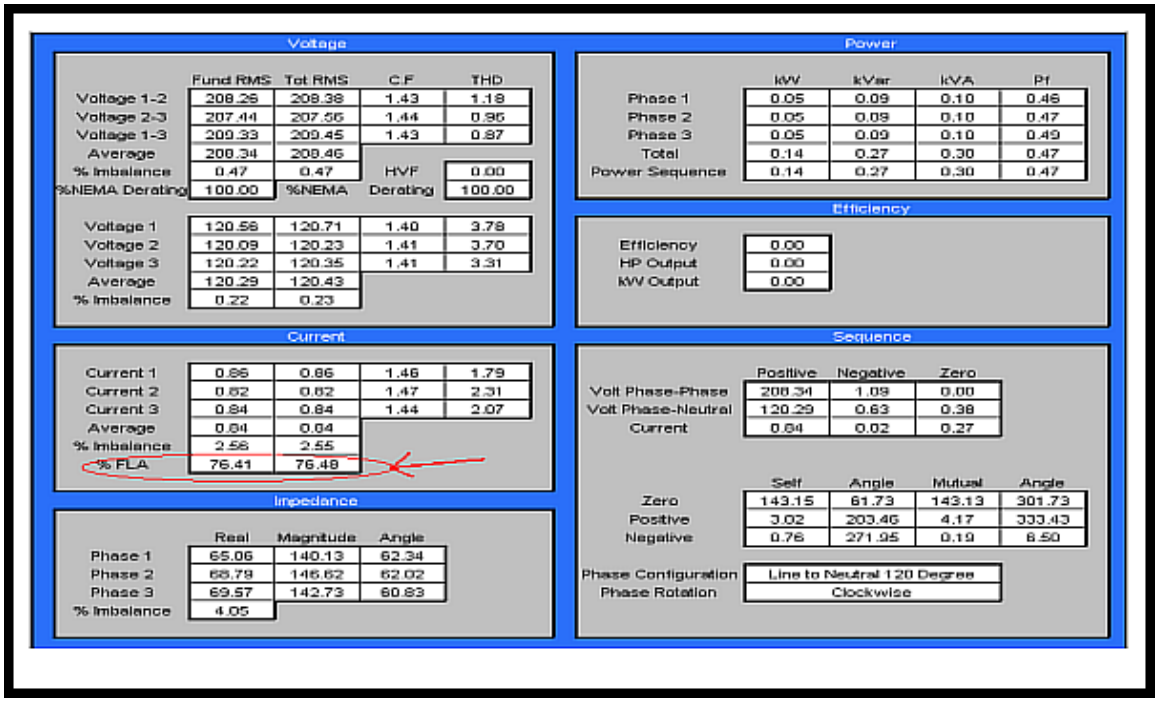
Mientras mayor sea el desequilibrio de voltaje, mayor es la temperatura en los devanados y más pronto el aislamiento fallará. Los estándares de NEMA recomiendan un desequilibrio máximo del 1% para motores no degradados y un 5% para motores con degradación por debajo del 75%. Si el desequilibrio de voltaje excede este 5%, es recomendable no operar el motor.

¿Ahora que los efectos negativos provocados por los desequilibrios de voltaje y corriente provenientes de anomalías en el circuito de potencia han sido discutidos, como el Tester MCEMAX identifica estas anomalías? Es recomendable probar el circuito de potencia con la prueba de análisis de potencia mientras el motor está en operación normal.

Un desequilibrio de corriente es un posible indicio de alta resistencia en conexiones. Sin embargo un desequilibrio de voltaje además del desequilibrio de corriente es un mejor indicador de este tipo de falla. La ubicación de la prueba determina si los desequilibrios de corriente y voltaje son generados por altas resistencias en conexiones.

Un desequilibrio de corriente con un desequilibrio de voltaje no indican necesariamente una falla en el circuito de potencia. Pueden haber otros aspectos que apunten a otra zona de falla, por eso es importante hacer un analisis integral.

Es más efectivo llevar una tendencia tomando datos siempre con la misma carga. Lo mas más fácil es observar el porcentaje de carga (%FLA) en los resultados de la prueba de potencia. Ver Figura 7.



Voltage

	Fund RMS	Tot RMS	C.F	THD
Voltage 1-2	208.26	208.38	1.43	1.18
Voltage 2-3	207.44	207.56	1.44	0.96
Voltage 1-3	209.33	209.45	1.43	0.87
Average	208.34	208.46		
% Imbalance	0.47	0.47	HVF	0.00
%NEMA Derating	100.00	%NEMA Derating		100.00

Voltage 1	120.56	120.71
Voltage 2	120.09	120.23
Voltage 3	120.22	120.35
Average	120.29	120.43
% Imbalance	0.22	0.23

Power

	kW	kVar	kVA	Pf
Phase 1	0.05	0.09	0.10	0.46
Phase 2	0.05	0.09	0.10	0.47
Phase 3	0.05	0.09	0.10	0.49
Total	0.14	0.27	0.30	0.47
Power Sequence	0.14	0.27	0.30	0.47

Efficiency

Efficiency	0.00
HP Output	0.00
kW Output	0.00

Current

Current 1	0.86	0.86	1.46	1.79
Current 2	0.82	0.82	1.47	2.31
Current 3	0.84	0.84	1.44	2.07
Average	0.84	0.84		
% Imbalance	2.56	2.55		
% FLA	76.41	76.48		

Sequence

	Positive	Negative	Zero
Volt Phase-Phase	208.34	1.09	0.00
Volt Phase-Neutral	120.29	0.63	0.38
Current	0.84	0.02	0.27

	Self	Angle	Mutual	Angle
Zero	143.15	81.73	143.13	301.73
Positive	3.02	203.46	4.17	333.43
Negative	0.76	271.95	0.19	8.50

Phase Configuration	Line to Neutral 120 Degree
Phase Rotation	Clockwise

Impedance

	Real	Magnitude	Angle
Phase 1	65.06	140.13	62.34
Phase 2	68.79	146.62	62.02
Phase 3	69.57	142.73	60.83
% Imbalance	4.05		

Figura 7

Aquí, es valiosa la capacidad del técnico para solucionar el problema del circuito de potencia. Como mencionamos antes, un desequilibrio de corriente es un posible indicador de una anomalía en el circuito de potencia. Esto es porque dependiendo de la ubicación de las pinzas de voltaje del MCEMAX con respecto a la localización de la falla se mostrará diferentes desequilibrios. Sin embargo, los valores de corriente medidos son constantes independientemente del punto de prueba. La Figura 8 muestra como las lecturas de voltaje pueden variar dependiendo del punto de prueba.

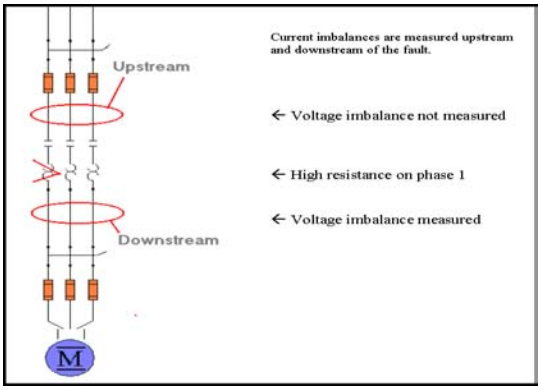


Figura 8

Si la prueba esta siendo realizada arriba de la falla, entonces solo habrá un desequilibrio de corriente, y si es aguas abajo, habrá un desequilibrio de corriente y de voltaje. Si el técnico no puede acercarse más al motor para repetir la prueba, usando la prueba estándar, mientras el motor esta desenergizado podrá identificar el problema.

Las cargas que usan como fuente de alimentación un sistema trifásico están sujetas a pérdida repentina de una de las fases. Esta pérdida causa problemas serios en los motores de inducción. Los devanados del motor

se recalientan debido al flujo de corrientes de secuencia negativa, condición que existe cuando no hay un desequilibrio de voltaje entre fases. La pérdida monofásica también hace operar el motor a una potencia inferior a la nominal.

CONCLUSION

Una conexión de alta Resistencia provoca desequilibrios de voltaje y corriente, los cuales reducen significativamente la potencia de operación. Cuando un motor es alimentado con un circuito defectuoso, se generan problemas con desbalances de potencia como, corrientes de secuencia negativa. En tanto, los problemas se hacen mas severos, cae la potencia causando recalentamiento en los componentes adyacentes, daños en el rotor, en el estator, el aislamiento, disminución de la vida del motor, perdida de eficiencia, perdida del motor o explosión. Mientras que los síntomas sean daño de rotor, estator o aislamiento y la causa esté en el circuito de potencia, el reemplazo del motor por una conexión de alta resistencia solo provocará nuevas fallas en el nuevo motor.

Parte 3: Aislamiento

La importancia del sonido eléctrico en sistemas de aislamiento ha sido reconocida desde el inicio de la electricidad. Con el pasar de los años el crecimiento de la industria eléctrica tiene la necesidad de mejorar la prueba de aislamiento y cada vez es más significativa. Los diseños y las aplicaciones de equipos eléctricos son casi infinitos en su variedad, pero todas tienen una característica en común. Para equipo eléctrico en buena condición, una de las características más importantes es que el flujo de electricidad sigue caminos definidos o circuitos. Estos caminos son normalmente los conductores internos o externos del equipo. Es importante que el flujo de corriente esté confinado y no esté fugando de un componente a otro a través del material.

El deterioramiento del sistema de aislamiento puede causar una situación insegura para el personal expuesto a la fuga de corriente. Asegurando que el aislamiento está limitando el flujo de corriente eléctrica para aislar las partes conductoras y que el personal que entra en contacto con el aislamiento no esté en riesgo de volverse un conductor de baja resistencia para la corriente a tierra.

Así como las paredes de una tubería contienen el flujo de un fluido, el aislamiento alrededor de un conductor limita el flujo de corriente eléctrica. Las paredes de una tubería pueden tener impurezas, grietas u otros defectos que limitan su habilidad de mantener la presión del fluido. El aislamiento pude desarrollar impurezas, grietas u otros defectos que limitan su habilidad de mantener el potencial eléctrico; el cual es la fuerza o voltaje que conduce el flujo de electrones lo llamamos corriente a través del circuito eléctrico.

A pesar de los grandes pasos reconocidos en el diseño de equipo eléctrico en los años reciente, el eslabón débil en la cadena, es aún el sistema de aislamiento. Cuando el equipo eléctrico falla con frecuencia, puede ser indicio de aislamiento defectivo. Aunque un motor eléctrico es diseñado adecuadamente y probado antes de ser instalado, no es garantía de que una falla en el aislamiento no ocurrirá alguna vez en el futuro.

Muchas influencias externas afectan la vida de los sistemas de aislamiento eléctrico. Estas influencias incluyen la contaminación de la superficie del aislamiento con químicos en el ambiente que atacan y destruyen la estructura molecular, daño físico debido al manejo inapropiado o choque accidental, vibración y excesivo calor por la cercanía al proceso industria. Los trascientes de voltaje en los conductores del aislamiento, así como los picos causados por variadores de frecuencia, pueden disminuir el esfuerzo dieléctrico al punto de falla. El deterioramiento ocurre en muchas formas y en muchos lugares al mismo tiempo. Por ejemplo, los químicos y/o los cambios de calor, en la estructura molecular hacen que el material aislante se vuelva conductivo, permitiendo que más corriente sea forzada a través del él por el voltaje, provocando una fuga de corriente.

La prueba adecuada del sistema de aislamiento de conductores, el análisis de datos colectados y apropiadas acciones correctivas pueden minimizar las posibilidades de fallas. Por lo tanto, el significado de entender la prueba del sistema de asilamiento nunca había sido tan importante.

SEGURIDAD

IEEE 43-2000 afirma que antes de realizar cualquier prueba de aislamiento, las normas de seguridad deber seguirse. No es seguro comenzar la prueba hasta que la descarga de corriente y el retorno de voltaje sean insignificantes. El retorno de voltaje debe ser menor a 20v después de que la tierra es removida. El probador MCE (Evaluación del circuito del Motor) prueba este voltaje antes de continuar con la prueba. Al iniciar la prueba, se necesita que el voltaje entre línea y neutro sea menor a 15v (Figura 9).

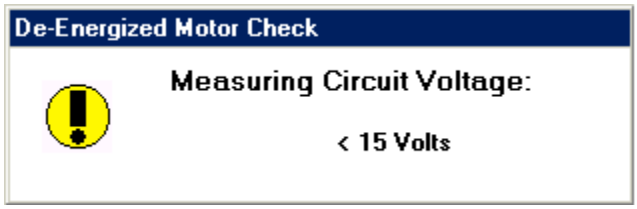


Figura 9

También para las pruebas a 500 voltios, la pinza entre el tester y el devanado debe estar apropiadamente aislada y retirada de la tierra, de lo contrario, las fugas de corriente en la superficie y las pérdidas por corona pueden presentar errores en las mediciones.

DEFINICIONES

Por definición, la resistencia de aislmaiento es obtenida del voltaje directo aplicado a través del aislamiento dividido por la corriente resultante total. La corriente total es la suma de cuatro diferentes corrientes: corriente de fuga, corriente capacitiva, corriente de conducción y corriente de absorción.

La corriente de fuga es constante con el tiempo. La humedad o algún otro tipo de contaminación en la superficie del aislamiento presente en la máquina causan una corriente de fuga alta. Lo cual lleva a una baja resistencia de aislamiento.

La corriente capacitiva es una corriente reversible de carga o descarga debida a la capacitancia geométrica. Que es medida con la corriente alterna de alimentación o frecuencias altas. Con voltaje directo esta corriente es de poca duración y de alta magnitud.

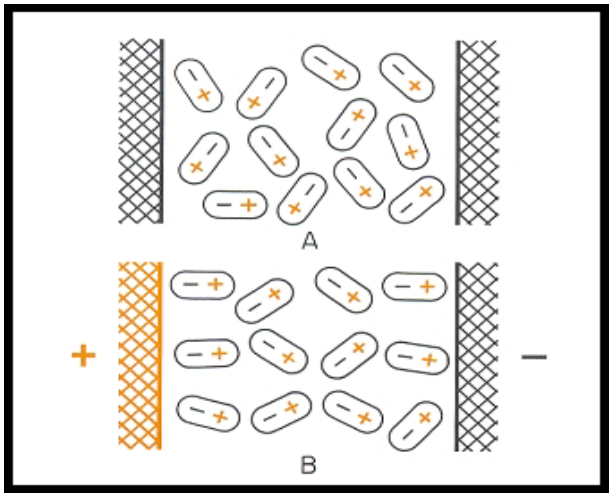


Figura 10

La corriente de conducción en un sistema de aislamiento de poliéster y epóxico bien compactado es cero, al menos que el aislamiento esté saturado de humedad. Sistemas de aislamiento antiguos tales como mica – asfáltica pueden tener una conducción natural o una conducción más alta debido a la conductividad de las capas usadas en la parte trasera de la mica.

La corriente de absorción está hecha de dos componentes, la polarización del aislamiento y la gradual desviación de los electrones y de los iones a través del material aislante. Este material usualmente epóxico, poliéster o asfalto cambian la orientación de sus moléculas con la presencia de un campo eléctrico directo. Esto normalmente toma pocos minutos de voltaje aplicado para que las moléculas sean reorientadas, y así para que la corriente alimentada polarice la energía hasta ser reducida a casi cero. La corriente de absorción, la cual es la segunda componente, es el grado de desviación de los electrones y de los iones a través de un material aislante. Estos electrones y iones son desviados, hasta que son atrapadas en las superficies del aislante, usualmente ubicados en los sistemas de aislamientos rotativos. (Figura 10).

La sección A de la Figura 10 muestra la orientación al azar del aislamiento de las moléculas. Como un voltaje directo es aplicado, por medio del tester MCE, las moléculas comienzan a polarizarse y alinearse, ver sección B de la figura 10. La energía requerida para alinear las moléculas, y luego reducir la cantidad de escape de moléculas, es conocida como corriente de absorción.

Desde que la corriente de absorción sea una propiedad del material aislante y depende de la temperatura del devanado, no puede ser ni buena ni mala. Las corrientes de absorción variarán dependiendo del material del aislante. Antes de 1970, los materiales termoplásticos antiguos usados eran asfalto o barniz, los cuales tienen una corriente de absorción más alta. Después de 1970, el cambio fue hecho a poliéster o material epóxico, los cuales diminuyen significativamente la corriente de absorción. Esto no significa que mientras más moderno sean los materiales aislantes son mejores, porque tienen menos corriente de absorción.

El tester MCE mide la suma de todas las Corrientes, también llamada corriente total y calcula los valores de la resistencia a tierra.

La magnitud de voltaje aplicado debe ser de acuerdo al voltaje de placa al igual que la condición del aislamiento. Esto es importante particularmente en máquinas pequeñas de bajo voltaje donde solo se tiene una capa de aislamiento. Si los voltajes de prueba son muy altos, el voltaje aplicado puede saturar el aislamiento. El tester MCEMAX tiene una salida de corriente baja. La máxima corriente de salida es 1 miliamperio, o 1000 microamperios, pero generalmente el tester solo tiene salida en el rango de microamperios. Esto limita la probabilidad de daño en el aislamiento. Ver Tabla 1 para la aplicación de voltaje recomendado.

Tabla 1
Voltajes DC de prueba recomendados

Capacidad de las bobinas fase-a-fase (v)	Tensión de prueba requerida
< 1000	500
1000 – 2500	500 – 1000
2501 – 5000	1000 – 2500
5001 – 12,000	2500 – 5000
> 12,000	5000 – 10,000

Ref. IEEE Std. 43-2000
Voltaje fase-a-fase para 3 fases en máquinas AC, voltaje fase-a-tierra para máquinas monofásicas y voltaje directo para máquinas DC o campo en las bobinas.

EFECTOS DE LA CONTAMINACION

Existen muchos factores que afectan la resistencia a tierra. La fuga de corriente depende de factores externos, tales como, aceite y carbón sobre el devanado y las ranuras del estator. La corriente de fuga aumenta en rotores de turbinas generadoras y en máquinas DC, debido a que sus superficies robustas son expuestas.

El polvo y la sal sobre el aislamiento, el cual normalmente cuando está seco no es conductivo, puede volverse parcialmente conductivo cuando está expuesto a la humedad y al aceite, y por lo tanto causará aumento de la fuga y de corriente y baja resistencia a tierra.

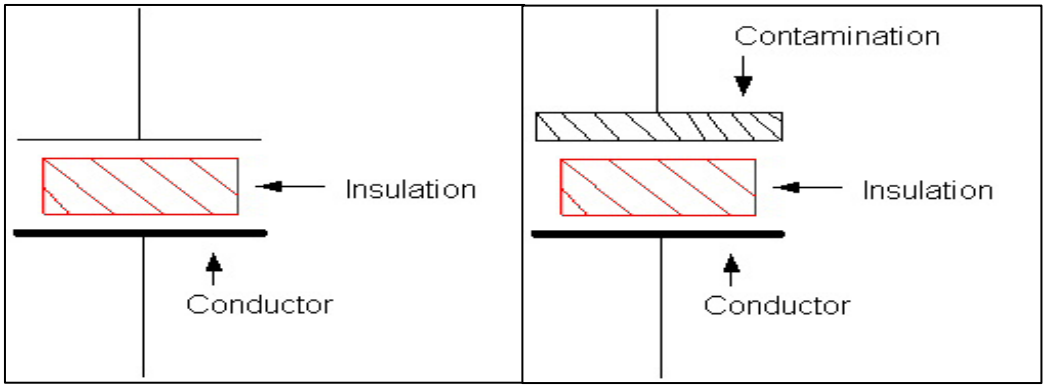


Figura 11 Figura 12

La razón por la cual la capacitancia de un motor aumenta con la contaminación se muestra en la forma como trabaja un capacitor. Dos placas de material conductivo separadas por un material dieléctrico, forman un capacitor. Un material dieléctrico es cualquiera que no pueda conducir directamente corriente eléctrica. Un cable o el devanado de un motor rodeado por su aislante son la muestra de un conductor y su material dieléctrico. La segunda placa está conformada por el centro del estator y el hierro del motor. En esta segunda placa es donde principalmente se que acumula la contaminación. (Figuras 11 y 12).

EFECTOS DE LA TEMPERATURA

Un aumento en la temperatura afecta la Resistencia del aislante y la Resistencia del conductor. Existe un término llamado coeficiente de temperatura **(K_T)**. Un material puede tener un coeficiente de temperatura **K_T** positivo o negativo. Si el material tiene un **K_T** positivo, cuando se aumenta el calor, la resistencia aumentará. Inversamente, si un material tiene un **K_T** negativo, cuando se aumenta la temperatura, la resistencia disminuirá. El cable magnético del estator, ante un aumento de temperatura presenta gran agitación termal y reduce el movimiento de los electrones libre. A causa de esta reducción de movimiento, las mediciones de resistencia aumentarán y por lo tanto, el conductor tendrá un **K_T** positivo. Sin embargo el calor adicional suministrado por la energía térmica, libera electrones adicionales y redice la medición de resistencia. Por lo tanto, un aumento en la temperatura en el aislamiento reduce la resistencia y se conoce como **K_T** negativo. Este efecto de aumento de temperatura afecta a toda la corriente excepto a la corriente capacitiva.

El método recomendado para obtener datos de la Resistencia a tierra versus la curva de temperatura del devanado es realizando mediciones a varias temperaturas todas sobre el punto de rocío, e imprimiendo los resultados en una escala semilogarítmica. Una escala semilogarítmica es el mismo tipo de escala usada para registra la actividad de los terremotos, llamada la escala Richter. El comportamiento del terremoto necesita ser graficado desde loas más pequeños temblores hasta los de magnitud 9, todos son visibles en el gráfico. Sin embargo, los resultados deberían plotearse para ser una línea recta.

Ya que este tipo de impresión del coeficiente de temperatura no es usualmente viable, IEEE ha desarrollado una regla correctiva. Este estándar declara que para evitar los efectos de temperatura en un análisis de tendencia, las pruebas deben ser realizadas cuando el devanado tiene la misma temperatura o cercana a la prueba anterior. Sino los valores de la prueba de aislamiento deber ser corregidos a una base de temperatura común de 40°C.

Test Date	03/11/2002
Test Time	09:42:56 AM
	Baseline
Frequency	1200
Mohm Ph 1 to Gnd	
Charge Time	60
Voltage	500
Motor Temp	30
Measured Mohm	1300.0
Corrected Mohm	650.0
pF Ph 1 to Gnd	22750
ohm Ph 1 to 2	0.06250
ohm Ph 1 to 3	0.06250
ohm Ph 2 to 3	0.06200
mH Ph 1 to 2	1.330
mH Ph 1 to 3	1.400
mH Ph 2 to 3	1.335
Avg. Inductance	1.355
% Res. Imbalance	0.53
% Ind. Imbalance	3.32
$ Power Loss	19.17
Test Location	Bot Fuses LD
MCE #	030548
User	
Notes	No

Figura 13

Por lo tanto las mediciones de Resistencia a tierra deben ser corregidas para propósitos de tendencias y comparación. La medición corregida por temperatura es necesaria porque la temperatura del aislamiento bajo prueba puede variar dependiendo de las condiciones de operación antes de la prueba, las condiciones atmosféricas o la temperatura ambiente. El material del aislamiento tiene un $\mathbf{K_T}$ negativo el cual significa que las características resistivas varían inversamente con la temperatura.

En la pantalla de configuración de la prueba estándar, la temperatura del bobinado es ingresada. El valor en Mohm medido es corregido por temperatura 40ºC. El resultado es el valor en Mohm corregido. (Figura 13).

Medición RTG – Resistencia a tierra
La tendencia de RTG en el tiempo, mantiene el voltaje de prueba y la duración del voltaje aplicando constantes. El único factor que afectará la medición RTG es la temperatura, y por lo tanto, es necesario corregir la temperatura en la pantalla de configuración de la prueba.

Los voltajes de prueba aplicados y recomendados pueden verse en la Tabla 2.

Tabla 2
Voltajes DC de prueba recomendados

Capacidad de las bobinas (v) fase-a-fase	Tensión de prueba necesaria
< 1000	500
1000 – 2500	500 – 1000
2501 – 5000	1000 – 2500
5001 – 12,000	2500 – 5000
> 12,000	5000 – 10,000

Ref. IEEE Std. 43-2000
Voltaje fase-a-fase para 3 fases en máquinas AC, voltaje fase-a-tierra para máquinas monofásicas y voltaje directo para máquinas o campo en las bobinas.

Las mediciones en Mohm corregidas por temperature deben ser grabadas o graficadas para comparar en el tiempo. Si unta tendencia disminuye, busque suciedad o humedad. Una simple medición no tendrá mucho significado con respecto a la salud total del sistema de aislamiento; una medición de 5 Mohm puede ser adaptable si está relacionado a una aplicación de bajo voltaje. Ver tabla para los valores mínimos de resistencia de aislamiento.

Tabla 3
Valores mínimos de Resistencia de aislamiento corregido a 40°C
(Todos los valores en Mohmios)

$IR_{1\ min}$ = kV + 1	Para la mayoría de bobinas fabricadas antes de alrededor de 1970, todas las bobinas de campo y otras no mencionadas más abajo.
$IR_{1\ min}$ = 100	Para la mayoría de las armaduras DC y bobinas AC fabricadas después de 1970 (espiras perforadas).
$IR_{1\ min}$ = 5	Para la mayoría de las bobinas al azar y espiras preformadas clasificadas bajo 1KV

Medición CTG
Durante la medición CTG, el tester MCE aplica una potencia AC entre la fase 1 y la pinza tierra. El circuito capacitivo del sistema de aislamiento es medido. Este valor de capacitancia refleja la limpieza del bobinado y de los cables. La acumulación de la contaminación en el bobinado y en los cables muestra un aumento en la medición de la capacitancia.

La presencia de contaminación, suciedades en el bobinado, en los cables y en el aislamiento producen incremento en los valores de capacitancia. La tendencia en el tiempo de los valores de CTG sin incrementan

indican una acumulación de suciedad y que debe limpiarse. Esto debe ser corroborado con una baja resistencia a tierra y un valor alto de CTG.

Esto es importante porque la suciedad y la contaminación reducen la habilidad del motor de disipar el calor generado por su propia operación, resultando en un prematuro envejecimiento del sistema de aislamiento. Una regla general es que la vida de un motor disminuye en un 50% por cada 10% de incremento en la temperatura de operación sobre la temperatura de diseño del aislamiento. El calor aumenta la resistencia del material conductor y rompe el aislamiento. Estos factores aceleran el desarrollo de aislamiento quebradizo, suministrando caminos para la fuga de corriente a tierra. Los efectos de la temperatura en la resistencia de aislamiento pueden verse en la Figura 14.

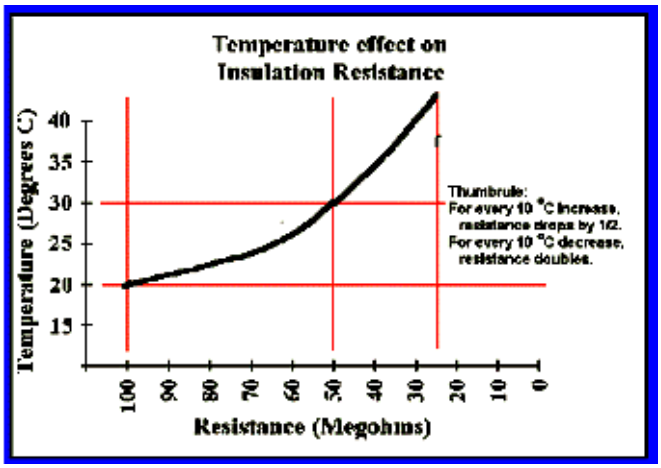


Figura 14

Indice de polarización y absorción dieléctrica

El indice de polarización (PI) y la absorción dieléctrica (DA) son pruebas realizadas por el MCE en un motor desenergizado. Durante las pruebas PI y DA, el tester MCE aplica un potencial DC entre la fase 1 y la tierra durante una cantidad de tiempo predeterminado, 10 minutos para la prueba PI y 30 segundos para la prueba DA. Durante la prueba, mediciones de RTG son medidas cada segundo. Cada 5 segundos el promedio de las 5 mediciones previas es mostrada en el display RTG (Mohmios) versus el tiempo (segundos).

No es necesario hacer una prueba DA si está realizando una prueba IP cuando usted realiza una prueba PI, winvis automáticamente guarda el primer minuto como una prueba DA y el resto de los 10 minutos como una prueba PI. Cuando la prueba es completada, los ruidos para el PI y el AD son calculados.

Tomando la medición RTG a 10 minutos y dividiéndola por la medición RTG a 1 minuto se calcula el PI radio. Tomando la medición RTG a 1 minuto y dividiéndolo por la medición RTG a 30 segundos se calcula el DA radio.

PI radio = 10 min / 1 min
DA radio = 1 min / 30 sec

El propósito de la prueba PI es determinar si o no un sistema de aislamiento de un motor está en buena condición. La prueba PI no está limitada solamente a motores AC. Este aplica también a motores de rotor devanado, máquinas de polo saliente y hasta cierto punto en campos DC. El campo DC tiene conductores que son completamente encapsulados en aislamiento. Por lo tanto, la prueba PI puede ser una prueba que vale la pena para máquinas de múltiples tipos.

Corrección del índice de polarización

Cuando se realice una prueba PI, no es necesario corregir por temperatura. Si la tendencia de la máquina no cambia apreciablemente entre las mediciones de un minuto y la de 10 minutos, el efecto de la temperatura sobre el índice PI es usualmente pequeño. Sin embargo, si el motor se apaga durante una prueba PI, los resultados se incrementarán en la resistencia a tierra. Esto mostraría un alto e inusual PI, la cual debe realizarse de nuevo una vez el bobinado haya enfriado a 40°C o menos.

Interpretación de datos para PI y DA

En gerencia de motores, Richard Nailen, por ejemplo, muestra la siguiente información en la tabla 4 para interpretar los datos PI y DA.

Tabla 4

Prueba	**Inaceptable**	**Aceptable**
PI	1 to 1.5	2 to 4
DA	$\leq$ 1.25	$\geq$ 1.50

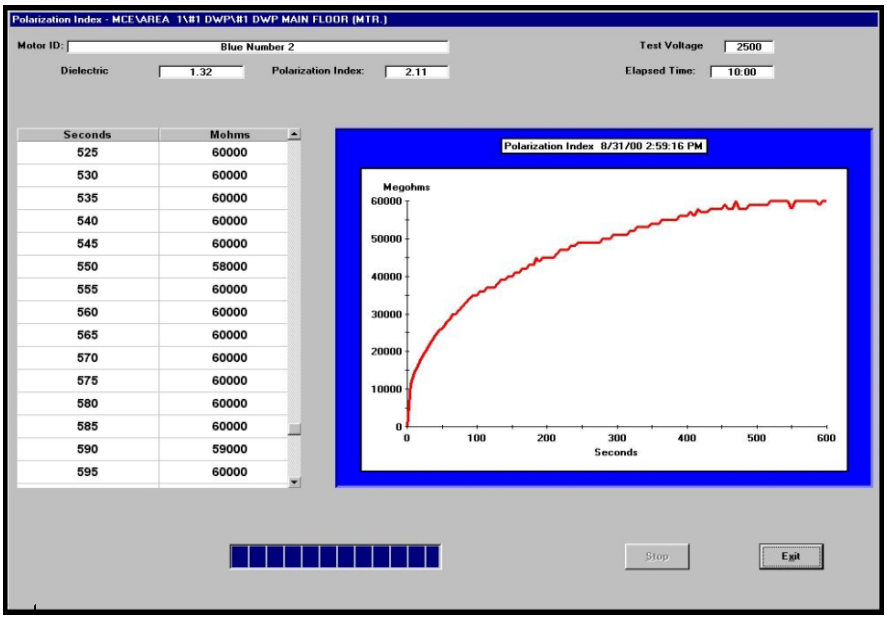


Figura 15

Excelentes resultados deben tener un PI radio de 2 a 4, con el valor más alto que el mínimo RTG y no debe ser un aumento instantáneo en la medición en Megaohmios (Figura 15).

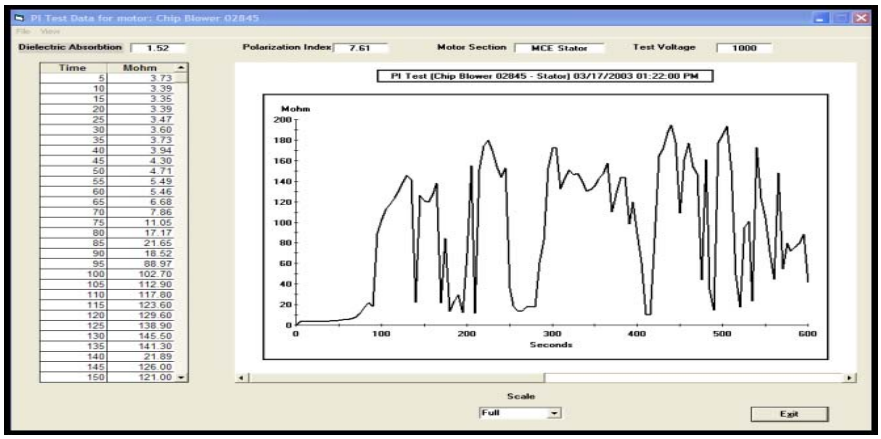


Figura 16

Los valores erráticos de RTG ocurren en cualquier momento durante la prueba, es indicación de transientes de corriente de corto período. Estos aparecen debido a la contaminación o a la humedad. Un aspecto importante de esta situación es que los niveles de los valores RTG caen. El valor mínimo de RTG según IEEE es de 100 Megaohmios para espiras preformadas. El valor RTG está por debajo del mínimo sugerido en la (Figura 16).

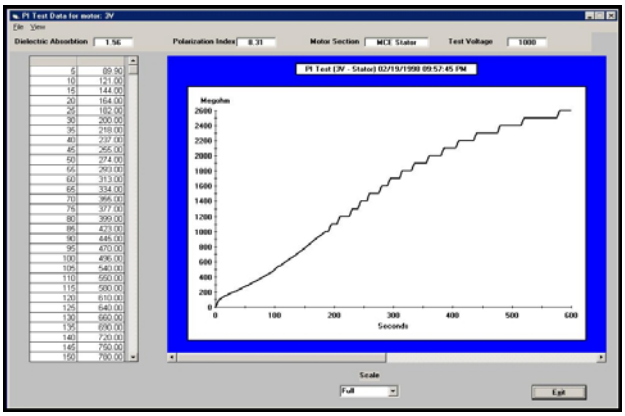


Figura 17

De acuerdo a los principios de motores AC largos de la EASA, declara que el radio PI de ≥ 5 debe ser considerado el resultado de aislamiento seco o quebradizo. Esto puede ser causado por la edad del aislamiento o la operación del motor a una temperatura más alta de la temperatura de diseño (Figura 17).

Las pruebas PI y DA pueden ser usadas como diagnóstico o tendencia, IEEE 42-2000

CONCLUSION

Compare le diferencia de los resultados de las pruebas con MCE y otras tecnologías. Mientras mas información tenga para tomar una decisión de mantenimiento, más seguro y confiable será su decisión. Use todas las tecnologías para maximizar los intentos de solución de problemas. Así como otras tecnologías indican fallas, use el MCE para monitorear y graficar los cambios en la condición del motor.

Parte 4: Estator

La falta de zona de estator es con frecuencia considerada una de las más controversiales debido al desafío significante en detección de fallas tempranas y la prevención de la falla del motor alrededor del bobinado del estator. Este desafío es más intensificado en máquinas de voltaje más alto; donde el daño a tiempo de paro se convierte mucho más corto. La zona de falla estator es conocida como la salud y la calidad del aislamiento entre las vueltas curvas y las fases de la curva individual y enrolladas por dentro del motor.

MECANISMOS DE FALLA

Los mecanismos con mayor probabilidad de falla en un bobinado de estator son espira-a-espira, fase-a-fase o corto de espira a- tierra. Un corto entre espiras es identificado como el de uno de los bobinados de un arrollamiento. Esto puede generar una muy baja impedancia en la red de cables, la cual actúa como un corto en el secundario de un transformador de corriente. Esto resulta en excesivo flujo de corriente a través de la red en corto, creando un intenso calor y daño en el aislamiento. Debido a la naturaleza de un diseño cualquiera de un arrollamiento al azar, un corto en una espira podría ocurrir con una impedancia más alta, permitiendo que el motor funcione durante un extenso período de tiempo antes de que se destruya el arrollamiento por las corrientes altas, como resultado no es usual encontrar motores con devanado al azar operando con malos devanados en el estator. La forma del enrollado no muestra alta impedancia en la espira y por lo tanto se calentará rápidamente continuando con el corto entre espiras. Un corto entre fases es identificado como un corto de una o más fases a otra fase. Esta falla puede ser un daño total debido a la posibilidad de un gran potencial de voltaje entre las fases y la ubicación del corto.

ANALISIS

La gran controversia alrededor de esta zona de falla, es si la tecnología puede dar una amplia y previa alarma impidiendo la falla en el devanado del estator. El gran problema a menudo es el texto " encontrará el MCMAX un corto entre espiras"? cómo se realiza la pregunta. La pregunta debería ser si una tecnología puede prevenir un corto entre espiras. Si usted mantiene para el motor por largo tiempo, este desarrollará un corto entre espiras del mismo arrollamiento, entre fases o a tierra. La meta de cualquier tecnología, es identificar cualquier condición, que conduzca a estas fallas, para que puedan ser corregidas. Si estas condiciones son corregidas, entonces se puede esperar una mayor vida del motor; si un corto entre espiras ha ocurrido, no hay mejor herramienta que el MCE. La mejor prevención es no operar el motor ante este tipo de falla.

MCE Analisis

El MCE aplica en señal AC de alta frecuencia y un bajo voltaje DC al estator para realizar el análisis del estator. De estas señales, la inductancia y la resistencia son tomadas por comparación entre arrollamientos y los datos históricos. Si está probando un motor de inducción AC trifásico, la comparación entre las 3 fases es el mejor método. Si está probando un motor DC, entonces solamente existe una sola fase y allí el método por comparación con los datos históricos o la comparación entre motores idénticos es lo más recomendable. La inductancia es un parámetro altamente sensitivo y está influenciado por muchas variables incluyendo el motor. La condición del rotor, el entre hierro, la construcción de la carcaza (hierro-aluminio), y las condiciones del bobinado son algunas de las variables. La variable de mayor influencia sobre las mediciones de inductancia es la condición del bobinado. Específicamente el número de espiras es un valor al cuadrado en la ecuación de la inductancia, tal como se muestra a continuación:

$$L = \frac{0.4\pi N^2 \mu A \times 10^{-8}}{l}$$

Donde:
- L = Inductancia en hierros
- π = 3,14
- N = Número de espiras
- μ = Permeabilidad del hierro en unidades electromagnéticas
- A = Área del hierro en cm^2
- l = Longitud del hierro en cm

Nuestra meta es prevenir que ocurra un corto entre espiras, la pérdida de una simple espira en el devanado del estator tendrá efectos severos sobre toda la inductancia de una o más fases, dependiendo de la configuración del arrollamiento. En nuestro esfuerzo por encontrar las causas que producen la falla de corto entre espiras, encontramos que las variables presentes en la ecuación de inductancia es de gran ayuda para identificar anomalías que pueden producir daños en el estator.

Las fallas del estator con frecuencia terminan como un corto entre espiras, pero empieza como otra cosa. Un ejemplo es un motor con excesiva vibración, la cual produce movimiento del devanado, fricción y desgaste del aislante entre las espiras del devanado. Otro ejemplo es el defecto de un rotor, el cual genera un calor intenso en la superficie del devanado y debilitamiento del aislante entre las espiras o inclusive una falla a tierra. Los defectos del centro del hierro, así como las laminaciones en corto, también generarán calor, la turbulencia del flujo de aire y una elevada vibración debido al desbalance en el campo magnético y el entre hierro. ¿Qué influencia tienen estos eventos en las inductancias del estator? Además de la vibración, los defectos del rotor y las anomalías en el flujo magnético del entrehierro, tiene un impacto sobre la permeabilidad (μ) del devanado del estator. Los cambios en μ debido a los defectos del centro del estator generarán cambios en las inductancias relacionados al grupo de arrollamientos ubicados cerca de la falla. Los cambios de μ debido a los defectos del rotor, tendrán una variación en la influencia sobre la inductancia del estator cuando cambia la posición del rotor. Una rápida comparación de los valores de la inductancia y el desbalance inductivo entre las 3 fases o de los datos históricos indicarán cambios en estas variables y volver de nuevo a realizar la prueba para prevenir el corto entre espiras.

Análisis EMAX

El análisis del estator usando la tecnología EMAX es realizado, evaluando las relaciones de las fases de voltaje y corriente para cada una de las 3 fases de un motor de inducción AC. Estos valores son usados para determinar la impedancia de cada fase y mostrarlas como un desbalance de impedancia. Las alarmas muestran si el desbalance de impedancia excede el valor base o de referencia. Cualquier cambio en la componente Real o Reactiva de una fase que no es el duplicado de otra fase, indicará un cambio que necesita ser investigado.

Uno de los obstáculos envueltos en este tipo de pruebas es adquirir estos datos dinámicos a una carga suficientemente importante que permita que estos valores sean afectados por la condición del devanado y no del diseño. Un motor sin carga puede funcionar con un desbalance de impedancia. Esto genera variaciones

en la impedancia de fase, la cual duplica los indicios de una falla por estator. Por lo tanto, es importante tener aproximadamente una carga del 70% o más para eliminar el impacto del diseño sobre estos valores. La prueba no debería parar si la carga es menor al 70%, pero usted debe usar las mediciones como valores de comparación solamente. Una prueba a una carga del 50 al 60% comparada con una prueba de la última cuarta parte de una carga del 50 al 60% es aún una prueba muy informativa. Mientras más puntos de medición usted adquiera, más seguro y confiable será la condición del devanado de su estator.

Otra aplicación del EMAX es la habilidad en la adquisición de datos sobre la corriente a través del ciclo de arranque del motor. El motor es insuficiente en la saturación durante su arranque y puede dar muchas indicaciones de problemas desarrollados o problemas existentes. Los defectos del devanado, como las espiras abiertas o en corto, serán identificados como un cambio en la amplitud de la corriente de arranque. La máxima magnitud de la corriente se da en el momento del encendido del motor y ocurre inmediatamente después de que el motor es energizado. Esto ocurre debido a la condición de rotor bloqueado en el momento del arranque. Sin el movimiento del rotor, la fuerza contra electromotriz creada por el rotor al reducir el flujo de corriente en el estator, no existe. De hecho, la corriente de arranque después del encendido del motor no está afectada por la carga. Sin embargo, en un encendido con carga o sin carga, la corriente de arranque será la misma. Solamente el voltaje de línea y la impedancia del circuito tendrán un efecto en la corriente de arranque. La corriente, la cual existe después del arranque inicial es afectada en gran parte por la carga. Si solamente la línea de voltaje y la impedancia del circuito afectarán el valor de la corriente de arranque y esperaremos que la línea de voltaje sea la misma, se debe confiar en la impedancia del circuito como un indicador de la salud del estator. Incrementada la corriente de arranque resulta de un circuito de impedancia más bajo y disminuye en los resultados de la corriente de arranque de un incremento en el circuito de impedancia. Un bajo circuito de impedancia podría ser causado por debilitamiento en el aislante de las espiras o corto entre espiras y un devanado abierto. Las conexiones de alta resistencia o inclusive las reparaciones mal hechas, pueden causar un circuito de alta impedancia. Esta es la Ley de Ohm. Recuerde el significado de las variaciones de la temperatura de una prueba a otra, tendrán un impacto así como a la impedancia de todo el circuito y debería ser considerado en la evaluación de los datos del arranque.

CONCLUSION

Finalmente, es importante recordar que los defectos del estator no existen durante mucho tiempo antes que sea un daño catastrófico. Utilice todas las herramientas disponibles, conozca las circunstancias, y actúe rápidamente para aceptar o rechazar las indicaciones de fallas del estator. Recuerde, que la meta de cualquier tecnología en el análisis del estator es identificar cualquier condición, la cual puede llevar a un corto entre espiras, para que la condición pueda ser corregida antes de que ocurra el corto entre espiras.

Parte 5: Rotor

Encendiendo un motor con las barras rotas en el rotor, causa calor excesivo generado alrededor de la vecindad de las barras rotas. Esto puede propagarse a otras barras del rotor y destruir el aislante alrededor de las placas o laminaciones. Esto también puede afectar a otras partes del motor. ¿Qué podemos encontrar sólo a pocos milímetros de lejos del rotor? El estator! El aislante del estator no puede aguantar el calor intenso desarrollado por las barras rotas del rotor y fallará. Muchas veces las barras rotas del rotor no son fácilmente vistas sin la tecnología y pueden ser la causa de la falla del rotor. Esto puede resultar en un rebobinado y cambio de rodamientos, pero no una reparación del rotor. Cuando el motor vuelve a servicio, tiene el mismo problema y presenta los mismos síntomas junto con el daño del aislamiento.

Diseño del rotor

El diseño del rotor es de gran importancia en la severidad de la identificación de las anomalías del rotor. Si el rotor es un diseño cerrado de barras (Figura 18) la severidad será baja debido a que el rotor de hierro actúa para mantener las barras rotas del rotor en su lugar. Sin embargo, si el rotor es un diseño de barra abierta (Figura 19) entonces la severidad se incrementa significativamente con la identificación de un defecto del rotor. Esta gran preocupación proviene de la posibilidad de que las barras del rotor se sacuden y se mueven hacia afuera de las ranuras del rotor haciendo contacto con el estator.

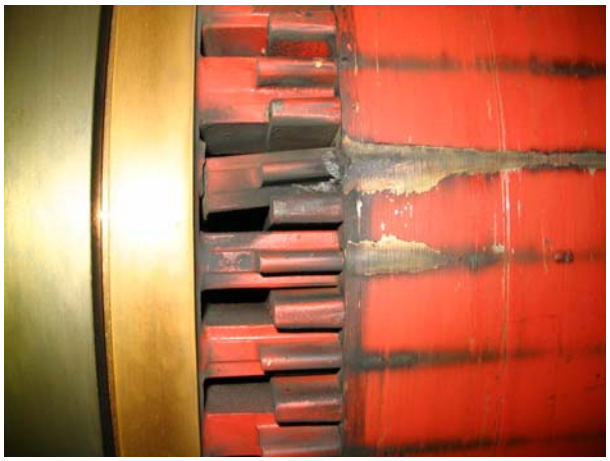


Figure 18

Figure 19

Prueba de influencia del rotor

Un método para probar la condición del rotor es la prueba de Influencia del rotor RIC. ¿Qué es un RIC? El RIC es una prueba realizada por el MCE en un motor de inducción AC, un motor síncrono y en un motor de rotor devanado, los cuales muestran el acople magnético entre el rotor y el estator. Esta relación indica la condición del rotor y el entrehierro con el motor.

El RIC es realizado mientras se rota el rotor en incrementos específicos (determinados por el número de polos) en un solo polo y grabando los cambios de inductancia para cada fase de un motor trifásico. Para una resolución apropiada, 18 medidas de inductancia por polo son recomendados. Para determinar el número de polos en un motor use la siguiente ecuación:

F=NP/120

F: Frecuencia de línea (normalmente 60Hz)
N: Velocidad del motor en RPM
P: Número de polos
Recalculado P=7200/RPM
Ejemplo: Un motor con RPM de placa = 1780
¿Cuántos polos debería tener?
P=7200/178, P= 4 polos

Sin los datos históricos un RIC debe ser realizado para proveer cualquier información acerca del rotor estándar jaula de ardilla. Las fallas así como las barras rotas en el rotor o daños en las láminas pueden darse si el balance de inductancia es bajo. Si está tomando la decisión, basado en la prueba RIC solamente sobre cómo el alto balance de inductancia con respecto a su línea base, podría verse con el tiempo los defectos en las barras del rotor.

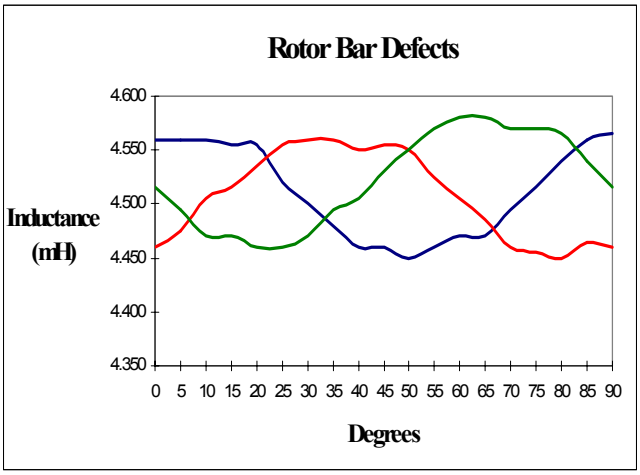


Figura 20

La Figura 20 muestra los cambios de inductancia esperados para un rotor con las barras rotas. Note los valores erráticos de inductancia en el pico de las ondas sinusoidales para cada fase. Las barras rotas del rotor cusan un quiebre en el campo magnético generado y alrededor de las barras rotor. Un motor normal no debería tener una gráfica errática ni quebradiza de la inductancia, como se muestra en la Figura 21.

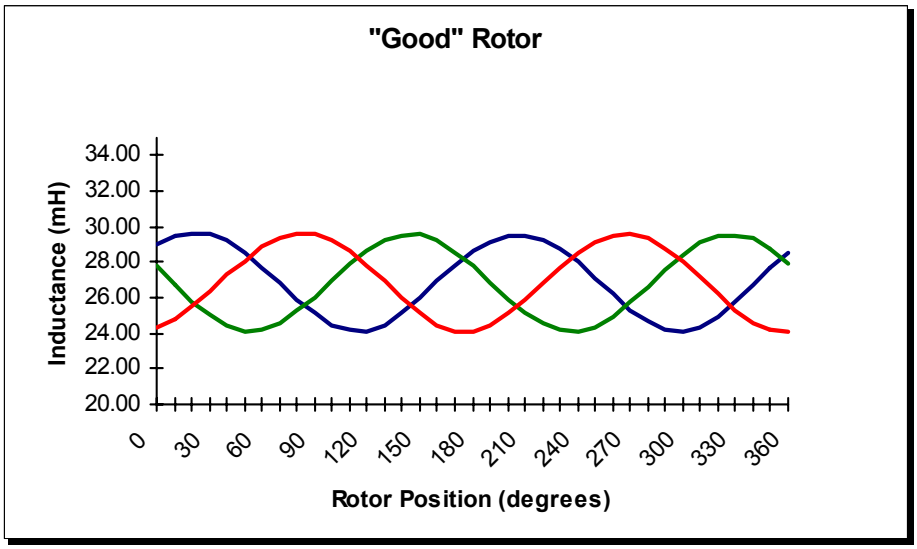


Figura 21

Existen numerosos métodos para la evaluación del rotor con el motor en operación. El Tester EMAX, usando la prueba de arranque, el espectro de la corriente en el dominio del tiempo, el espectro de la corriente y la corriente demodulada ofrecen un enfoque general en el análisis del rotor.

Arranque y encendido

Un método para evaluar la salud del rotor es la prueba de arranque / encendido. Las barras rotas del rotor crean una alta impedancia en el rotor, resultando una impedancia alta reflejada en el estator, y produciendo una caída en la corriente y en el torque. Esto puede ser visto en los ejemplos de la Figura 22, antes y después del arranque.

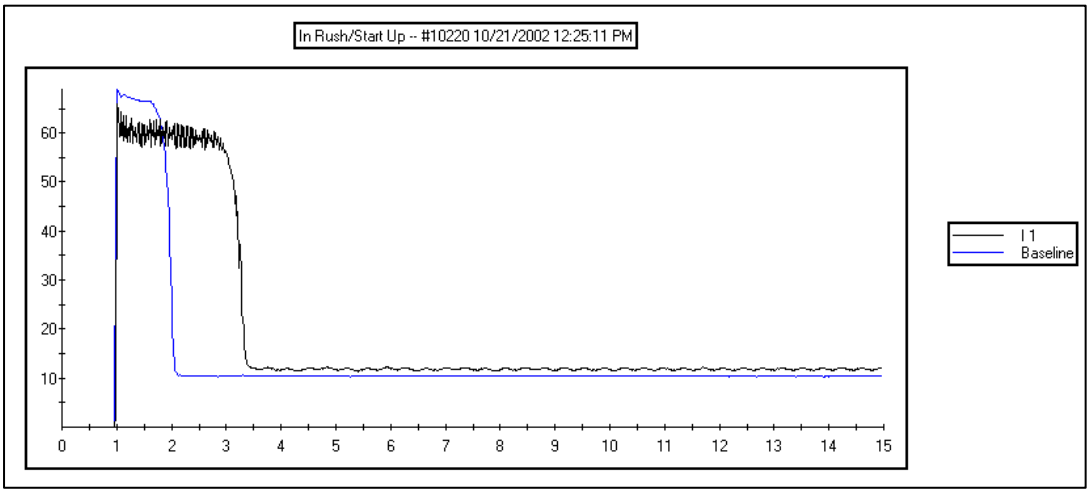


Figura 22

Bandas laterals FP

Otro método es la tendencia de la amplitud de la frecuencia de pase de polos en sus bandas laterales. Incrementando la Fp, la amplitud de las bandas laterales es indicio de una corriente de línea modulando y que está asociada con el deslizamiento del rotor. Esta modulación es debida a una anomalía en la jaula del rotor. Llevando la tendencia de la amplitud de las bandas laterales de Fp y determinando la diferencia de amplitud comparada con la amplitud de la frecuencia de línea, permite una alarma basada en el buen conocimiento de los estándares aceptados por laindustria. La Figura 23 muestra un pico elevado de amplitud de las bandas laterales de Fp sobre los 36 dB, que es la diferencia con respecto a la frecuencia de línea.

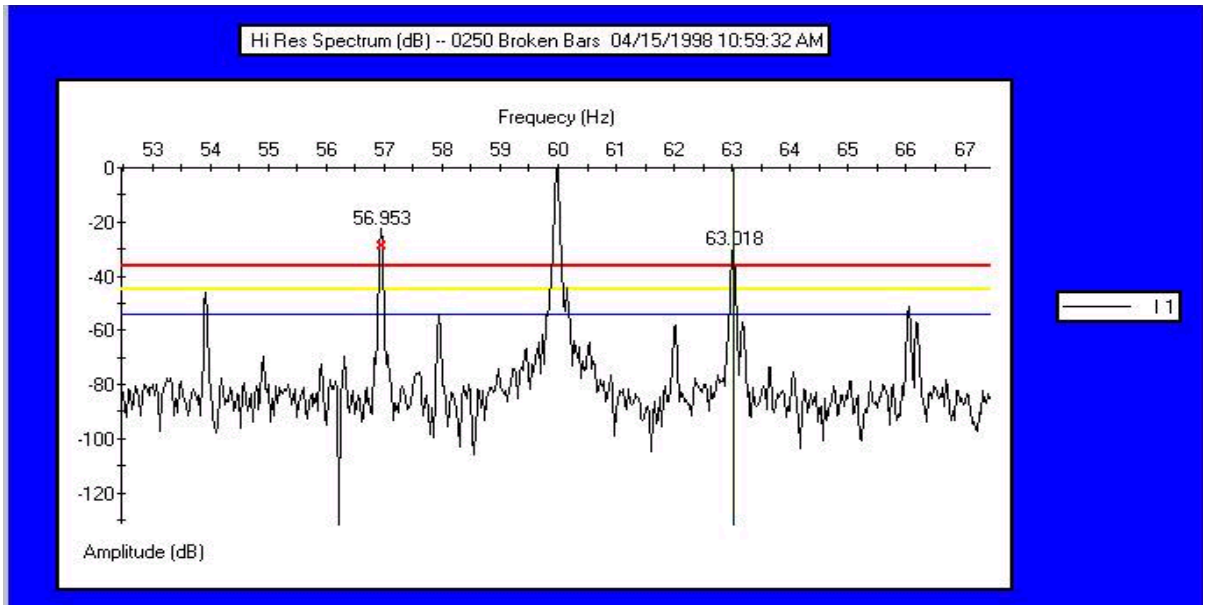


Figura 23

El quinto armónico

El tercer método para evaluar la salud del motor con el EMAX es el análisis espectral a alta frecuencia, algunas veces referido como el efecto remolino. Las barras rotas o agrietadas crean un cambio de fase en el flujo magnético del entrehierro resultando en múltiples bandas laterales Fp por debajo del quinto armónico. La Figura 24 muestra estos picos en las bandas laterales por debajo del pico del quinto armónico.

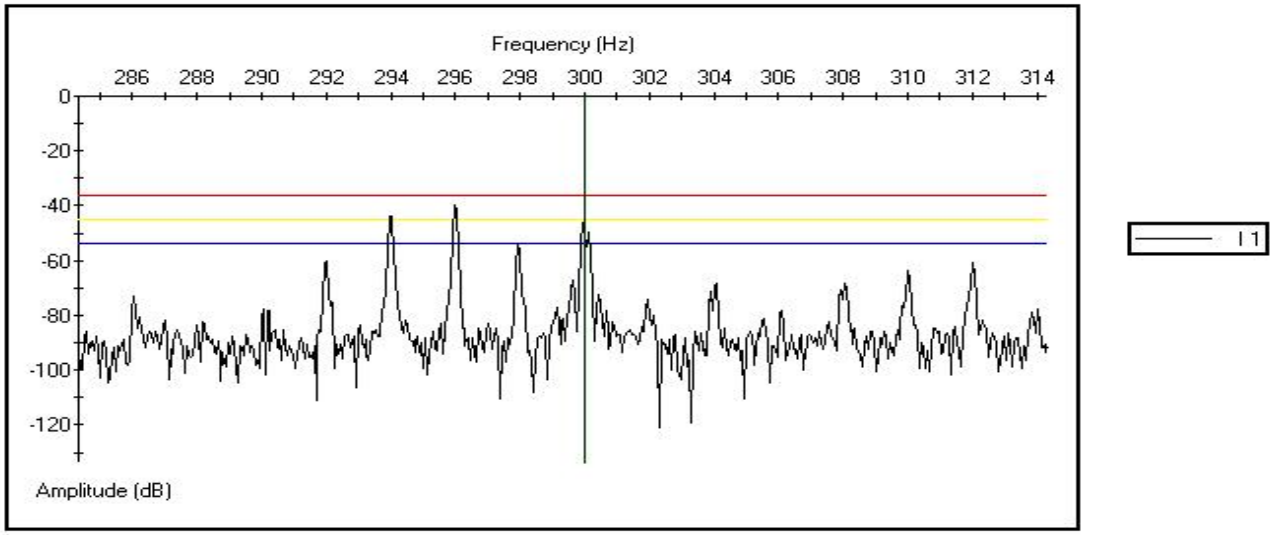


Figura 24

Corrientes de demodulación
El cuarto método para evaluar la salud del rotor con el EMAX es el espectro de la corriente de demodulación. Eliminando del espectro las componentes de la frecuencia de línea, el ruido de la planta cae a un valor, permitiendo mostrar los picos que eran invisibles. Relacionándolo con la salud del rotor, esto permite una vista filtrada de la Fp en un espectro demodulado. La Figura 25 muestra el pico Fp excede una alarma que ha sido predeterminada. Este pico estaba asociado con una barra de rotor rota en un motor de 2 polos.

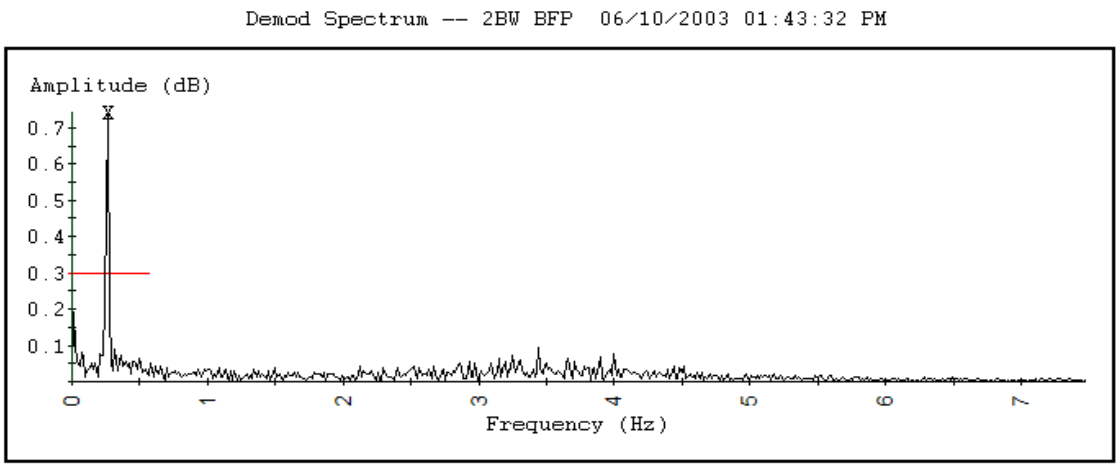


Figura 25

CONCLUSION
En un estudio financiado por el instituto Electric Power Research, el 10% de las fallas del motor eran causadas por anomalías en el rotor. Esto equivale a un número de motores en un promedio de tamaño de planta iguales. Es importante tener cuidado en el diseño del rotor, utilizar el espectro general de los métodos de inspección discutidos anteriormente para confirmar y extender la vida de su motor, arreglando la causa raíz del problema y no el síntoma.

Parte 6: Entrehierro
La zona entrehierro describe el espacio entre el rotor y el estator. Excentricidad del entrehierro es una condición que ocurre cuando el espacio entre el rotor y el estator no es uniforme. Debido a esta excentricidad, hay una variación del flujo magnético en el entrehierro creando desequilibrios en el flujo de corriente, los cuales pueden ser identificados en el espectro de corriente. Este desnivel afectará los resultados de la prueba RIC (Chequeo de influencia del rotor).

- **Excentricidad estática** ocurre cuando el centro del eje está en constante desalineamiento con la línea centro del estator. Ejemplo una polea deslineado
- **Excentricidad dinámica** ocurre cuando la línea central del eje está en variable desalineamiento con la línea centro del estator, tal como suceden cuando hay un rodamiento desgastado.

FALLAS MECANICAS
Por definición, excentricidad del entrehierro es una falla mecánica del motor. Posibles consecuencias severas se generan por estas variaciones de distancia entre rotor y estator. Pueden ocurrir cinco tipos básicos de excentricidad:

- El rotor O.D. es excéntrico al eje de rotación
- Es estator es excéntrico al eje de rotación

- El rotor y el estator forman circunferencias perfectas, pero no tienen el mismo eje de rotación.
- El rotor y el eje describen perfectas circunferencias, pero no tienen el mismo eje de rotación.
- Alguna combinación de las anteriores.

Las siguientes son solo unas de las posibles causas de excentricidad del entrehierro:

El inapropiado montaje del motor puede llevar a una desuniformidad del entrehierro. Un perno o tornillo suelto permitiría un desajuste durante la expansión térmica de la carcaza. Lo cual con el tiempo, podría provocar deterioro del chasis y posible excentricidad del estator. El término comúnmente usado para describir que un motor está mal montado es "pie-flojo".

Durante la construcción del motor, una malformación de la característica redonda del rotor o el estator causará excentricidad en el entrehierro. Estándares industriales recomiendan que las mediciones para indicar total redondez (TIR) deberían ser usadas para las diferentes ubicaciones a lo largo de cada uno de estos componentes. Acoplando estas medidas, a las formas circunferenciales de cada componente y dependiendo de la velocidad y tamaño del motor, se recomendará tolerancias de 5 a 20% en la variación del entrehierro.

La excentricidad puede desarrollarse debido a la tensión inapropiada de las correas acopladas al eje del motor. Un cliente que trabaja con el personal de soporte técnico de PdMA comentó que mientras estaba destensionando correas midieron una desviación del eje del motor. El eje se movió por encima de 1/8 de pulgada! La alineación inapropiada podría llevar a una situación similar y además arquear el rotor.

Correas desalineadas, rodamientos desgastados, o un eje torcido provocan excentricidad. Durante la fabricación del rotor, podrían introducirse tensiones mecánicas desiguales en la jaula o en el apilamiento laminar que llevan a desviación del rotor.

Excentricidad en el entrehierro da como resultado incrementos en los niveles de vibración debido a las desigualdades magnéticas creadas entre rotor y estator. Con el tiempo, estos elevados niveles de vibración pueden resultar en excesivo movimiento del devanado estator, el cual provocará incremento de fricción y eventualmente falla entre espiras o tierra. Adicionalmente esta vibración puede acelerar falla en rodamientos la cual puede desviar el eje y sobrecalentar los devanados o fricción adicional entre rotor y estator. Un desequilibrio magnético aplicado al rotor y un incremento en las vibraciones contribuirá a pérdidas mecánicas desarrolladas en el motor. Algunas de estas situaciones generarán fallas catastróficas, las cuales podrían requerir un completo rebobinado o una posible restauración del hierro.

ANALISIS

La manera más fácil para el análisis de excentricidad es recolectar datos. Confirmando estos datos mostrados y decidiendo que hacer con ellos. Esto puede funcionar para alguna de las zonas de falla pero no hay un estándar absoluto para indicar excentricidad, con la excepción de una medida física del espacio del entrehierro. Sin embargo, una vez que el número de las barras del rotor es confirmado, PdMA establece guías y puntos de alarma para ayudar a la toma de una buena decisión. Esto puede ser reflejado por los resultados del chequeo de influencia del rotor (RIC). La gráfica indica la presencia de excentricidad pero sin resultados históricos para comparar, usted no puede determinar realmente cuanta excentricidad ha desarrollado y si esta empeorará con el tiempo.

Análisis MCE

El análisis de excentricidad usando la prueba RIC del MCE mostrará satisfactoriamente la solución del problema. Sin embargo sin una prueba base, la medida del RIC no dará indicaciones definitivas de excentricidad.

El análisis de un RIC se hace evaluando el gráfico de inductancia de fase a fase para lo siguiente:

Escala: Sinusoidal Si/No?
Alineación: Excentricidad

Características: Rotor dañado
Inductancia pico a pico: Excentricidad o estator

Cortos entre fases o entre espiras causará una separación de las gráficas sinusoidales trifásicas. El resultado será un modelo de "dos arriba/ una abajo" o "una arriba/ dos abajo". Este modelo depende de la configuración de los bobinados (y o delta).

La excentricidad del entrehierro afecta la alineación del gráfico y los valores de inductancia de cresta a cresta por fase. Estas variaciones de cresta a cresta ocurren en cada fase o entre fases, dependiendo del tipo de excentricidad. Si esta excentricidad es estática, se puede obtener picos iguales de un polo a otro sobre la misma fase, pero serán diferentes con respecto a la amplitud de los picos de las otras fases. Si existe excentricidad dinámica la magnitud de los picos de un polo a otro de la misma fase serán diferentes. En un motor de cuatro polos, el rotor está posicionado a 90º entre polos. Cuando la prueba RIC está en funcionamiento, el software WinVis usará los datos de placa del motor para terminar el número de polos y así informar al operador cuantos grados necesita girar el rotor para realizar la prueba.

Embobinado Concéntrico vs. Plano

Una consideración importante cuando se evalúan los datos obtenidos es saber si el motor es concéntrico o plano. Si un motor es de devanado concéntrico, este es construido con un desfase entre los devanados de estator y rotor.

El motor de devanado concéntrico que se puede ver en la Figura 26 tiene los devanados del estator insertados dentro de las ranuras en forma de canasta o apilamiento. Normalmente todos los polos se agrupan por fase. Esto produce una distancia mayor entre el arrollamiento de la fase A y el rotor, que la distancia entre el arrollamiento de la fase C y el rotor. Lo que resulta en un escalón natural entre fases como se puede ver en la Figura 27.

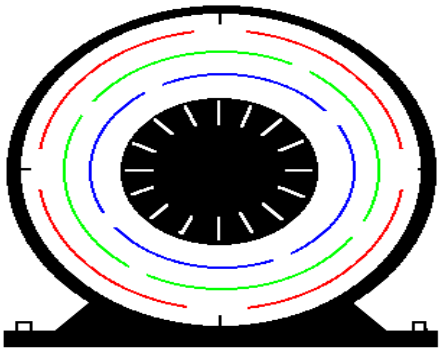


Figura 26

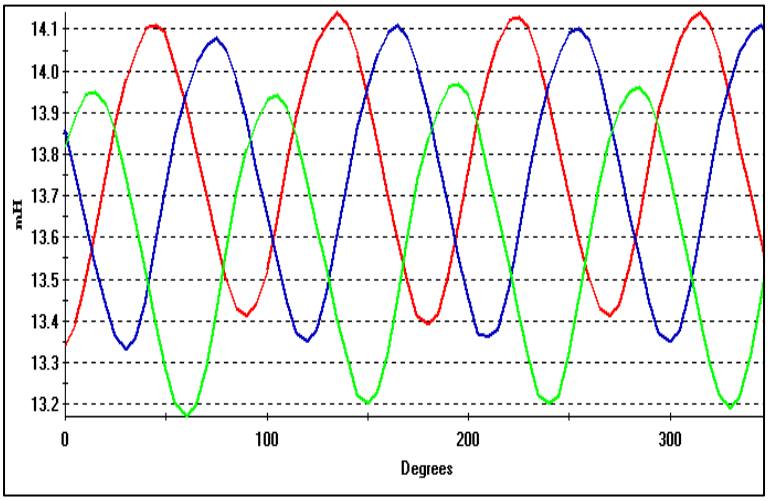


Figura 27

Los motores de devanado concéntrico por su diseño crean un RIC que muestra como si hubiera excentricidad, tal como lo muestra la Figura 27. Note que las amplitudes de los picos de una sola fase son básicamente iguales, pero diferentes a las amplitudes de las otras dos fases, las cuales están ligeramente por debajo.

En un caso donde se identifica o se sopecha que el motor es de devanado concéntrico, ponga el motor en observación y confirme la aparente excentricidad con análisis EMAX o análisis de vibraciones.

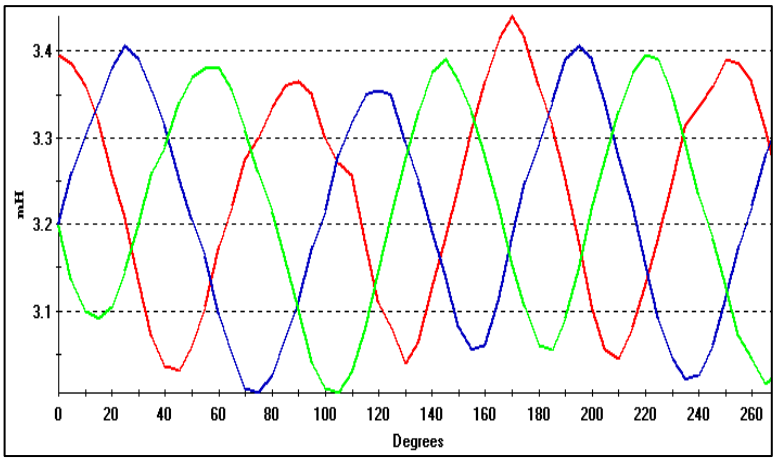


Figure 28

La Figura 28 muestra un ejemplo de excentricidad dinámica. Note como las amplitudes de los picos de la fase azul varían de un polo a otro mientras el rotor es girado. Esto ocurre para cada una de las tres fases. La excentricidad dinámica es el tipo más severo debido a la fricción entre el rotor y el estator.

Análisis Emax

El análisis de excentricidad que usa la tecnología Emax, lo hace atravez del espectro de alta frecuencia. Cuando hay excentricidad en un motor, el flujo magnético en el entrehierro será desbalanceado, causando diferentes niveles de voltaje inducido sobre el rotor, lo cual generará un flujo irregular de corriente en este y variación de los niveles de fuerza contraelectromotriz sentidos por el estator, produciendo allí, cambios en la amplitud de la corriente similar a la situación de variaciones en la carga. Al mostrar la corriente en un espectro, las modulaciones pueden ser vistas como bandas laterales alrededor de una frecuencia conocida como frecuencia de excentricidad (FECC). Esta FECC, es el número de barras del rotor multiplicado por la frecuencia del eje (RPM/60). Las modulaciones de corriente son vistas como picos en el espectro, los cuales serán la primera y tercera bandas laterales de la frecuencia de línea. En un sistema a 60Hz aparecerán cuatro picos, distanciados a 120Hz y no sincronizados con la frecuencia de línea. Estos picos son vistos en la Figura 29.

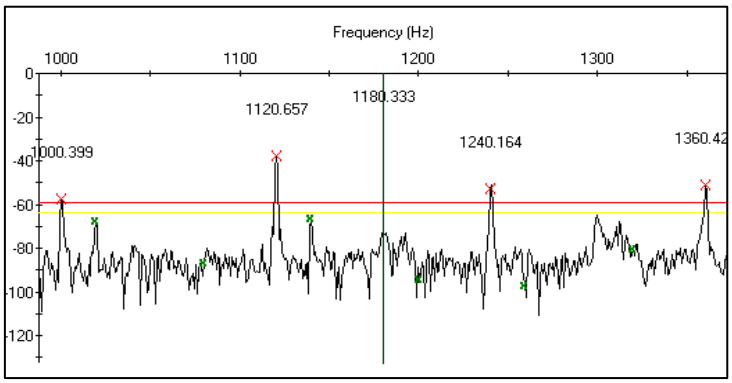


Figure 29

Las X`s grandes indicant los picos relacionados con la excentricidad . Los picos más pequeños indican armónicos de la frecuencia de línea. El cursor vertical está localizado a 1180Hz, la cual es la frecuencia de excentricidad, previamente definida como el producto entre el número de barras del rotor y la frecuencia de eje.

Una ventaja que ofrece el Emax es que el técnico puede usar puntos de alarma para estimar la severidad de la excentricidad. Sin embargo, la velocidad y las barras del rotor son información necesaria para que el técnico pueda confirmar que los picos identificados en el espectro son reflejo de excentricidad. Si el número de barras y la velocidad son conocidos, el software Win Vis automáticamente marca con "X" de color roja, los cuatro picos que indican la excentricidad. Para obtener la velocidad del análisis espectral avanzado (ASA) de demodulación de corriente se hace la prueba del rotor a baja/alta resolución o con luz estroboscópica de manera sencilla. El conteo de las barras, sin embargo es otra cuestión. En la primera oportunidad de reparación usted debe verificar

este conteo, además del número de ranuras. También se puede asistir con el departamento de vibraciones, el cual probablemente ha identificado previamente estos números.

CONCLUSIÓN

Excentricidad en el entrehierro desarrollará un desbalance de flujo magnético entre el estator y el rotor durante la operación. Este desbalance llevará a incremento en las vibraciones, desgaste mecánico y posiblemente fricción entre rotor y estator. Es importante tener un equipo que proporcione la información necesaria para tomar las decisiones de mantenimiento acerca de la severidad de la excentricidad. El MCEMAX proporciona fácil evaluación durante el funcionamiento o desenergización del motor. Con la capacidad de la prueba RIC y el análisis espectral de frecuencia, el MCEMAX combina prueba estática y dinámica para proveer un análisis mas comprensivo de esta zona de falla, el entrehierro.