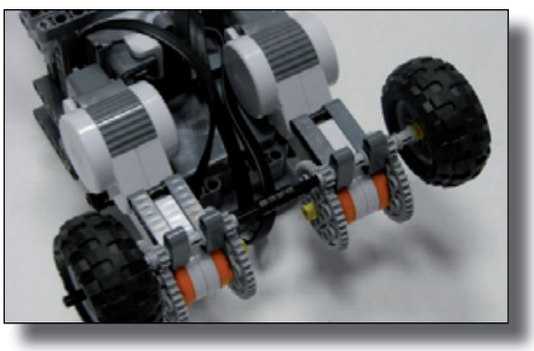
Los motores eléctricos de tracción ferroviaria. Características y técnicas de mantenimiento del sistema eléctrico



Marcelo Pérez-Alonso* Dr. Ingeniero Industrial
Daniel Moriñigo-Sotelo** Dr. Ingeniero Industrial
Óscar Duque-Pérez** Dr. Ingeniero Industrial

* INTEGRIA- RENFE. Dirección de Servicios de Ingeniería. Calle Antonio Cabezón, s/n - 28034 Madrid. Tfno: +34 913 009807. marcelop@renfe.es
** UNIVERSIDAD DE VALLADOLID. Escuela de Ingenierías Industriales. Dpto de Ingeniería Eléctrica. Paseo del Cauce, s/n - 47011 Valladolid. Tfno: +34 983 184407. morinigo@eis.uva.es; duque@eis.uva.es.

Recibido: 01/10/2010 • Aceptado: 05/05/2011

Railway traction electric motors. Characteristics and techniques of electric system maintenance

ABSTRACT

• Due to their operating characteristics, continuous speed control and their reversible performance, traction motors can be considered a specific class among industrial electric motors. They are subjected to significant thermal, electrical, mechanical and environmental stresses and the increasing demand for security and reliability and the reduction of costs demand specific manufacturing requirements somehow different from other electric motors. Moreover, the development of high speed railways around the world increases the requirements on the electrical machine.

These new requirements on the design and manufacturing of traction motors have a significant impact on their maintenance and repairing. Consequently, this paper deals with the requirements that a modern repair workshop must fulfill, stressing the need for personnel specialization and for the use of the most advanced technology in maintenance and repairing. Due to space limitation, the paper describes with more detail the issues related to the insulation material, since it is the motor component most stressed in operating conditions and accounts for a great percentage of the total number of faults.

• Key words: Maintenance, traction motors, electric motors.

RESUMEN

Por sus características de explotación, su control continuo de velocidad y su funcionamiento reversible como motor y generador, y por el hecho de funcionar "embarcados" y prácticamente a la intemperie, los motores de tracción pueden considerarse una clase específica dentro del conjunto de los motores eléctricos industriales.

El motor de tracción, durante su explotación, se encuentra sometido a esfuerzos térmicos, mecánicos, eléctricos y ambientales elevados que, unidos al incremento en las exigencias de fiabilidad y seguridad y a requerimientos de coste optimizado, conforman un conjunto de circunstancias que hacen que la construcción del motor de tracción obedezca a criterios diferentes, hasta cierto punto, de los utilizados en otros motores industriales. Es más, la gran relevancia que en estos últimos años ha adquirido la denominada "alta velocidad" ha supuesto nuevas exigencias.

En consecuencia, las demandas sobre el diseño y la fabricación se transmiten sobre el mantenimiento y reparación de los motores. En este artículo se trata sobre las técnicas, requisitos y procesos que debe tener un taller moderno ocupado en reparar y mantener este tipo de motores, incidiendo en la necesidad de especialización de su personal y en la aplicación de las técnicas de reparación y mantenimiento más avanzadas. Por razones de espacio se ha dado importancia a los procesos de ensayo del sistema aislante, por ser éste el elemento del motor que soporta los mayores esfuerzos y que se refleja en el mayor porcentaje de averías.

Palabras clave: Motor de tracción, mantenimiento, motores eléctricos.

1. LOS MOTORES DE TRACCIÓN. CARACTERÍSTICAS

Tradicionalmente el motor que se utilizaba en tracción era el motor de corriente continua debido a la facilidad del control de velocidad y a su elevado par de arranque. En un principio se utilizaban equipos

"convencionales" a base de contactores, resistencias, etc. Posteriormente, con el avance de la electrónica de potencia, el desarrollo de semiconductores de mejores características y las nuevas técnicas de control, el motor de corriente continua se ha ido sustituyendo por motores de inducción con el rotor de jaula (reduciendo peso, mantenimiento y costes al carecer de colector y escobillas), con una etapa histórica intermedia en que se utilizaban convertidores *chopper* conjuntamente con los motores de continua y el uso de motores síncronos, particularmente en Francia y España en la serie 100 de AVE. Aunque todavía quedan en funcionamiento un número considerable de motores de corriente continua, actualmente en Europa prácticamente todo el nuevo material rodante ferroviario, tanto convencional (cercanías, mercancías y largas distancias) como de alta velocidad, porta motores de corriente alterna.

El motor de tracción precisa de un control continuo de velocidad, con condiciones variables de carga, y debe ser reversible, devolviendo energía a la red cuando se produce el frenado regenerativo (o bien utilizando un frenado reostático, consumiendo la energía generada). Esto exige equipos auxiliares de control y potencia importantes que interaccionan con el motor y que, a su vez, condicionan su funcionamiento y protección y que son susceptibles de averiarse. Por otra parte, el motor de tracción, como parte de los sistemas que embarcan los vehículos, debe tener un peso limitado y, especialmente, el menor volumen posible.

Por las condiciones específicas de funcionamiento y los esfuerzos a que se encuentran sometidos, los motores de tracción poseen unas características específicas que les diferencian del resto de motores. No obstante, cometeríamos un gran error si suponemos que el conjunto de motores de tracción es un conjunto homogéneo. Es más, su diseño y construcción ha cambiado mucho en los últimos 25 años, debido principalmente a:

- Exigencias de mayores velocidades. Incorporación de la alta velocidad.
- Diferentes formas de funcionamiento provocadas por la necesidad de mayor fiabilidad, confort y seguridad.
- Evolución de los materiales utilizados en los motores de tracción, particularmente en los aislamientos.
- Rápido desarrollo de la electrónica de control y potencia. Disponibilidad de semiconductores de potencia con mejores prestaciones.

En cuanto a la severidad de los esfuerzos a que se encuentran sometidos los motores de tracción (Tabla 1), en general, deben soportar mayores solicitaciones mecánicas, térmicas y ambientales que el resto de motores y, aunque las solicitaciones eléctricas no son muy elevadas (inferiores a los 3 kV), al estar accionados mediante convertidores estáticos, sufren los efectos de los elevados gradientes de tensión originados por la conmutación de los semiconductores de potencia. Además, debido a las altas frecuencias de conmutación, se producen ondas reflejadas que suponen la presencia de picos de tensión sobre el motor que pueden alcanzar tres y cuatro veces el valor de la tensión de salida del convertidor. También habría que considerar el paso de corriente por los rodamientos debido a las elevadas tensiones en "modo común" que se producen con los convertidores, la mayor presencia de armónicos (mayores pérdidas y menor rendimiento) y las pulsaciones de par en el eje.

Estos esfuerzos inciden especialmente sobre la vida del aislamiento, manifestándose este elemento como el más débil del motor y, en consecuencia, el menos fiable. Aunque no existen datos contrastados sobre la distribución de averías en los motores de tracción, nuestra experiencia nos permite considerar que, actualmente en España, el porcentaje de averías del aislamiento en los motores de tracción asíncronos es del orden del 80% del total. Hay que tener en cuenta que el aislamiento se encuentra sometido a especiales requerimientos debidos a:

- Elevada relación cobre/aislamiento en los devanados del estator.
- Diseño para soportar un frecuente y elevado gradiente eléctrico (superior a 3 kV/mm), consecuencia del uso de motores accionados por convertidores electrónicos.
- Resistencia térmica elevada (tipo: H, 200 y superior).
- Buenas características mecánicas debido principalmente a la elevada vibración a que se encuentra sometido, transmitida desde el propio motor, otras máquinas montadas en el tren y vibraciones y choques transmitidos desde la vía.
- Buena resistencia a los agentes ambientales (diferencia de temperatura, agua, nieve, partículas metálicas, polvo, aceite, ambientes salinos, etc.).

Esfuerzos Motores	Térmicos (clase)	Mecánicos (ponderación)	Ambientales (ponderación)	Eléctricos
Baja Tensión	F, H	1	2	< 1 kV
Alta Tensión	F, H	2	1	100 kV
	H, 200	3	3	< 3 kV

Tabla 1: Clasificación de los esfuerzos a que se encuentran sometidos los motores de tracción

2. MANTENIMIENTO DE LOS MOTORES DE TRACCIÓN

El mantenimiento de los motores de tracción ferroviaria se caracteriza por la gran variedad de material existente, motores de corriente continua y de corriente alterna, con potencias que oscilan entre los 100 kW empleados en metros y tranvías a los 1,8 MW (máximos utilizados en locomotoras dedicadas al transporte de mercancías y con tensiones desde 0,5 kV hasta 2,6 kV c.a.), así como por la diversidad de tecnologías y materiales utilizados en su fabricación. La necesidad de conseguir una buena relación entre cobre/aislamiento demanda espiras y bobinas con varias capas

de aislamientos de última tecnología y una geometría muy ajustada, núcleos de chapas magnéticas de acero al silicio, rotores de barras con geometrías especiales y materiales de altas prestaciones, carcasas con mecánica de tolerancia muy precisa, rodamientos aislados de elevada calidad, etc.

En consecuencia, la reparación necesita en primer lugar disponer de documentación completa de los motores, de medios técnicos suficientes (instalaciones, aparamenta y equipos de ensayo) y personal muy especializado, que asegure una buena reparación y ofrezca una garantía y confianza suficiente.

El equipo humano debe tener distintos grados de cualificación, desde operarios muy especializados (bobinadores, personal de pruebas) hasta personal auxiliar, pero, en general, la cualificación debe ser media con continuos cursos de formación para reciclaje, siendo el número de operarios función de las dimensiones del taller y de la carga de mantenimiento. Es necesario además contar con una sección de ingeniería de mantenimiento.

Las medidas de seguridad son las normales para el trabajo desarrollado. Hay que tener en cuenta que en distintos puntos se trabaja con tensiones que pueden llegar a los 10000 V y que el peso de los motores supera en muchos casos las 2 Tm. También se realizan ensayos dinámicos en los pueden rodarse los motores a más de 4000 rpm.

El mantenimiento puede realizarse todo en un mismo taller o efectuarse subcontrataciones de trabajos específicos. Es muy común que un taller gestione todo el mantenimiento del motor y utilice otros talleres de menores dimensiones para trabajos que no requieren excesiva especialización (por ejemplo desguaces de bobinas) o que demande trabajos específicos (por ejemplo fabricación de bobinas en forma de kit). Esta cuestión, como las anteriores es muy variable y no pueden establecerse pautas generales.

Además, las empresas de reparación deben disponer de un sistema de control de calidad y una oficina técnica que documente las reparaciones, interprete los diagnósticos y haga seguimiento de los motores para obtener una retroalimentación de la información del comportamiento del motor durante su explotación.

Con las limitaciones de espacio obvias, vamos a continuación a señalar aquellos procesos y ensayos que se consideran más importantes en la reparación de los motores eléctricos de tracción.

3. TAREAS PREVIAS A LA REPARACIÓN. LIMPIEZA Y DIAGNOSIS

Cuando el motor llega al taller de reparación debe realizarse una completa diagnosis del estado del mismo. Aunque esta es una tarea generalmente exigida por los clientes, debe de tenerse en cuenta que no sólo ha de servir para realizar un presupuesto del coste de la reparación, sino para recabar datos de la explotación del motor, eliminar puntos débiles y mejorar la reparación.

El motor de tracción, como consecuencia de las condiciones de explotación, suele llegar a los talleres muy sucio (es frecuente la presencia de aceite en la zona de cabezas de bobinas). La suciedad afecta de forma notable al funcionamiento del motor por lo que es imprescindible conseguir una muy buena limpieza del sistema aislante.

La limpieza de la parte activa se realiza mediante lavado de agua con detergente, en un proceso similar al expuesto en la Tabla 2. Deben utilizarse agentes neutros (probados y homologados), cuidando la presión y temperatura de los líquidos aplicados. Si se hace de otra forma, es muy probable que a la vez que se elimina la suciedad también se elimine parte del aislamiento. Como primer paso se recomienda un soplado del motor con aire comprimido, siempre que no haya presencia de aceite, enfocado principalmente a limpiar los conductos de ventilación del motor.

Si la limpieza con detergente y el enjuague posterior con agua no son suficientes, debe aplicarse un disolvente utilizando pincel, rociando, etc. (máximo 10 minutos). A continuación debe secarse con trapo o efectuarse un lavado con detergente. Sólo deben utilizarse disolventes libres de halógenos y tener precaución de que los disolventes utilizados no sean incompatibles con la resina aislante utilizada, particularmente en el caso de aplicar silicona.

3.1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL AISLAMIENTO

Durante la reparación del motor, en distintos puntos del proceso, es necesario evaluar el estado del aislamiento, comprobando que se encuentra en buenas condiciones y que puede realizarse la siguiente secuencia de tareas. Así se pueden hacer ensayos de aislamiento en la recepción del motor, después de su limpieza, para tomar decisiones de las operaciones que se van a realizar (ninguna, reimpregnación, rebobinado, etc), al recepcionar bobinas nuevas, después del montaje de las bobinas en ranuras, antes de la impregnación

Procedimiento	Temperatura (ºC)	Sobrepresión (bar)	Tiempo (min)
Soplar con aire comprimido	-	Máximo 5 bares	-
Prelavado con agua o agua y detergente, disolver la suciedad y eliminarla	80 -90	0,5 – 5	5
Lavado principal con agua y detergente	80 -90	0,5 - 5	5
Enjuague con agua o con agua y aditivos anticorrosivos	80 -90	0,5 - 5	5
Secado en horno o autoclave	110 80	- Vacío 1 mbar »	24 horas 3 – 6 horas

Tabla 2: Proceso de limpieza de un motor de tracción.

para comprobar su limpieza y eliminación de la humedad, después de la impregnación, después del conexionado final y después de las pruebas dinámicas como control de calidad, etc.

Podemos distinguir entre dos tipos de pruebas de acuerdo con su propósito:

- Verificación del aislamiento a masa.
- Verificación del aislamiento entre espiras, devanados o fases.

3.2. ANÁLISIS DEL AISLAMIENTO A MASA

Los métodos de análisis del aislamiento en máquinas eléctricas superan ampliamente la decena. Entre ellos deben utilizarse aquellos que mejores resultados proporcionen dentro de la simplicidad de su aplicación y garantía de resultados, teniendo en cuenta que no todos deben realizarse de forma conjunta cada vez que se evalúa un aspecto del aislamiento. Resultan indispensables la medida de resistencia a masa, el índice de polarización (IP) y la capacidad del aislamiento, además de las pruebas denominadas de sobretensión (HIPOT, *HIgh POTential*); junto a ellas es muy recomendable realizar medidas de la tangente de delta (o factor de disipación).

Por razones de espacio, vamos a tratar superficialmente algunas cuestiones de interés de estos ensayos y sus características de aplicación a los motores de tracción. Todas estas pruebas tienen además numerosas variantes que pueden ser consultadas en la literatura especializada.

3.2.1. Resistencia de aislamiento

Consiste en medir o calcular el valor de la resistencia de aislamiento a una tensión determinada. La medida debe realizarse transcurridos 30 ó, más comúnmente, 60 s después aplicada la tensión continua y siempre por encima del punto de rocío, pues el valor depende de la humedad, especialmente en aislamientos antiguos con características higroscópicas. La información que proporciona este ensayo está referida especialmente al estado del aislamiento en cuanto a la contaminación superficial (humedad y suciedad). Hay que procurar elegir un sitio adecuado del taller para realizar estos ensayos, lo más alejado posible de zonas de humedad (zona de lavado) y donde la temperatura permanezca aproximadamente constante.

El último estándar de importancia sobre este tema es el IEEE Std 43-2000 (R 2006). En este documento se hace una revisión de valores de aplicación y resultados que deben obtenerse con los aislamientos modernos como es el caso de los motores de tracción. Así para el rango de tensiones nominales utilizadas en los motores de tracción, de acuerdo con el estándar anterior se recomiendan tensiones de prueba de 500 ó 1000 V (inferiores a las nominales del motor) y valores mínimos de la resistencia de aislamiento para aislamientos nuevos o recién reparados de 200 MegaOhmios.

La experiencia adquirida con los motores de tracción nos indica que, después de un proceso de reparación, la resistencia de aislamiento de los motores suele superar ampliamente el valor de 1 GigaOhmios, manteniéndose para los motores asíncronos valores superiores a los 100 MOhmios durante la aplicación, valores que pueden reducirse hasta pocas decenas de MegaOhmios, si están sucios, y valores inferiores, si están húmedos (épocas de lluvia y/o nieve). Los fabricantes aportan valores de evaluación durante el mantenimiento, pero desgraciadamente suelen ser muy conservadores y, por lo tanto, poco prácticos si se desean utilizar técnicas de monitorizado del estado basadas en tendencias.

3.2.2. Índice de polarización e Índice de absorción

Se define el índice de polarización IP como la relación entre la resistencia de aislamiento medida a 1 minuto y a 10 minutos después de aplicar la tensión continua de prueba.

$$IP = \frac{R_{1min}}{R_{10min}} = \frac{I_{10min}}{I_{1min}} \approx \frac{I_{cond} + I_{abs}}{I_{cond}} = 1 + \frac{I_{abs}}{I_{cond}}$$

Este valor informa del estado de humedad y limpieza de la máquina, basado en la suposición de que, transcurrido un cierto tiempo desde el comienzo del ensayo, la corriente de absorción se habrá anulado. Un valor bajo indicará que existe una corriente alta de conducción, originada por suciedad y humedad (Figura 1).

La resistencia de aislamiento normalmente se incrementará rápidamente cuando se aplica la tensión y después gradualmente tenderá a un valor constante cuando el tiempo de ensayo se prolonga. Los aislamientos más modernos, tal como los actualmente utilizados en los motores de tracción, llegan a un valor estacionario de la resistencia de aislamiento en 4 minutos o menos. Así, se utiliza en estos casos una variante del IP que calcula la relación entre las resistencias de aislamiento a 1 minuto y 30 s, después de iniciar el ensayo. Este valor es denominado "índice de absorción" (IA).

$$IA = \frac{R_{30s}}{R_{1min}}$$

El IP de un aislamiento es un valor adimensional que permitirá hacer comparaciones sobre el estado del aislamiento

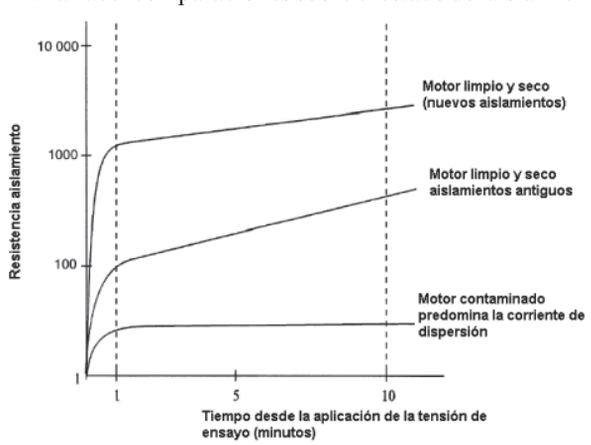


Figura 1: Curvas de resistencia de aislamiento – tiempo para distintos estados del aislamiento

de máquinas de distintas características (tamaño, potencias, tensiones). Para los motores de tracción (clase térmica H, 200), de acuerdo con la IEC 60085.01, se recomienda que sea superior a 2. Un valor inferior a 1 indica un aislamiento pobre, en mal estado. No obstante, si la resistencia de aislamiento es mayor que 5 GΩ, el valor calculado del IP no es significativo y, por lo tanto, no será tenido en cuenta.

Una alternativa eficaz a estos índices es analizar la curva de crecimiento de la resistencia con el tiempo. Si se observan desviaciones importantes respecto a las curvas teóricas o a las de otros motores similares, tendremos un síntoma de problemas en el aislamiento.

3.2.3. Capacidad

La medida de la capacidad puede proporcionarnos información de problemas tales como el deterioro térmico o saturación del aislamiento por humedad.

Los valores de la capacidad son característicos para cada motor y son función del tipo de aislamiento utilizado y de la geometría del motor. La dispersión del valor de capacidad obtenido en un motor de tracción sobre el de referencia de su serie es un síntoma claro de problemas en el aislamiento. Además, el valor de la capacidad es un parámetro significativo para conocer el estado en que se encuentra la impregnación del motor dentro de un proceso VPI ("Vacuum Pressure Impregnation") del que se hablará más adelante. El dispositivo de medida de la capacidad debe tener una gran precisión para obtener medidas significativas (inferior al 0,1 %).

Aunque ninguna norma facilita valores de referencia, nuestra propia experiencia con los motores de tracción nos indica que un cambio apreciable en el valor de la capacidad, del orden del 10 %, es síntoma de que el motor puede tener problemas en el aislamiento y aconseja su inmediata revisión.

3.2.4. Ensayos de sobretensión, HIPOT (*HIgh POTential*)

Estos ensayos proporcionan información de la rigidez dieléctrica del sistema aislante. Consisten en aplicar una tensión superior a la nominal del bobinado de la máquina. Si el aislamiento soporta esa aplicación durante un cierto tiempo y no se produce una circulación excesivamente alta de corriente de dispersión, se asume que será capaz de soportar sin peligro la tensión normal de funcionamiento.

Estos ensayos se aplican obligatoriamente en el caso de máquinas recién fabricadas o en las que se ha reparado el bobinado y en todas las nuevas bobinas, si se va a proceder a un rebobinado del estator. En cualquier caso, son ensayos cuyo resultado es "pasa/no pasa" y que, en caso de resultado satisfactorio, proporcionan alguna garantía de que el muro aislante puede soportar con seguridad los esfuerzos dieléctricos que se producen bajo la tensión normal de trabajo de la máquina.

Existe una fuerte polémica entre los partidarios y no partidarios de estos ensayos; en todo caso, su aplicación o no dependerá de:

- Criticidad de la máquina.
- Existencia de repuestos y disponibilidad de tiempo para la reparación.
- Política de mantenimiento seguida por el taller de reparación y el usuario del motor.

Aunque por regla general un aislamiento en buen estado no va a ser deteriorado con este ensayo, no se debe abusar de este tipo de pruebas y de ninguna manera deben realizarse más de dos ensayos HIPOT durante el proceso de reparación. En operaciones programadas de mantenimiento no deben hacerse estos ensayos en intervalos inferiores a tres años y, como regla general, este ensayo se realizará siempre después de un ensayo satisfactorio de resistencia de aislamiento.

La distribución del esfuerzo dieléctrico dentro del aislante es diferente si el ensayo se realiza con tensión continua (la distribución es proporcional a la resistividad de cada capa aislante) o alterna (la distribución es función de la capacidad de cada capa). Por ello, y dado que la prueba con tensión alterna es más similar al funcionamiento normal del motor, es preferible hacer estos ensayos con tensión alterna.

Las normas IEC 60034 y NEMA MG1 definen valores de la tensión a aplicar durante estos ensayos y que de forma resumida para los ensayos HIPOT en corriente alterna se muestran en la Tabla 3.

Máquinas y bobinas nuevas	2E + 1 kV E es el valor eficaz de la tensión entre fases
Máquinas en activo o en mantenimiento. Devanados secos y limpios	0.6 a 0.8 * (2E + 1 kV), Suele considerarse 0,75 (IEC 60034-1)

Tabla 3: Valores de la tensión para ensayos HIPOT

La norma EN 60349-2 requiere la realización de un ensayo dieléctrico después de la finalización de los ensayos individuales a los que se somete el motor al final del proceso de fabricación. La tensión de ensayo con corriente alterna será la mayor de:

$$2\,U_{dc}+1000,\quad 2\frac{U_{rp}}{\sqrt{2}}+1000,\quad \frac{U_{rpb}}{\sqrt{2}}+1000$$

Siendo:

U_{dc}.- tensión media más alta respecto a tierra que puede aplicarse a la conexión con la corriente continua cuando el sistema de contacto está en su tensión máxima y la máquina está funcionando como motor (generalmente el valor máximo posible de la tensión del circuito intermedio del convertidor de alimentación).

U_{rp}.- tensión de cresta repetitiva máxima respecto a tierra que puede aplicarse a los devanados de la máquina con tensión de catenaria máxima y la máquina funcionando como motor.

U_{rpb}.- Tensión de crestas repetitivas máxima con respecto a tierra que puede aparecer en el devanado cuando la máquina está frenando.

3.2.5. Ensayo de saltos de tensión

El ensayo de saltos de tensión puede considerarse una variante de los ensayos anteriores que facilitan información numérica y gráfica sobre el estado del aislamiento del motor. Consiste en varias pruebas sucesivas de la resistencia de aislamiento, aplicando en cada paso un nivel superior de la tensión. Normalmente se aplican cinco pasos con valores de tensión de 300 a 1500 V, de 500 a 1500 V o de 500 a 2500 V según los valores de la tensión nominal de alimentación del motor.

Aunque el valor de la resistencia de aislamiento puede sufrir un pequeño decrecimiento con el aumento de la tensión, si el aislamiento está en buenas condiciones debe obtenerse prácticamente la misma medida de aislamiento hasta llegar al valor máximo nominal de la tensión. En la Figura 2 se muestran los resultados de un ensayo de saltos de tensión, en un motor de tracción con el aislamiento en buen estado.

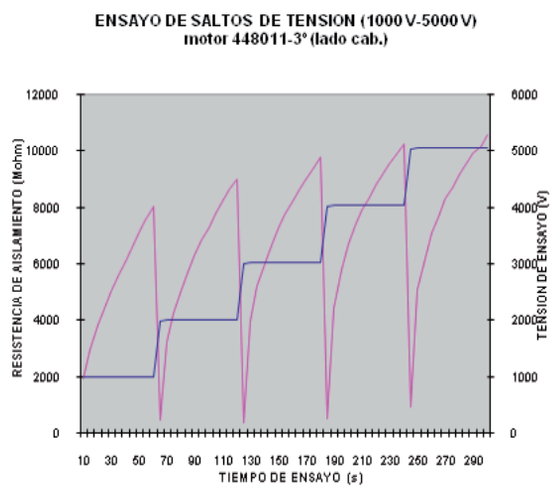


Figura 2: Ensayo de Saltos de Tensión de un motor de tracción eléctrico con el aislamiento en buen estado: el valor del aislamiento aumenta al subir la tensión

Si sucede que con un aumento de la tensión nominal se produce una disminución de la resistencia de aislamiento, puede ser síntoma de problemas en el aislamiento que pueden ser debidos a fracturas de aislamiento agravados por la presencia de suciedad o humedad.

El cambio en el valor de la resistencia es más pronunciado a valores de tensión considerablemente superiores de la tensión nominal.

3.2.6. Tangente de delta

Los ensayos de tangente de delta, también denominados en la terminología anglosajona *factor de dispersión*, se realizan aplicando una tensión alterna y han venido mostrando durante años ser herramientas muy valiosas para determinar tanto la calidad en la fabricación de los devanados como su estado en máquinas ya en funcionamiento.

La tangente de delta es una medida de las pérdidas eléctricas en el aislante. En un aislamiento perfecto su valor no se incrementará conforme aumenta la tensión aplicada; sin embargo, en el muro aislante del devanado estatórico o entre el aislante y el hierro, pueden estar presentes pequeños huecos de aire. Cuando se aplica una tensión suficientemente alta al devanado, en estos huecos se pueden presentar descargas parciales que dan lugar al incremento de las pérdidas en el devanado. Su evaluación representa las pérdidas medias sobre el objeto de ensayo: esto no se corresponde con la peor zona del aislamiento, de modo que una bobina puntualmente en mal estado puede estar enmascarada por un alto número de bobinas en buen estado. El incremento de la tangente de delta con la tensión es función del contenido global en huecos del sistema aislante, grado de compacidad del aislamiento, composición del aglomerante y estado del tratamiento superficial. El análisis de los resultados obtenidos en este ensayo debe hacerse comparando con otros motores de la misma serie o siguiendo la evolución de un mismo motor.

3.3. AISLAMIENTO ENTRE ESPIRAS (DEVANADOS O FASES)

Los ensayos con tensión continua y los de sobretensión pueden detectar fallos existentes o incipientes a tierra, pero no pueden indicar el estado en que se encuentra el aislamiento entre espiras. Para este objetivo se utilizan los ensayos de ondas de choque inicialmente utilizados para el estudio del aislamiento entre espiras bajo condiciones de conmutación o tensiones transitorias. Con la introducción de los convertidores de frecuencia, debido a los sobreesfuerzos a que se ve afectado el aislamiento entre espiras, estos ensayos están cobrando cada vez mayor importancia, primero en la fabricación de bobinas como garantía de su calidad, y actualmente también en tareas de mantenimiento, principalmente en la evaluación y peritación del estado del motor.

Este ensayo es análogo al HIPOT, en el sentido de que aplica una alta tensión, en este caso al aislamiento entre espiras (o fases), y se observa si se produce un fallo. Es un test que puede resultar destructivo, del tipo “pasa – no pasa”. Su aplicación debe ser cuidadosa y no abusiva, pues en el caso de que el aislamiento esté debilitado, puede ocasionar su destrucción. El ensayo consiste en la aplicación de impulsos de alta tensión con un tiempo de subida de aproximadamente 0,1 a 0,2 microsegundos y de amplitud variable, comparándose circuitos que en teoría deben ser idénticos (normalmente, bobinas o grupos de bobinas idénticas o las tres fases del estator del motor). Si los devanados de las fases/circuitos bajo ensayo son iguales, las ondas reflejadas serán idénticas. Si uno de los circuitos tiene un fallo o defecto de aislamiento o constitución, su modelo no será el mismo que el del devanado en buen estado (Figura

3). Generalmente las espiras cortocircuitadas darán lugar a diferencias bastante pequeñas en la amplitud de la forma de onda, necesitándose un operador experimentado para distinguir la falta. Los defectos más graves, como pueden ser los cortocircuitos entre fases, tienden a provocar alteraciones mucho más acusadas de las formas de onda. Los fabricantes de equipos de ensayo proporcionan información relacionada con las formas habituales de discrepancias en las ondas y la naturaleza de las faltas asociadas.

Existe una nueva generación de equipos de prueba para ensayos de sobretensión. Estos equipos liberan en parte de la labor de interpretación del operador, para lo cual se produce un almacenamiento de datos y su posterior análisis en PC [IEEE Std 522-2004]. Como valores de aceptación se recomienda, para el ensayo de bobinas individuales durante el proceso de fabricación, un tiempo de subida de la sobretensión de 100 ns y una magnitud máxima de 3,5 veces la tensión nominal en fase. Para los ensayos de mantenimiento el tiempo de subida sería el mismo, pero el valor de la tensión inferior al antes indicado.

La norma IEC 60034-15 presenta valores más exigentes para las tensiones de prueba y además, los fabricantes de los equipos, indican recomendaciones al respecto. Como norma general, en bobinas debe utilizarse un valor mínimo de 500 V por espira.

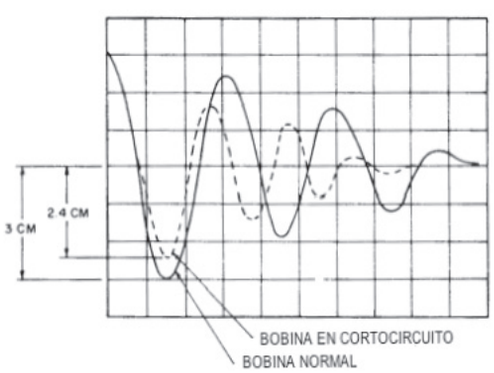


Figura 3: Ensayo de ondas de choque y formas de onda de una bobina en cortocircuito y una bobina normal, inducidas en el ensayo de ondas de choque

4. REBOBINADO DEL ESTATOR

Los motores de tracción utilizan bobinas preformadas con un sistema de impregnación VPI global. Con cierta frecuencia, la reparación del motor necesitará la reconstrucción total del devanado del estator (tal como se ha visto, en los motores asíncronos de tracción el elemento más débil es el aislamiento del estator).

La construcción de las bobinas es un trabajo delicado y preciso que requiere el uso de materiales de acuerdo con el diseño original del motor o con las especificaciones de ingeniería, respetando fielmente su geometría y dimensiones. Puede realizarse en talleres externos especializados, mientras que su montaje sobre el motor puede realizarse por el taller que las construye o por él que realiza el proceso general de reparación. Los talleres que fabrican las bobinas deben estar certificados para realizar este trabajo y las secciones de bobinado y montaje de bobinas deben estar ubicadas en zonas aisladas, limpias e incluso presurizadas para evitar la contaminación de los materiales aislantes.

Al final de su construcción, todas deben pasar por ciertos controles dimensionales, que aseguren su montaje en las ranuras con el mínimo esfuerzo, sin sufrir deterioro mecánico que puede dañar el aislamiento, y por pruebas dieléctricas (HIPOT y/o ondas de choque).

Actualmente los devanados estatóricos utilizan, con sus variantes, sistemas aislantes basados en polimida, aunque con clara tendencia a utilizar materiales con protección anticorona y principalmente cintas de mica junto, en ocasiones, con cintas de polimida para el aislamiento de pared principal. Las bobinas llevan una cinta exterior de fibra de vidrio que aporta protección mecánica, particularmente para evitar daños durante su montaje. Al final todo el bobinado del estator, después de que ha sido montado y conectado es sometido a un tratamiento VPI con aporte de resinas con la que se rellenarán los posibles huecos existentes en el aislamiento y que darán consistencia al aislamiento y facilitarán la conductividad térmica para evacuar el calor en ellos generado durante el funcionamiento.

5. IMPREGNACIÓN DE LOS MOTORES DE TRACCIÓN. SISTEMA VPI GLOBAL

Debido a las altas prestaciones demandadas, actualmente los motores de tracción se caracterizan por utilizar como único método de impregnación el sistema VPI global. Todos los talleres dedicados a su reparación deben poseer una sección de impregnación VPI que es, junto al banco de ensayos, posiblemente la inversión en equipos más importante que deben acometer.

El procedimiento VPI está totalmente establecido y probado en los motores para proporcionar un alto nivel de fiabilidad, siempre que los materiales aislantes sean seleccionados cuidadosamente y sea aplicado correctamente. Son cinco los ciclos básicos a que está sometido el motor durante el proceso de impregnación: presecado, vacío seco, vacío húmedo, presión y curado.

La impregnación VPI para que sea efectiva debe hacerse de forma muy precisa. Posibles causas de una impregnación deficiente son:

- Insuficiente aislamiento principal que provoca arrugas en las cintas aislantes y favorece la creación de huecos difíciles de rellenar por la resina.
- Resina de impregnación inadecuada. Mala viscosidad o contaminación química.
- Resina utilizada en excesivos ciclos de impregnación y no restaurada para recuperar sus propiedades químicas.
- Incompatibilidad entre la resina y el resto del sistema aislante.
- Ciclo de impregnación no correcto (inadecuado precalentamiento del motor, aplicación de tiempos, temperaturas o presiones incorrectos).

Para conseguir una impregnación VPI adecuada deben seguirse diversos controles, entre ellos:

- Control sistemático de la viscosidad de la resina.
- Control de tiempos, presiones y temperaturas.
- Monitorización de la capacidad del aislamiento que permite conocer cuándo se ha completado el relleno de los huecos del aislamiento con resina. La capacidad debe incrementarse con el tiempo hasta que la impregnación se ha completado. Si realizamos una gráfica capacidad-tiempo, cuando la capacidad permanezca constante sabremos que hemos terminado el proceso de impregnación.

6. EQUILIBRADO DEL MOTOR

La elevada precisión dimensional exigida a los motores de tracción junto con los esfuerzos mecánicos a que se encuentran sometidos en su funcionamiento (vibraciones, arranques, paradas, cambios continuos de velocidad, etc.) precisa un exigente equilibrado del rotor. De acuerdo con la norma ISO 1940, actualmente los motores de tracción requieren calidades de equilibrado G 2.5 y G 1.

7. CONCLUSIONES

Los motores de tracción están sometidos a fuertes solicitaciones y a una continua evolución, de acuerdo con la orientación del servicio ferroviario. Todo ello se traduce en la necesidad de utilizar cada vez materiales más especializados para su fabricación, particularmente en el sistema aislante, así como la aplicación de las técnicas más novedosas para su análisis reparación y mantenimiento.

Los talleres de reparación deben contar con unas instalaciones adecuadas, con secciones de limpieza y bobinado cada vez más automatizados, aptas para los requerimientos exigidos así como con equipos avanzados de impregnación VPI, equilibrado y ensayo, siempre en concordancia con las reglamentaciones ambientales y de seguridad. Los trabajos y equipos a utilizar precisan, además de personal especializado, en continua formación para su adaptación a los nuevos desarrollos de los motores, materiales para la realización de los ensayos. La diversificación del material, la amplitud de la documentación manejada, la continua y necesaria actualización y mejora así como la necesidad de interpretar resultados de ensayos cada vez más especializados, exigen la presencia de un equipo de ingeniería capacitado.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Brütsch R, Allison J, Thaler T. "Factors Determining Cost and Quality of the Electrical Insulation in the VPI-Process". En: *IEEE International Symposium on Electrical Insulation (Montreal 16-19 de Junio de 1996)*, 1996. p.259 262
- CEI. *Evaluation and qualification of electrical insulation systems used in rotating electrical machines when fed from voltage converters* IEC 60034-18-41. Ginebra: CEI, 2006
- Drapebr RE, Moore J, Rehder RH. "Insulation System Evaluation for Rotating Machinery" *IEEE Electrical Insulation Magazine*. Julio/Agosto 1995. Vol.11-4 p.19-25
- Duque-Pérez O, Pérez-Alonso M. *Motores de Inducción. Técnicas de Mantenimiento Predictivo,* 1ª Edición. Badajoz: Editorial @ becedario, 2005. ISBN: 84-934437-8-6
- Espolita-Carreño L. "¿Qué mantenimiento debemos hacer?" *DYNA Ingeniería e Industria*. Enero-Febrero 2000. Vol.75-1 p.49-54
- Hill RJ. "Electric Railway Traction. Part 2. Traction Drives With Three-Phase Induction Motors". *Power Engineering Journal*. Junio 1994. Vol.8-3 p.143-152
- Hota H, Maeda T. "Improvement of Insulation Test for Traction Motors" *Quarterly Report of RTRI*. Marzo 1997, Vol.38 p.31
- IEEE Power Engineering Society. *Guide for Testing Turn-to-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for AC Rotating Electric Machines*. IEEE 522-2004. Nueva York: IEEE, 2006
- IEEE Power Engineering Society *IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery*. IEEE Std 43-2000 (R 2006). Nueva York: IEEE, 2006
- Katz M, Theis RJ. "New High Temperature Polyimide Insulation for Partial Discharge Resistance in Harsh Environments" *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Julio/Agosto 1997 Vol.13, p.24-30
- Kaufhold M, Schäfer K, Bauer K et al. "Interface Phenomena in Stator Winding Insulation – Challenges in Design, Diagnosis and Service Experience" *IEEE Electrical Insulation Magazine* Marzo/Abril 2002. Vol.18 p.27-36
- Pavón-Rodríguez M A. "La gestión del mantenimiento. Un valor añadido" *DYNA Ingeniería e Industria*. Mayo 2007. Vol.82-4 p.27-30
- Stiffler W, Bell S. "Development of a 40-Year Design Life Severe Duty Motor" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Septiembre/Octubre 1989. Vol.25-5 p.125-126
- Stone G, Boulter EA, Culbert I et al. *Electrical Insulation for Rotating Machines. Testing, Evaluation, Aging, Testing, and Repair.* 1ª Edición. New York: Wiley-IEEE Press, 2004. 392p. ISBN: 0-471-44506-1
- Toliyat H, Kliman GB. *Handbook of Electric Motors*. 2ª Edición. Nueva York: Marcel Dekker, 2004, 850p. ISBN: 0-8247-4105-6