

Guía de pruebas de diagnóstico de aislamiento a voltajes superiores a 1 kV

Megger®
Power on



¿POR QUÉ UN EQUIPO DE PRUEBAS DE AISLAMIENTO DE 10 kV?

Megger inventó las pruebas de aislamiento antes del comienzo del siglo XX y continúa liderando en el mercado con innovaciones y avances tecnológicos. ¿Por qué desarrollamos entonces un modelo de 10 kV cuando todos los demás proveedores se detuvieron en 5 kV? La respuesta se encuentra en las normas IEEE. Megger desarrolló una unidad de 10 kV para cumplir con las nuevas recomendaciones para pruebas descritas por IEEE. Megger ofrece un equipo de pruebas de aislamiento de 10 kV desde 2001.

En marzo de 2000, la Junta de Normas de IEEE-SA aprobó una revisión de la norma IEEE 43-1974. La norma 43-2000, "Práctica recomendada de IEEE para pruebas de resistencia de aislamiento en maquinaria rotativa", hace énfasis en la necesidad de mejorar las prácticas actuales para adecuarse a cambios y mejoras en materiales de aislamiento y en la ventaja de realización de pruebas a voltajes más altos, que revelan fallas que de otra manera no serían advertidas.

A continuación, un breve resumen de los puntos destacados de la norma:

- Se recomiendan voltajes de prueba de hasta 10 kV para devanados especificados para más de 12 kV.
- Se recomiendan tanto la prueba de resistencia de aislamiento como la del índice de polarización.
- Los resultados de la prueba se deben comparar con valores históricos para identificar los cambios.
- En lugar de los registros históricos, para ambas pruebas se indican valores mínimos aceptables (basados en el tipo de equipo).
- Dependiendo de la especificación de la máquina, las lecturas para una de las pruebas o ambas deberían superar los valores mínimos aceptables.
- Si las lecturas están por debajo de los valores mínimos aceptables, no se recomiendan las pruebas de sobrevoltaje ni la operación con el devanado.

La norma 43-2000 del IEEE recomienda un procedimiento para la medición de la resistencia de aislamiento de los devanados de la armadura y del campo en máquinas rotativas especificadas a 1 hp, 750 W o potencia mayor y se aplica a máquinas sincrónicas, máquinas de inducción, máquinas de CC y condensadores sincrónicos. No se aplica a máquinas de potencia fraccionaria. También recomienda el voltaje para las prueba de aislamiento (basada en los rangos del devanado) y los valores mínimos aceptables de la resistencia de aislamiento para los devanados de las máquinas rotativas de CA y CC.

Para más información sobre la norma IEEE, consulte la página 27 de este folleto.

¿POR QUÉ UN EQUIPO DE PRUEBAS DE AISLAMIENTO DE 15 kV?

Los equipos de pruebas de aislamiento de 15 kV tienen una gran demanda a raíz de que los ingenieros detectan la degradación adelantada y una mejor detección de fallas en equipo de alta tensión. Muchas plantas de utilidades en Sudamérica ya han incorporado pruebas de 15 kV en sus procedimientos y esta técnica ya se está expandiendo en Europa, el Medio Oriente y Asia. Las normas estadounidenses de NETA especifican el voltaje de prueba de 15 kV.

La norma de Recondicionamiento Perla/NETA MTS-1997 especifica pruebas de 15 kV en equipos con un rango de voltaje máximo de 35 kV en adelante. Motores probados acorde a NETA ATS 2007 con tensión de 34,500 V o más alto, también debe utilizarse una tensión de prueba de CC de 15 kV.

| | | | |
|---|-----------|---|-----------|
| Introducción | 2 | Prueba de rampa de voltaje | 19 |
| ¿Qué es el aislamiento?..... | 2 | Prueba de descarga dieléctrica..... | 21 |
| ¿Qué ocasiona la degradación del aislamiento?..... | 3 | Problemas diferentes/pruebas diferentes..... | 23 |
| Solicitud eléctrica | 3 | Apéndices | 22 |
| Solicitud mecánica..... | 3 | Fuentes potenciales de error / Asegurar resultados de prueba de calidad | 24 |
| Ataque químico | 3 | Cables de pruebas..... | 24 |
| Solicitud térmica..... | 3 | Mediciones superiores a 100 GΩ..... | 24 |
| Contaminación ambiental..... | 3 | Declaraciones de exactitud | 24 |
| ¿Cómo puede ayudarme el mantenimiento preventivo?..... | 3 | Suministro del voltaje indicado | 24 |
| Beneficios de la nueva tecnología | 4 | Rechazo de interferencia | 25 |
| Cómo se mide la resistencia de aislamiento | 5 | Reglas sobre realización de pruebas y comparación..... | 25 |
| Cómo funciona un equipo de pruebas de aislamiento | 5 | Especificación CAT..... | 26 |
| Componentes de la corriente de prueba..... | 5 | Lineamientos de la especificación CAT..... | 26 |
| Corriente de carga capacitiva | 5 | La importancia de la especificación CAT | 27 |
| Corriente de absorción o polarización | 5 | Algunas estadísticas básicas sobre la especificación CAT | 27 |
| Corriente de fuga superficial | 5 | Pruebas de resistencia de aislamiento de maquinaria rotativa | 27 |
| Corriente de conducción | 6 | Efectos de la temperatura | 29 |
| Conexión del equipo de pruebas de aislamiento..... | 6 | Efectos de la humedad | 30 |
| Conexiones típicas seleccionadas | 7 | Protección contra ingreso | 30 |
| Cable de potencia blindado | 7 | Pruebas de alto potencial | 31 |
| Interruptor de circuito / aisladores pasamuros | 7 | Lecturas de corriente (nA) vs. Lecturas de resistencia (MΩ) | 32 |
| Transformador de potencia | 7 | Capacidad de quemado | 32 |
| Generador de CA | 7 | Secado de equipo eléctrico..... | 32 |
| Escala del equipo de pruebas de resistencia de aislamiento | 7 | Descarga del elemento bajo prueba..... | 33 |
| Características de voltaje | 8 | Tiempo de carga para equipos grandes | 34 |
| El terminal de protección | 9 | Equipos de pruebas de aislamiento accionados por motor | 34 |
| Introducción | 9 | Diseño de los cables de prueba | 34 |
| Funcionamiento del terminal de protección..... | 10 | Mejoras significativas en seguridad | 35 |
| Desempeño del terminal de protección | 11 | Cosas a tener en cuenta para una operación segura..... | 35 |
| Comparación de resultados..... | 12 | Advertencias de seguridad | 36 |
| El terminal de protección como una herramienta de diagnóstico..... | 12 | Diseño del estuche del instrumento..... | 36 |
| Protección del terminal de protección | 12 | Protección de retardo de fuego | 37 |
| Palabras finales | 13 | Equipos de pruebas de aislamiento de Megger | 38 |
| Evaluación e interpretación de resultados..... | 14 | MIT515, MIT525, MIT1025, MIT1525 | 38 |
| Interpretación de la lectura infinito | 14 | S1-568, S1-1068, S1-1568 | 38 |
| Pruebas de diagnóstico de aislamiento con alto voltaje | 15 | Modelos MJ15 y BM15 | 39 |
| Prueba de lectura puntual..... | 15 | Cables de pruebas | 39 |
| Prueba de tiempo vs. resistencia | 17 | | |
| Prueba de índice de polarización..... | 17 | | |
| Prueba de escalón de voltaje..... | 19 | | |

INTRODUCCIÓN

El aislamiento eléctrico se degrada a lo largo del tiempo debido a las diferentes solicitudes a las cuales es sometido durante su vida útil normal. El aislamiento se diseñó para soportar estas solicitudes durante una cantidad de años, considerada como la vida útil de ese aislamiento. Usualmente puede tratarse de décadas.

Las solicitudes anormales pueden acelerar este proceso natural de envejecimiento y acortar severamente la vida útil del aislamiento. Debido a esto, es una buena práctica realizar pruebas regularmente para determinar si ocurre un envejecimiento acelerado y de ser posible, identificar si los efectos se pueden revertir o no.

El propósito de las pruebas de diagnóstico de aislamiento es:

- Detectar un envejecimiento acelerado.
- Identificar la causa de dicho envejecimiento.
- Identificar, de ser posible, las acciones más apropiadas para corregir la situación.

La forma más simple de realizar pruebas de diagnóstico es una "prueba puntual". La mayoría de los profesionales de mantenimiento eléctrico han realizado pruebas puntuales, donde se aplica un voltaje al aislamiento y se mide una resistencia. En este caso el diagnóstico se limita a "el aislamiento está en buen estado" o a "el aislamiento está en mal estado". ¿Pero qué hacemos luego de haber realizado este diagnóstico? Es un poco como ir con una tos fea al médico y que el médico simplemente le diga: "Usted tiene una tos fea". A usted no le gustaría irse solo con esa información. Usted espera que el doctor lo examine, realice algunas pruebas, y le diga porqué tiene una tos fea y qué hacer para curarla.

Dentro de las pruebas de aislamiento, una única prueba puntual equivale a que el médico le diga que usted está sano o está enfermo. La información es mínima. Este es el tipo de prueba que típicamente se realiza en circuitos de bajo voltaje, donde el costo de una falla es bajo y los equipos se pueden reemplazar fácil y económicamente. Dado que el equipo bajo prueba es de bajo voltaje, estas pruebas se realizan típicamente a un voltaje de prueba de 500 o 1000 V, y son conocidas para cualquier persona que realiza mantenimiento eléctrico.

Sin embargo, si el médico registra los resultados de los exámenes y los compara con los de visitas anteriores, puede aparecer una tendencia que lo lleve a prescribir un medicamento. De una manera similar, si se registran las lecturas de resistencia de aislamiento y se las compara con lecturas obtenidas con anterioridad, quizás sea posible observar una tendencia y de ser necesario, prescribir acciones correctivas.

La realización de pruebas de diagnóstico de aislamiento a voltajes superiores a 1 kV puede resultarle menos familiar a muchas personas que realizan mantenimiento eléctrico. El propósito de este folleto, por lo tanto, es:

- Familiarizar al lector con la realización de pruebas de diagnóstico de resistencia de aislamiento.
- Proporcionar los lineamientos para evaluar los resultados de estas pruebas de diagnóstico de resistencia de aislamiento.
- Presentar los beneficios de pruebas de voltajes múltiples, a voltajes superiores.

Al final del folleto se incluyen una serie de apéndices para proporcionar al lector información adicional relacionada con las pruebas de diagnóstico de aislamiento.

Este folleto se basa en los principios establecidos en el folleto "A Stitch in Time... The Complete Guide to Electrical insulation Testing" publicado por primera vez en 1966 por la compañía James G. Biddle.

¿QUÉ ES EL AISLAMIENTO?

Todo conductor eléctrico de una instalación, ya sea en un motor, generador, cable, interruptor, transformador o cualquier otra cosa, está cubierto con algún tipo de aislamiento eléctrico. Mientras que el conductor es en sí mismo un buen conductor (en general de cobre o aluminio) de la corriente eléctrica que alimenta a los equipos eléctricos, el aislamiento debe resistir la corriente y mantenerla en su camino a lo largo del conductor. La comprensión de la Ley de Ohm, expresada en la siguiente ecuación, es la clave para entender las pruebas de aislamiento:

$$E = I \times R$$

donde,

E = voltaje en voltios

I = corriente en amperios

R = resistencia en ohmios

Para una resistencia dada, a mayor voltaje, mayor corriente. De manera inversa, cuanto menor es la resistencia del conductor, mayor es la corriente que circula con el mismo voltaje.

Ningún aislamiento es perfecto (no tiene resistencia infinita), de manera que algo de la corriente circula por el aislamiento o a través de él hacia la tierra. Tal corriente puede ser muy pequeña para la mayoría de los fines prácticos pero es la base del funcionamiento de los equipos de prueba de aislamiento.

Entonces, ¿qué es un "buen" aislamiento? "Bueno" significa una resistencia relativamente alta al flujo de la corriente. Cuando se usa para describir un material

aislante, "bueno" también consiste en "la capacidad de mantener una resistencia alta". La medición de la resistencia puede decir qué tan "bueno" es el aislamiento.

¿Qué ocasiona la degradación del aislamiento?

Existen cinco causas básicas para la degradación del aislamiento. Ellas interactúan entre sí y ocasionan una espiral gradual de declinación de la calidad del aislamiento.

Solicitud eléctrica

El aislamiento se diseña para una aplicación particular. Los sobrevoltajes y subvoltajes generan solicitudes anormales dentro del aislamiento, que pueden conducir a un agrietamiento o delaminación del mismo.

Solicitud mecánica

Los daños mecánicos, tales como golpear un cable cuando se cava una zanja, resultan bastante obvios, pero la solicitud mecánica también puede ocurrir por operar una máquina fuera de balance o por paradas y arranques frecuentes. La vibración resultante de la operación de una máquina puede provocar defectos dentro del aislamiento.

Ataque químico

Aunque es de esperarse que los vapores corrosivos dañen el aislamiento, la suciedad y el aceite también pueden reducir la efectividad del aislamiento.

Solicitud térmica

La operación de maquinaria en condiciones excesivamente calurosas o frías ocasionará sobreexpansión o sobrecontracción del aislamiento, que puede generar grietas y fallas. Sin embargo, también se produce una solicitud térmica cada vez que una máquina se arranca o para. A menos que la maquinaria esté diseñada para un uso intermitente, cada parada y cada arranque afectarán de manera adversa al proceso de envejecimiento del aislamiento.

Contaminación ambiental

La contaminación ambiental abarca a varios agentes que van desde la humedad por procesos hasta la humedad de un día húmedo; también el ataque de roedores que perforan el aislamiento.

El aislamiento comienza a degradarse tan pronto como se pone en servicio. El aislamiento para una aplicación determinada se diseña para proporcionar un buen servicio durante muchos años, en condiciones normales de operación. Sin embargo, condiciones anormales pueden tener un efecto dañino que, si se deja sin atención, acelerarán la degradación y finalmente ocasionarán una falla en el aislamiento. Se considera que el aislamiento ha fallado si no evita de manera adecuada que la corriente eléctrica circule

por trayectorias no deseables. Esto incluye al flujo de corriente a través de las superficies exterior o interior del aislamiento (corriente de fuga superficial), a través del cuerpo del aislamiento (corriente de conducción) o por otras varias razones.

Por ejemplo, en el aislamiento pueden aparecer agujeros pequeños y grietas, o la humedad y materiales extraños pueden penetrar las superficies. Estos contaminantes se ionizan fácilmente bajo el efecto de un voltaje aplicado y proporcionan una trayectoria de baja resistencia para la corriente de fuga superficial, que aumenta en comparación con superficies secas sin contaminar. Limiando y secando el aislamiento, sin embargo, se rectificará fácilmente esta situación.

Otros enemigos del aislamiento pueden producir un deterioro que no se cura tan fácilmente. No obstante, una vez que ha comenzado la degradación del aislamiento, los diferentes iniciadores tienden a asistirse entre sí para aumentar la rapidez de la declinación.

¿Cómo puede ayudarme el mantenimiento preventivo?

Si bien hay casos donde la caída en la resistencia de aislamiento puede ser repentina, como cuando se inunda el equipo, en general, se reduce gradualmente, lo que provee una advertencia suficiente si se prueba periódicamente. Estas verificaciones regulares permiten un reacondicionamiento planeado antes de una falla en el servicio y/o una situación de choque.

Si un programa de pruebas periódico todas las fallas se presentarán en forma sorpresiva, no planeada, inconveniente y posiblemente muy costosa en tiempo y recursos y, por lo tanto, costosa para reparar. Por ejemplo, considere un motor pequeño que se usa en una planta de procesamiento para bombear un material que se solidificará si se deja de bombear. Una falla inesperada de este motor costaría decenas, e incluso cientos de miles de dólares para rectificar si se considera también en el cálculo el tiempo de inactividad de la planta. Sin embargo, si se hubieran incluido pruebas de diagnóstico de aislamiento en el programa de mantenimiento preventivo habría sido posible planear el mantenimiento o el reemplazo del motor con falla en un momento en que la línea estuviera inactiva y así minimizar los costos. Incluso, la condición del motor podría haber sido mejorada mientras estaba funcionando.

Si una degradación avanzada del aislamiento permanece sin detectarse, existe mayor probabilidad de descarga eléctrica y aún de muerte para el personal; hay mayor probabilidad de incendio producido eléctricamente; la vida útil del equipo eléctrico se puede reducir y/o las instalaciones pueden experimentar períodos inactivos no programados y costosos. La medición de la calidad del aislamiento

de manera regular es una parte crucial de cualquier programa de mantenimiento dado que ayuda a predecir y prevenir rupturas de equipos eléctricos.

Esto resulta particularmente adecuado ahora, considerando que una parte importante de la red eléctrica en Estados Unidos y Europa fue instalada en la década del 50 en un despliegue de inversión de posguerra. Algunos equipos están aproximándose al final de su vida de diseño, mientras que otros ya la han excedido pero aún operan de manera satisfactoria.

Dado que las pruebas de diagnóstico se reservan generalmente para los equipos más críticos, en general, pero no siempre, se encuentra que los equipos de prueba de diagnóstico presentan salidas de voltaje de 5 o 10 kV. Estos voltajes son más adecuados para probar los recursos de medio voltaje tales como máquinas, cables, transformadores.

Beneficios de la nueva tecnología

Los equipos de prueba de aislamiento se remontan a principios del siglo XX cuando Sydney Evershed y Ernest Vignoles desarrollaron su primer equipo de prueba de aislamiento (el cual, desde 1903, evolucionó en el rango de equipos de prueba de Megger®).

En los primeros días, la mayoría de los instrumentos eran accionados manualmente por medio de una manivela. Esto limitaba su capacidad para realizar pruebas que tardaban un tiempo prolongado para completarse, y limitaban la estabilidad del voltaje a la habilidad del operador para operar la manivela de manera uniforme. Posteriormente, se pudo accionar a estos mismos instrumentos con un motor externo que ayudaba en las pruebas de larga duración pero que mejoraba muy poco la estabilidad del voltaje. Sin embargo, el rango de estos instrumentos raramente superaba los 1000 MΩ. Los movimientos analógicos eran muy pesados y en realidad amortiguaban los eventos transitorios. La aparición de la electrónica y el desarrollo de la tecnología de baterías revolucionaron el diseño de los equipos de prueba de aislamiento. Los instrumentos modernos son alimentados por línea o baterías y producen voltajes de prueba muy estables en un rango de condiciones muy amplio. También pueden medir corrientes muy pequeñas de modo que su rango de medición de resistencia de aislamiento se extiende varios miles de veces en el rango de los teraohmios (TΩ). Algunos pueden incluso reemplazar al lápiz, papel y cronómetro, que se utilizaban anteriormente para recoger los resultados de manera manual, registrando los datos en la memoria para descargarlos y analizarlos posteriormente. Resulta afortunado que se hayan logrado estas sorprendentes mejoras dado que los fabricantes de materiales de aislamientos han trabajado muy duro también, y como consecuencia los materiales modernos de aislamiento ahora poseen resistencias mucho mayores que las de principios del siglo XX.

La tecnología más nueva ofrece un funcionamiento mejorado de modo que los procedimientos establecidos pueden producir más información y se puede disponer de nuevos métodos. Los instrumentos modernos entregan un voltaje estable en todo su rango de resistencia, con sensibilidad de microprocesador en el circuito de medición que permite mediciones en el rango de los TΩ. La combinación de un voltaje estable y una sensibilidad mejorada permite al equipo de pruebas medir las cantidades minúsculas de corriente que pasan por el aislamiento de calidad en el equipo de producción nuevo. Consecuentemente, se han desarrollado procedimientos sofisticados que dependen de mediciones precisas y que se pueden implementar fácilmente.

Ahora que el equipo de pruebas de aislamiento no está limitado a valores asociados con equipos con fallas o envejecidos, se lo puede utilizar para localizar con precisión la posición del objeto de prueba en cualquier lugar a lo largo de su curva de envejecimiento. La indicación "infinito" que representa una delicia para el técnico de reparación representa un espacio vacío para el que diagnostica. Algunos instrumentos tienen pruebas de diagnóstico programadas previamente en su software y pueden ejecutarlas automáticamente, llenando ese vacío con datos analíticos valiosos.

CÓMO SE MIDE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

Cómo funciona un equipo de pruebas de aislamiento

El equipo de pruebas de aislamiento de Megger® es un instrumento portátil que proporciona una lectura directa de la resistencia de aislamiento en ohmios, megaohmios, gigaohmios o teraohmios (según el modelo seleccionado) independientemente del voltaje de prueba seleccionado. En un buen aislamiento, la resistencia generalmente se encontrará en el rango de los megaohmios o superiores. El equipo de pruebas de aislamiento de MEGGER es básicamente un medidor de resistencia (ohmímetro) de rango alto, con un generador de CC incorporado.

El generador del instrumento, el cual se puede operar manualmente por manivela, batería o por línea, desarrolla un alto voltaje de CC que genera varias corrientes pequeñas a través y sobre las superficies del aislamiento bajo prueba. La corriente total es medida por el ohmímetro, que posee una escala de indicación analógica, lectura digital o ambas.

Componentes de la corriente de prueba

Si se aplica un voltaje de prueba a través de una porción de aislamiento, mediante la medición de la corriente resultante y aplicando la Ley de Ohm ($R = E / I$), se puede calcular la resistencia de aislamiento. Por desgracia, circula más de una corriente, lo cual tiende a complicar el análisis.

Corriente de carga capacitativa

Estamos familiarizados con la corriente requerida para cargar la capacitancia del aislamiento bajo prueba. Esta corriente es inicialmente grande pero su duración es relativamente corta, disminuyendo exponencialmente a un valor cercano a cero a medida que el objeto bajo prueba se carga. El material de aislamiento se carga de la misma manera que un dieléctrico en un capacitor.

Corriente de absorción o polarización

La corriente de absorción está compuesta en realidad de hasta tres componentes, que decaen con velocidad decreciente a un valor cercano a cero, a lo largo de un periodo de varios minutos.

La primera es ocasionada por una deriva general de electrones libres a través del aislamiento por efecto del campo eléctrico.

La segunda es ocasionada por distorsión molecular por la que el campo eléctrico impuesto distorsiona la carga negativa de las capas de electrones que circulan alrededor de los núcleos hacia el voltaje positivo.

La tercera se debe a la alineación de moléculas polarizadas dentro del campo eléctrico aplicado, ver figura 1. Esta alineación es casi aleatoria en un estado neutro, pero cuando se aplica un campo eléctrico, estas moléculas polarizadas se alinean con el campo en un mayor o menor grado.

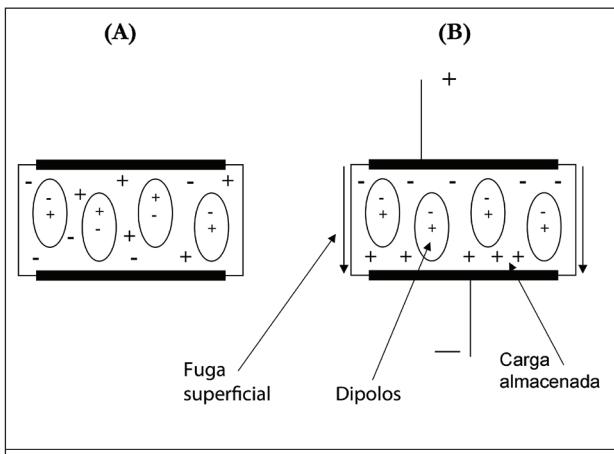


Figura 1: Alineación de moléculas polarizadas

En general se considera a las tres corrientes como una sola corriente y son afectadas principalmente por el tipo y las condiciones del material de unión usado en el aislamiento. Si bien la corriente de absorción se approxima a cero, el proceso tarda mucho más que con la corriente capacitativa.

La polarización por orientación se incrementa con la presencia de humedad absorbida, dado que los materiales contaminados están más polarizados.

Esto incrementa el grado de polarización. La despolimerización del aislamiento también lleva a un incremento en la corriente de absorción.

No todos los materiales poseen los tres componentes y, de hecho, materiales como el polietileno exhiben poca o ninguna absorción por polarización.

Corriente de fuga superficial

La corriente de fuga superficial ocurre porque la superficie del aislamiento está contaminada con humedad o con sales. La corriente es constante con el tiempo y depende del grado de ionización presente, que a su vez depende de la temperatura. Con frecuencia se la ignora como una corriente separada y se incluye con la corriente de conducción como la corriente de fuga total.

Corriente de conducción

La corriente de conducción es estable a través del aislamiento y generalmente se la representa por un resistor de valor muy alto en paralelo con la capacitancia del aislamiento. Es un componente de la corriente de fuga, la cual es la corriente que se medirá cuando el aislamiento esté totalmente cargado y se haya producido la absorción total. Nótese que incluye la fuga superficial, que puede reducirse o eliminarse por el uso del terminal de protección (que se analizará más tarde).

La gráfica de la figura 2 muestra la naturaleza de cada una de las componentes de corriente con respecto al tiempo.

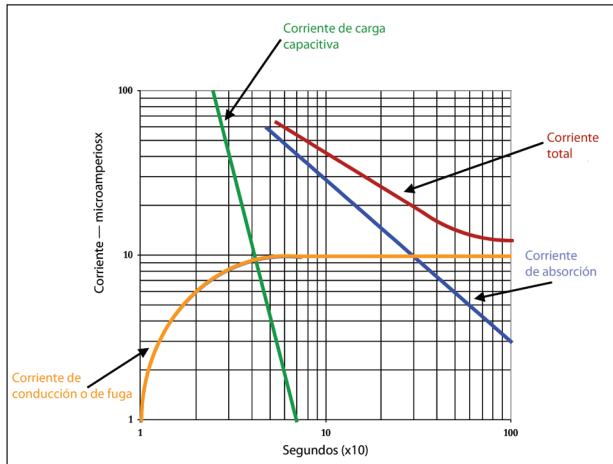


Figura 2: Componentes de la corriente de prueba

La corriente total es la suma de estas componentes. (La corriente de fuga se muestra como una corriente.) Esta es la corriente que se puede medir directamente con un microamperímetro o, en términos de megaohmios para un voltaje definido, con un equipo de pruebas de aislamiento de MEGGER. Algunos instrumentos ofrecen las alternativas de mostrar una medición en términos de corriente o como una resistencia.

Debido a que la corriente total depende del tiempo que se aplica el voltaje, la Ley de Ohm ($R = E / I$) solo se cumple, teóricamente, para un tiempo infinito (lo que implica esperar para siempre antes de tomar una lectura). También es muy dependiente del arranque desde un nivel base de descarga total. Por lo tanto, el primer paso en cualquier prueba de aislamiento consiste en asegurar que el aislamiento esté completamente descargado.

Observe que: La corriente de carga desaparece relativamente rápido a medida que se carga el equipo bajo prueba. Llevará más tiempo para cargar unidades grandes, que presentan mayor capacitancia. Esta corriente almacena energía y por razones de seguridad, debe descargarse después de la prueba. Afortunadamente, la descarga de esta energía ocurre relativamente rápido. Durante la prueba, la corriente de absorción decrece a una velocidad relativamente lenta, según la naturaleza exacta del aislamiento. Esta energía almacenada también debe liberarse al final de la prueba, y requiere mucho más tiempo para descargarse que la corriente de carga de la capacitancia.

Conexión del equipo de pruebas de aislamiento

Con los materiales aislantes modernos hay poca o ninguna diferencia en la lectura obtenida, independientemente de la manera en que se conectan los terminales. Sin embargo, en los aislamientos antiguos, un fenómeno poco conocido llamado electroosmosis hace que se obtenga una lectura más baja con el terminal positivo conectado al lado a tierra del aislamiento que se está probando. Si se prueba un cable subterráneo, el terminal positivo se conectaría normalmente al lado exterior del cable dado que éste estará a tierra por contacto con el suelo, como se muestra en la figura 3. Tenga en cuenta que no lo conecta directamente al aislamiento sino más bien al neutro o tierra del cable.

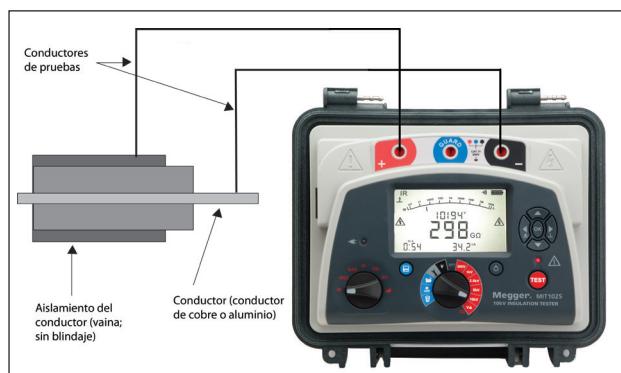


Figura 3: Conexión simplificada a un cable

Conexiones típicas seleccionadas

Cable de potencia blindado

Conectado para medir la resistencia de aislamiento entre un conductor y la tierra.

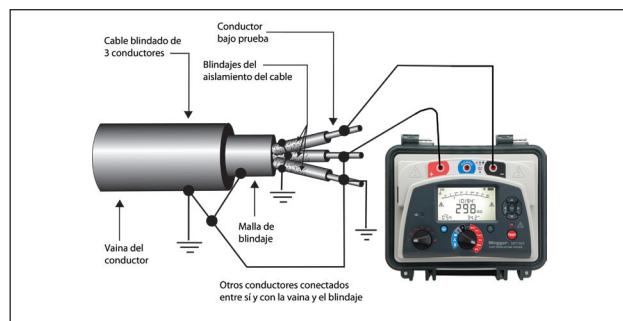


Figura 4: Conexión a un cable de potencia blindado

Interruptor de circuito / aisladores pasamuros

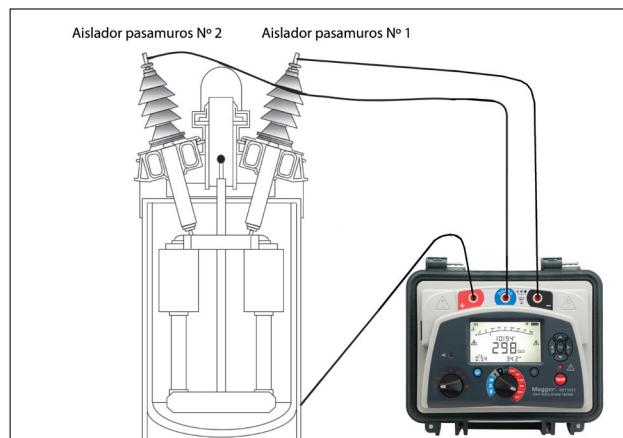


Figura 5: Conexión a un interruptor de circuito

Transformador de potencia

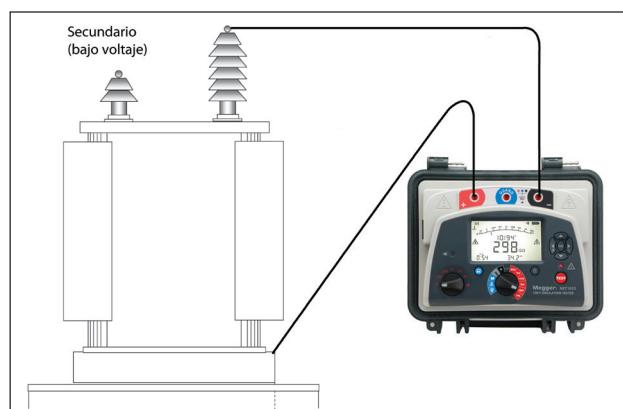


Figura 6: Conexión a un transformador de potencia

Generador de CA

Los observadores perspicaces notarán que la conexión para medir el aislador pasamuros del interruptor de circuito incluyó la conexión del tercer terminal o protección. El uso de este terminal se explica con mayor detalle más adelante en este folleto.

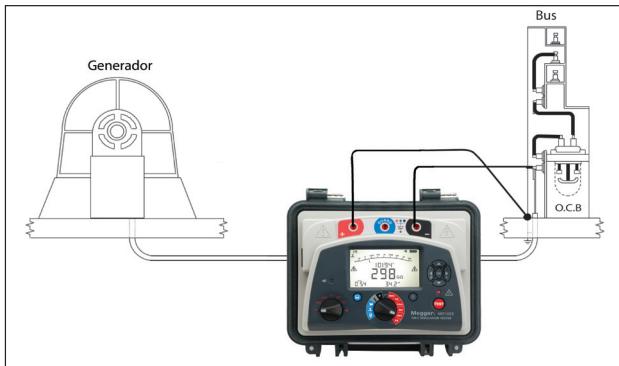


Figura 7: Conexión a un generador de CA

Escala del equipo de pruebas de resistencia de aislamiento

La mayoría de los equipos de prueba de aislamiento modernos ofrecen pantallas que permiten al operador tener una lectura digital del resultado y alguna forma de lectura analógica, movimiento o trayectoria de aguja. La figura 8 muestra el panel superior y pantalla del MIT1025 de Megger.



Figura 8: Panel superior y pantalla del MIT1025 de Megger

Cuando un equipo de prueba de aislamiento "se conecta" al objeto que se va a probar y se comienza la prueba, ocurren varias cosas. Circulan las tres corrientes diferentes: de carga capacitiva, de absorción dieléctrica y de conducción / fuga. La suma de estas tres corrientes occasionará que la pantalla del instrumento varíe, con un valor medido que aumenta, al principio rápidamente y luego más lentamente.

Utilizando una pantalla analógica, el movimiento de la aguja puede proporcionar información a un operador con experiencia. ¿La aguja viaja suavemente o "de a saltos"? ¿Asciende de manera uniforme o regresa intermitentemente? Esta valiosa información complementaria sería difícil o casi imposible de discernir a partir de los dígitos variables de una

pantalla LCD. A continuación se listan algunos ejemplos:

- A medida que el objeto bajo prueba se aproxima a la ruptura, la descarga por efecto corona occasionará que la aguja "tiemble", lo que indica al operador que se está acercando al voltaje máximo que resiste el objeto. Esta advertencia sucede a tiempo para finalizar la prueba antes de que ocurra la ruptura real y el posible daño.
- Para un operador con experiencia, la velocidad con la que viaja la aguja provee información sobre la capacitancia del objeto bajo prueba. Esta es una propiedad útil en pruebas de cables de alto voltaje, y se relaciona con las bases teóricas de las pruebas de descarga dieléctrica, más sofisticadas, que se describen en este folleto.
- Si la aguja avanza y retrocede de manera alternativa, podría indicar la ocurrencia de un arco en el objeto bajo prueba, demasiado pequeño para occasionar la desconexión automática del equipo de prueba. Tal información ayuda al operador a determinar con precisión algún problema.
- Observar a la aguja desacelerar hasta llegar a un alto aparente (puede todavía estar moviéndose pero a una "velocidad" parecida a la de una manecilla del reloj) puede ser más agradable para tomar una lectura rápida o puntual que tratar de decidir cuando se ha estabilizado razonablemente una indicación digital. Ninguna pantalla digital se "congela" en un número preciso sin cierta fluctuación de al menos el último dígito significativo.

Para el ojo humano resulta difícil o imposible distinguir estos detalles a partir de los dígitos cambiantes de una pantalla electrónica. Observar la trayectoria de una aguja puede resultar deseable, pero cuando se detiene, el operador debe interpolar la lectura a partir de las marcas de la escala, lo que introduce un elemento de juicio, que puede ser una fuente de error. Los modelos digitales no presentan este problema, ya que informan al operador exactamente (dentro de las especificaciones de exactitud de la unidad) qué medición se ha tomado. Recuerde que la mayoría entregará un valor de capacitancia al final de la prueba.

La mayoría de los equipos de prueba de aislamiento de MEGGER superiores a 1 kV poseen una pantalla analógica / digital. Una de las ventajas de esta pantalla es que la parte analógica del medidor se balanceará y oscilará, lo que indica al operador que el objeto bajo prueba todavía no ha alcanzado el estado estacionario y que aún está bajo la influencia de la corriente de absorción y carga. Esta indicación significa que el objeto se debe probar por más tiempo o que hay un

problema. Cuando la parte analógica de la pantalla se hace estacionaria, el instrumento muestra el resultado en forma de una lectura digital directa sin ambigüedad, que no requiere de multiplicadores ni operaciones matemáticas.

A diferencia de la pantalla analógica / digital mencionada arriba, un medidor de gráfica de barras que detecta valores promedio no proporciona una indicación en tiempo real de la resistencia de aislamiento. Algunos instrumentos ofrecen una gráfica de barras curvada en lugar de un arco logarítmico genuino, en el que el extremo inferior de la escala se expande con relación al extremo superior. La gráfica de barras toma lecturas durante la prueba, realiza cálculos y luego muestra los resultados. El problema con este tipo de medidor es su principio de operación. Si ocurre un evento cuando la gráfica de barras no está tomando lecturas, este será omitido y no aparecerá en la pantalla. Además, las simulaciones en gráfica de barras del viaje de la aguja pueden no parecer al ojo igual que el familiar viaje de la aguja y puede no replicar un movimiento mecánico de la manera esperada. Cuando se hacen pruebas de aislamiento, cuanto más conozca el operador sobre los resultados (durante y después de la prueba), mejor será su decisión sobre cómo implementar una posible solución al problema. Si algo no se detecta durante una prueba debido a que el instrumento tenía un medidor del estilo de gráfica de barras, se podría omitir información importante.

Características de voltaje

El voltaje de salida de un equipo de pruebas de aislamiento depende de la resistencia que está midiendo. A resistencias bajas, del orden de decenas de ohmios, el voltaje de salida será cercano a cero, quizás algunos pocos voltios. A medida que se incrementa la carga de resistencia, aumenta el voltaje de prueba hasta que alcanza el valor requerido. Conforme la resistencia crece más, el voltaje de prueba aumenta lentamente hasta que se alcanza un valor estable. Este valor probablemente superará ligeramente el voltaje nominal requerido (por ejemplo, 5104 V cuando se selecciona 5000 V).

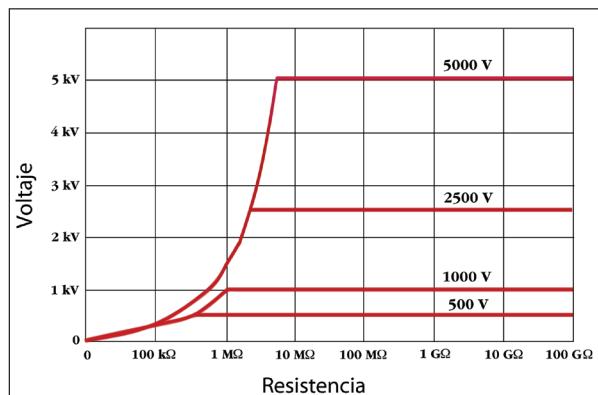


Figura 9: Buena curva de carga

Se debe asegurar siempre que un equipo de pruebas de aislamiento posea una "gráfica de carga" que indique las características del voltaje de salida en función de la resistencia de carga o, alternativamente, un voltímetro integral que mida el voltaje terminal durante una prueba y lo muestre en forma continua. De este modo se puede asegurar que se aplica un voltaje adecuado sobre la resistencia en el rango de interés.

Un equipo de pruebas de aislamiento de buena calidad tendrá una característica de voltaje que exhiba un crecimiento rápido de voltaje hasta un nivel de resistencia correspondiente a un buen aislamiento. Un tiempo rápido de crecimiento asegura una medición efectiva. La característica de voltaje mostrada en la figura 9 representa una característica buena. En este ejemplo, el voltaje de salida habrá alcanzado 500 V a una carga tan baja como 500 kΩ y 1000 V a 1 MΩ. Estos valores son legislados por las normas internacionales para la prueba de instalaciones eléctricas de casas, tiendas, etc. Aunque esto no sea el uso típico para un equipo de pruebas de diagnóstico de aislamiento, sí proporciona un buen punto de referencia para fabricantes serios. Es esperable obtener curvas similares a voltajes superiores. El voltaje se debe elevar rápidamente hasta un valor de entre uno a cinco megaohmios, según la selección de voltaje, y mantenerse en ese valor para cualquier resistencia superior.

Con equipos de pruebas de aislamiento de calidad inferior, la rampa de voltaje es mucho más lenta. Los instrumentos tipificados por la curva pobre mostrada en la figura 10, no producen el voltaje nominal hasta que no se alcanzan resistencias mucho más altas. De esta manera las pruebas pueden producir resultados que proporcionan niveles de aprobación del aislamiento pero que sólo han estado sujetos a la mitad del voltaje de prueba deseado.

Nota: Evite instrumentos que no posean curvas de carga publicadas.

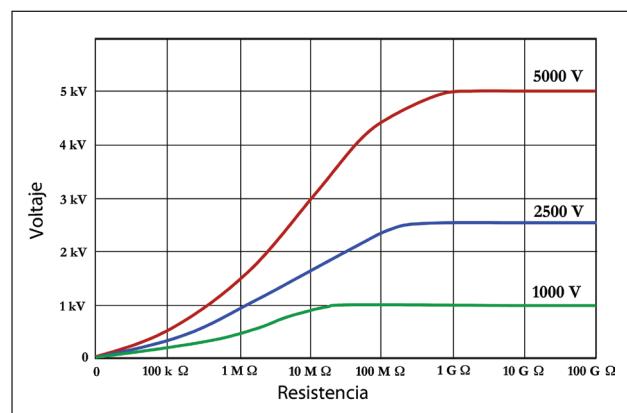


Figura 10: Pobre curva de carga

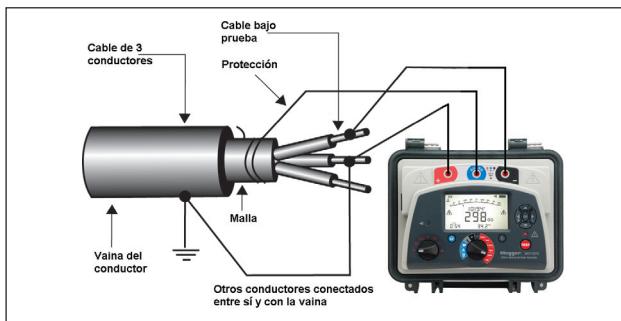


Figura 11: Uso del terminal de protección sobre un cable de potencia

EL TERMINAL DE PROTECCIÓN

Introducción

Durante una prueba de aislamiento, a menudo nos concentraremos tanto en la resistencia del aislante en sí, que olvidamos la trayectoria de la resistencia en la superficie exterior del material aislante. Esta trayectoria de resistencia puede ciertamente constituir una parte importante de nuestra medición y afectar de forma dramática los resultados.

A modo de recordatorio, la corriente total durante una prueba de resistencia de aislamiento posee tres componentes principales:

1. La corriente de carga, que carga la capacitancia del objeto.
2. Una corriente de absorción, la cual circula por el aislamiento por la polarización de los electrones; al inicio es elevada pero decrece con el tiempo (a una velocidad inferior a la de la corriente de carga).
3. La corriente de conducción o de fuga, pequeña y de estado estacionario que se divide en dos partes:
 - a. La trayectoria de conducción a través del aislamiento.
 - b. La corriente que circula sobre la superficie del aislamiento.

La corriente que circula sobre la superficie es la componente de la corriente que no deseamos medir si queremos conocer la resistencia de aislamiento del material. La fuga superficial introduce un error en la medición de la resistencia de aislamiento. La eliminación de la fuga superficial de las mediciones se vuelve más necesaria cuanto más elevados sean los valores de resistencia de aislamiento esperados.

Algunos equipos de prueba de aislamiento poseen dos terminales, otros tres. Dado que se trata de equipos de prueba de CC, dos de los terminales son + y -. El tercero (si existe) es una protección. Su uso no es obligatorio y muchos operadores utilizan equipos de prueba de aislamiento de manera satisfactoria sin usarla nunca. Sin embargo, le otorga al operador una función adicional para el diagnóstico de problemas en

equipos. La protección es un circuito de derivación que desvía la corriente de fuga superficial de la función de medición. Si existen trayectorias de fuga paralelas, una conexión de protección las eliminará de las mediciones, y entregará una lectura más precisa de la fuga entre los elementos restantes.

La fuga superficial es esencialmente una resistencia en paralelo con la resistencia de aislamiento verdadera del material bajo prueba. Al realizar una medición con dos terminales, esta trayectoria de resistencia es una parte importante de la medición y puede afectar de modo dramático a las lecturas. Una medición con tres terminales, que incluye el uso del terminal de protección, ignora la fuga superficial. Esto puede resultar muy importante al realizar pruebas en componentes de alto voltaje, como aisladores, aisladores pasamuros y cables, donde elevados valores de resistencia son esperables.

Por ejemplo, la suciedad y la humedad sobre un aislador pasamuros de un transformador favorecerán una fuga superficial entre las conexiones + y -, y por lo tanto disminuirán la lectura, posiblemente dando una indicación errónea de una falla en el aislador. Una conexión entre la protección y un conductor desnudo envuelto alrededor del aislador logrará interceptar esta corriente y proveer una medición basada predominantemente en fugas a través de fallas en la cerámica.

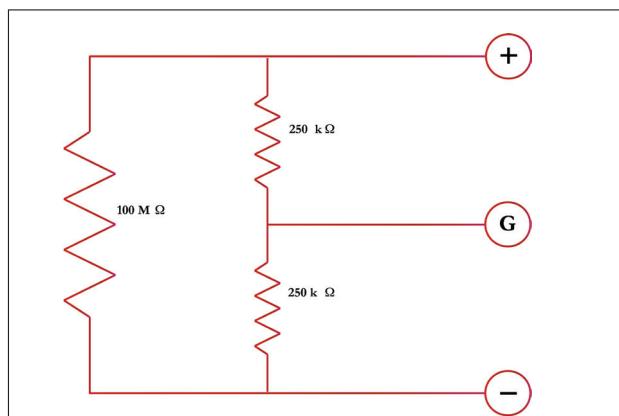


Figura 12: Diagrama de terminal de protección

Es muy importante no confundir la protección con una conexión a tierra. Conectar la protección y el conductor de retorno con el mismo elemento del sistema de prueba solo desvía la corriente que se desea medir, y por lo tanto genera un corto circuito en la función de medición. Para la selección de un equipo de pruebas, considerar:

- Los objetivos de la prueba (verificaciones básicas por instalación generalmente no requieren de la protección).

- La composición eléctrica de los elementos a someter a prueba (motores y transformadores) pueden probarse por fugas entre bobinas, eliminando las fugas a tierra).
- Los posibles efectos de fuga superficial (los conductores y cables pueden transportar corriente a través de su superficie, por medio de la suciedad y humedad, como también por el material aislante).
- El nivel de análisis necesario de los resultados (si los elementos con fallas se pueden reemplazar o descartar, o si será necesario localizar las fallas para una posible reparación).

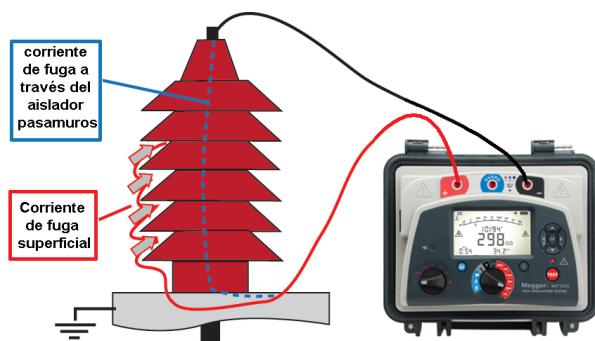
Funcionamiento del terminal de protección

El siguiente ejemplo de un aislador pasamuros de alto voltaje demuestra una aplicación típica del terminal de protección. En el primer gráfico, no se utiliza el terminal de protección, y las corrientes de fuga que fluyen a través del aislador pasamuros y sobre la superficie se combinan y son medidas en conjunto por el instrumento. En el segundo gráfico se ha envuelto un conductor alrededor del aislador pasamuros y se lo ha conectado con el terminal de protección, de manera que la fuga superficial fluye hacia el terminal de protección.

La corriente que circula hacia el terminal de protección no es medida por el instrumento, lo que significa que se la ignora en la medición de resistencia de aislamiento.

Para una mejor comprensión de lo que en realidad sucede dentro del instrumento, observe la figura 14. El equipo de pruebas de aislamiento posee tres elementos principales, la fuente de corriente de alto voltaje de CC, el voltímetro de alto voltaje y el amperímetro. La medición de la resistencia de aislamiento surge simplemente de la Ley de Ohm, el voltaje medido dividido por la corriente medida. El terminal de protección permite derivar a la corriente de fuga fuera de la medición de corriente y de esa manera se la ignora.

Sin utilizar el terminal de protección



Utilizando el terminal de protección

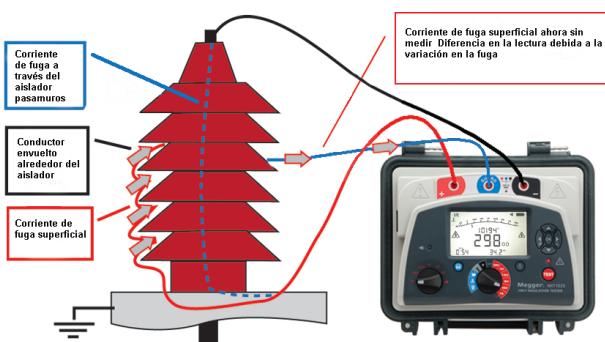


Figura 13: Ejemplo con un aislador pasamuros de alto voltaje

Desempeño del terminal de protección

Los equipos de pruebas que cuentan con protección generalmente son un poco más costosos que los modelos de dos terminales, pero en muchas aplicaciones, un modelo de dos terminales no puede entregar el espectro completo de información que se puede obtener a través de las pruebas de aislamiento.

Algo olvidado a menudo es la diferencia en las capacidades del circuito de protección. El desempeño del terminal de protección a menudo queda oculto en la hoja de datos del instrumento, o directamente excluido. La capacidad de protección del equipo de pruebas de aislamiento resulta mucho más importante cuando se miden aislamientos con fugas que la exactitud de medición usualmente citada, que puede ser de 5%.

La fuga superficial es parte de la incertidumbre de la medición. Cuanto mayor sea la fuga superficial desviada de la medición de corriente, equivale a medir menor cantidad de corriente. En la medición de componentes eléctricos de alto voltaje, cuanto mejor sea el desempeño del terminal de protección, mayor será la exactitud de la medición de resistencia del aislamiento. Un mantenimiento preventivo eficaz depende de tendencias confiables de resultados de pruebas, para obtener una indicación

temprana de fallas. Las lecturas con errores debidos a fuga superficial no evitados mediante el terminal de protección pueden sesgar un programa de mantenimiento.

Considere el siguiente ejemplo, un caso extremo donde la trayectoria de la fuga superficial es 200 veces inferior a la de la resistencia del aislamiento.

Se muestra un aislador de $100 \text{ M}\Omega$ que deseamos medir. Se encuentra sucio y contaminado, y por ello tiene una trayectoria de fuga superficial de $500 \text{ k}\Omega$. Si se aplica el voltaje de prueba desde los terminales positivo y negativo sin el circuito de protección, fluirá una corriente de fuga superficial 20 veces mayor que la corriente que circula a través del aislamiento que se desea medir, y se leerá una resistencia de sólo $497 \text{ k}\Omega$.

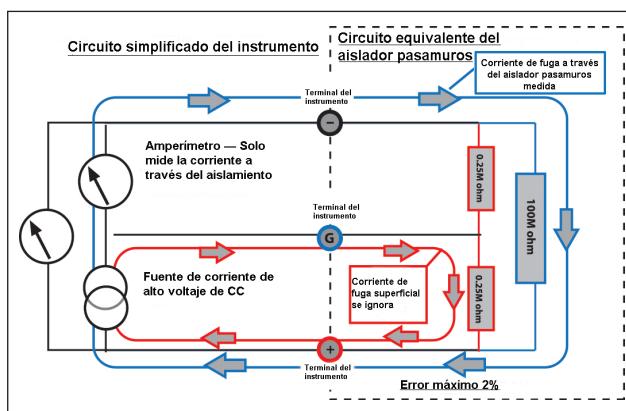


Figura 14: Circuito simplificado del instrumento

Si se usa el terminal de protección, mostrado aquí de modo que la resistencia de fuga se divide por igual en cada lado de la conexión de protección, el efecto de la fuga superficial se puede eliminar hasta cierto grado. Cuánto se puede eliminar del efecto de la fuga superficial depende del circuito de protección del equipo de pruebas de aislamiento utilizado. Según el instrumento seleccionado, el nivel de error puede ir de menos de 1,0% hasta más de 80,0%. Si su intención es utilizar el terminal de protección, investigue el nivel de error antes de comprar un instrumento.

Este es un clásico ejemplo de la necesidad de comparar pruebas utilizando una base similar. Una medición sin protección y una medición con protección producen resultados muy diferentes. ¿Cómo puede saber un operador si se utilizó anteriormente el terminal de protección, a menos que los registros de prueba registren este detalle aparentemente sin importancia?

Comparación de resultados

Un modo de estudiar el desempeño de un terminal de protección consiste en comparar los resultados obtenidos usando y no usando el terminal de protección, sobre una caja de calibración con un valor de fuga conocido agregado al circuito (sobre el cual se debe utilizar el terminal de protección).

Un instrumento (y un terminal de protección) de alta calidad entregará el mismo resultado antes de agregar el valor de fuga al circuito (medido sin terminal de protección) que luego de haberlo agregado al circuito (medido con terminal de protección). Adicionalmente, el voltaje de prueba permanecerá en el nivel seleccionado.

Los instrumentos con terminales de protección de mala calidad pueden presentar una varianza (error) superior al 95% en la lectura con el terminal de protección en uso. Adicionalmente, a menudo muestran una caída significativa en el voltaje entregado respecto del nivel de voltaje seleccionado. Incluso las unidades con terminales de protección más exactos pueden mostrar una caída significativa en el voltaje de prueba entregado, comprometiendo el resultado medido.

A continuación se muestran resultados de instrumentos reales, utilizando la posición de $1 \text{ T}\Omega$ en una caja de calibración y luego introduciendo una fuga de $5 \text{ M}\Omega$ para utilizar el terminal de protección. No se muestran los nombres ni números de modelo, con excepción de la unidad de Megger. Esta información es para mostrar cuánto error se puede introducir en las lecturas por el uso de un terminal de protección de mala calidad.

| Instrumento | Lectura sin Protección | Voltaje entregado | Fuga agregada | Lectura con protección | Voltaje entregado con protección |
|------------------|------------------------|-------------------|---------------------|------------------------|----------------------------------|
| Megger MIT525 | $978 \text{ M}\Omega$ | 5090 V | $5 \text{ M}\Omega$ | $978 \text{ M}\Omega$ | 5001 V |
| Instrumento 1 | $1.01 \text{ T}\Omega$ | 5010 V | $5 \text{ M}\Omega$ | $37.6 \text{ M}\Omega$ | 3287 V |
| Instrumento 2 | $975 \text{ M}\Omega$ | 5103 V | $5 \text{ M}\Omega$ | $961 \text{ M}\Omega$ | 3757 V |
| Instrumento 3 | $978 \text{ M}\Omega$ | 5269 V | $5 \text{ M}\Omega$ | $746 \text{ M}\Omega$ | 3680 V |

El terminal de protección como una herramienta de diagnóstico

El usuario puede identificar rápidamente si existe una fuga superficial y su magnitud, con dos pruebas, una con el terminal de protección y una sin él. Si el instrumento tiene la opción para observar la medición como corriente de fuga en vez de resistencia, el usuario simplemente resta el valor medido con el terminal de protección en uso del valor obtenido sin él. El resultado muestra exactamente cuánta corriente corresponde a la fuga superficial.

Las malas mediciones de resistencia de aislamiento pueden producir costosas acciones correctivas tales como el reemplazo de un aislador pasamuros. Quizás el aislador solo necesitaba una buena limpieza. El uso del terminal de protección ayuda a identificar este tipo de situaciones y ahorra dinero.

Nota: Tenga cuidado de las especificaciones que indican la impedancia de entrada.

Protección del terminal de protección

El terminal de protección es una parte importante de un equipo de pruebas de aislamiento >1kV. El terminal de protección no sólo debe desempeñarse bien, también debe estar bien protegido. Este desempeño consiste en su capacidad para eliminar de manera eficiente los efectos de fugas superficiales o indeseadas, de una medición de aislamiento. La protección es contra una aplicación accidental de voltaje o transitorios, según lo requerido en la especificación CAT de seguridad de IEC61010.

Las familias MIT y S1 de equipos de prueba de aislamientos de 5 kV y 10 kV de Megger poseen una especificación exclusiva para el desempeño de sus terminales de protección. Esta especificación consiste en la capacidad del instrumento para realizar mediciones de resistencia de aislamiento cuando la corriente de fuga conectada al terminal de protección es 200 veces superior a la magnitud de la corriente de fuga del aislamiento, y el error de exactitud agregado no supera el 2%.

Lograr esto, y aún proveer la protección de seguridad requerida por IEC61010 es muy importante. Sin embargo, el enfoque más comúnmente utilizado por algunos fabricantes de instrumentos es emplear una impedancia de entrada más alta, para proporcionar la protección requerida. Esto definitivamente destruye el desempeño de medición del terminal de protección. Para comprender este efecto tomemos como caso de estudio a un fabricante de instrumentos que ha destacado los beneficios de un terminal de protección protegido mediante una impedancia de entrada de 200 kΩ.

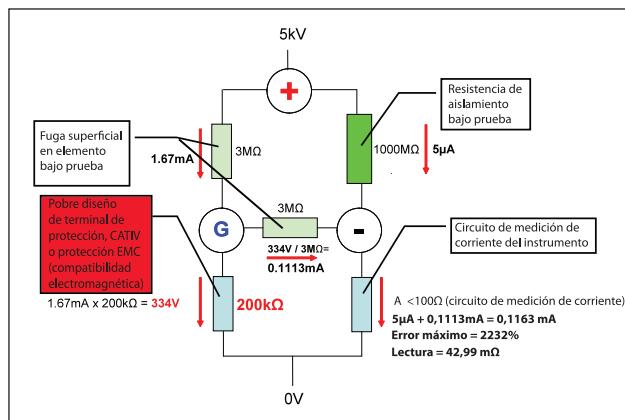


Figura 15: Circuito de medición “protegido” por una protección de alta impedancia

La figura 15 muestra un circuito equivalente de una resistencia de aislamiento de 1000 MΩ durante una medición, con una fuga superficial de 6 MΩ. Se ha conectado la fuga superficial al terminal de protección para asegurar que no sea medida.

Sin embargo, el instrumento está protegido por una impedancia de entrada de 200 kΩ. El resultado es un valor medido de alrededor de 43 MΩ, más de 2000% alejado de los 1000 MΩ que se deberían haber medido.

En un equipo de pruebas de aislamiento de Megger el terminal de protección permite una protección efectiva pero la impedancia de entrada permanece en un nivel aceptable, como se muestra en el ejemplo de la figura 16.

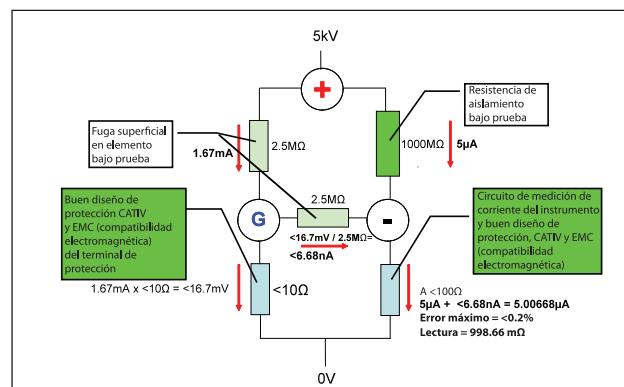


Figura 16: Circuito de medición con un terminal de protección de gran exactitud y baja impedancia

En la figura 16 la protección de entrada del terminal de protección de Megger es de baja impedancia pero de todos modos protege según los requerimientos de IEC61010. La importancia de una protección de baja impedancia se hace evidente al considerar que el error adicional introducido por el terminal de protección no es superior al 0,2% en este ejemplo calculado. Al seleccionar un equipo de pruebas de aislamiento de 5 kV o 10 kV, es importante asegurarse de que el instrumento esté protegido adecuadamente en todos sus terminales, incluyendo el de protección, pero también asegurarse de que la protección seleccionada no destruya el desempeño del instrumento como un equipo de pruebas de aislamiento. Megger no aceptará compromisos en este punto.

Palabras finales

El terminal de protección es claramente muy útil, pero se requieren algunas palabras de advertencia. La sola presencia del terminal de protección no garantiza que un equipo de prueba de aislamiento proveerá resultados exactos ante la presencia de altos niveles de fuga superficial. En particular, resulta difícil mantener un buen desempeño en el terminal de protección si el instrumento también debe ofrecer una especificación de seguridad CAT IV 600 V. Asegúrese de que el equipo de pruebas de aislamiento pueda cumplir con su especificación CAT sin comprometer el desempeño del terminal de protección.

Existen muchas razones por las cuales algunos instrumentos no alcanzan un buen desempeño de terminal de protección, pero una de las más obvias es que funcionando con el terminal de protección, el instrumento no solo tiene que entregar la corriente necesaria para la prueba de aislamiento, sino también la corriente desviada que fluye a través del terminal de protección. Si el generador de voltaje del equipo de pruebas no posee la suficiente capacidad —por tener una alta resistencia interna— se observará una reducción del voltaje de prueba, lo que redundaría en resultados inexactos. Esta es una consideración muy importante dado que la corriente en el circuito del terminal de protección puede ser diez o más veces superior a la del circuito de prueba en sí.

La estabilidad del equipo de pruebas también afecta a la exactitud de los resultados obtenidos con el terminal de protección en uso, como también las fugas superficiales de los cables de prueba. Existen instrumentos disponibles que pueden entregar resultados con un error de hasta 80% cuando se usan con el terminal de protección. Errores de tal magnitud, por supuesto, anulan los beneficios del terminal de protección. De hecho empeoran la situación al entregar resultados espurios, que pueden enmascarar problemas verdaderos. ¿Qué pueden hacer entonces los compradores de equipos de prueba de aislamiento de alto voltaje para evitar problemas de este tipo?

Afortunadamente, la respuesta es sencilla. Lo único necesario es pedir al fabricante del instrumento, antes de realizar la compra, que confirme la exactitud del instrumento cuando se usa el terminal de protección. Cualquier reticencia para proporcionar esta información permitirá llegar a la conclusión obvia y a las correctas decisiones de compra.

La realización de pruebas de aislamiento de alto voltaje es una herramienta invaluable tanto para el diagnóstico de fallas como para el monitoreo de las condiciones. La calidad de los resultados obtenidos depende de la calidad del equipo de pruebas utilizado. Equipos con tres terminales, que incorporan el terminal de protección, son invariablemente un poco más costosos que un equipo equivalente de dos terminales.

Como hemos visto, sin embargo, la pequeña diferencia adicional es dinero bien gastado, siempre y cuando el uso del terminal de protección no destruya la exactitud del instrumento. No olvide consultar aquellas cifras de exactitud antes de realizar la compra.

EVALUACIÓN E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Interpretación de la lectura infinito

Una de las características más importantes de un equipo de pruebas de aislamiento es el rango que el instrumento puede medir. Los objetivos de prueba determinan si la función básica es todo lo que se necesita, o si se recomienda un rango mejorado. Las aplicaciones de medición simples, tales como un electricista que termina un trabajo, se pueden obtener con un rango básico de mil megaohmios ($M\Omega$). De acuerdo, un equipo nuevo, si no posee fallas o resulta dañado durante la instalación, superará el rango de todos los medidores, excepto los más avanzados, pero esto está bien. En tales casos, el electricista no busca un valor real, sino más bien quiere ver un valor alto e “infinito”, ciertamente cumple con ese criterio. Sin embargo, “infinito” no es una medición, es una indicación de que el aislamiento bajo prueba tiene una resistencia que excede las capacidades de medición del equipo de pruebas y/o cualquiera que sea el número disponible más alto en su equipo de pruebas de aislamiento. Generalmente esto es adecuado puesto que el valor mínimo aceptable de resistencia es probablemente mucho más bajo que la lectura máxima disponible. Pero para el mantenimiento de equipo de producción, un equipo de pruebas con solo un rango limitado es insuficiente para el operador. Para el mantenimiento preventivo/predictivo, las lecturas de infinito resultan inútiles. El operador sabe que el objeto bajo prueba está en buen estado, pero no mucho más. Los equipos de pruebas con rango ampliado, hasta teraohmios ($1 T\Omega = 1.000.000 M\Omega$), ofrecen mediciones reales desde el momento de la instalación, lo que permite una línea de tiempo larga que le da mucho margen al profesional de mantenimiento.

Se pueden producir cambios significativos en la calidad del aislamiento a niveles altos de resistencia de aislamiento, más allá del rango de instrumentos más limitados, como se muestra en la gráfica de la figura 17.

En este ejemplo, un equipo de pruebas de rango limitado no capturaría estos datos valiosos. Se puede ver claramente que aunque el último valor de aislamiento registrado supera los $10 G\Omega$, la velocidad de declinación se incrementa; algo está mal. Un instrumento con un rango limitado a $2000 M\Omega$ omitiría esto totalmente. Para el momento en que las lecturas se hubieran degradado hasta ingresar en el rango del instrumento, quedaría un tiempo relativamente corto para que el personal de mantenimiento pudiera programar un mantenimiento de rutina. (Puede ser incluso muy tarde para rectificar la condición de falla.)

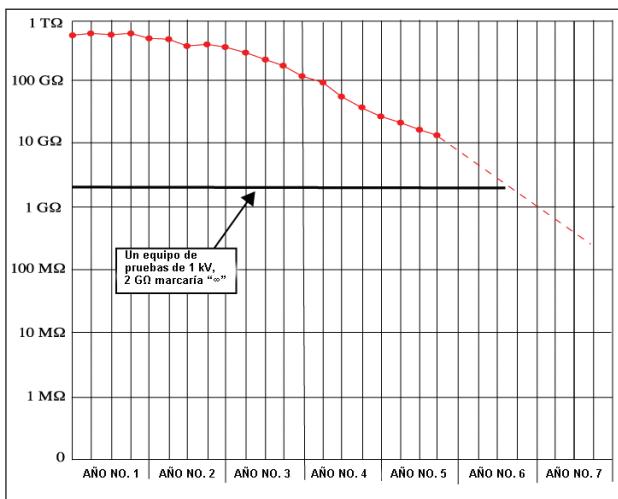


Figura 17: Cambios en la resistencia de aislamiento a valores altos

PRUEBAS DE DIAGNÓSTICO DE AISLAMIENTO CON ALTO VOLTAJE

Las pruebas de diagnóstico de aislamiento estimulan eléctricamente el aislamiento y miden la respuesta. Según dicha respuesta, se pueden sacar algunas conclusiones sobre la condición del aislamiento.

Las pruebas de diagnóstico de aislamiento cubren un amplio rango de técnicas, algunas que involucran equipo portátil y algunas que requieren equipo fijo de consideración. Aquí se considerarán solo aquellas pruebas que se puedan realizar con un equipo portátil de pruebas de aislamiento de CC.

Estas son:

- Pruebas puntuales de tendencia
- Constante de tiempo
- Índice de polarización (PI)
- Escalón de voltaje (SV)
- Prueba de rampa
- Descarga Dieléctrica (DD)

Cada prueba brinda una vista o ventana diferente sobre la condición del aislamiento; el panorama completo está solo disponible cuando se han completado todas las pruebas requeridas.

Prueba de lectura puntual

La prueba de lectura puntual es la más simple de todas las pruebas de aislamiento y la más asociada a los equipos de pruebas de aislamiento de más bajo voltaje; el voltaje de prueba se aplica por un periodo corto específico de tiempo (típicamente 60 segundos puesto que usualmente cualquier corriente de carga capacitiva habrá decaído en este tiempo) y luego se toma una lectura. La lectura se puede comparar entonces con las especificaciones mínimas de la instalación.

A menos que el resultado sea catastróficamente bajo, se lo aprovecha mejor cuando se analiza la tendencia contra valores obtenidos con anterioridad.

Sin embargo, la resistencia de aislamiento es altamente dependiente de la temperatura y por ello se debe corregir a los resultados a una temperatura estándar, generalmente 40° C. Aunque los efectos de la temperatura se describirán más adelante, una buena regla empírica es que por cada incremento de temperatura de 10° C, la corriente se duplica (la resistencia se reduce a la mitad). La clave para hacer que la prueba de lectura puntual sea valiosa se basa en una medición consistente del tiempo, registrar los datos de manera efectiva y generar tendencias a partir de los resultados.

Como se hizo notar anteriormente, la mayor sensibilidad disponible en los equipos de pruebas de diagnóstico de aislamiento con base en microprocesadores permite al operador identificar los problemas de aislamiento en sus etapas iniciales, antes de que esos problemas se hagan catastróficos. En muchos casos, la tendencia es mucho más importante que el valor absoluto.

Compare los dos trazos en la figura 18. El aparato A muestra una resistencia de aislamiento alta mientras que el aparato B muestra un valor bajo. Sin embargo, cuando se examina la tendencia, el aparato B muestra pocas causas de preocupación; ha estado alrededor del mismo valor por varios años y permite suponer que continuará en las mismas condiciones por muchos años por venir. Por el contrario, la curva del aparato A disminuye dramáticamente y el aparato fallará en los próximos años, si no se hace nada para evitarlo.

Mientras que el aparato A tiene valores de resistencia absoluta mucho más altos que el aparato B, la tendencia es bastante preocupante. El aparato B tiene una tendencia casi plana y consistente, lo que indica que la calidad del aislamiento sea probablemente aceptable.

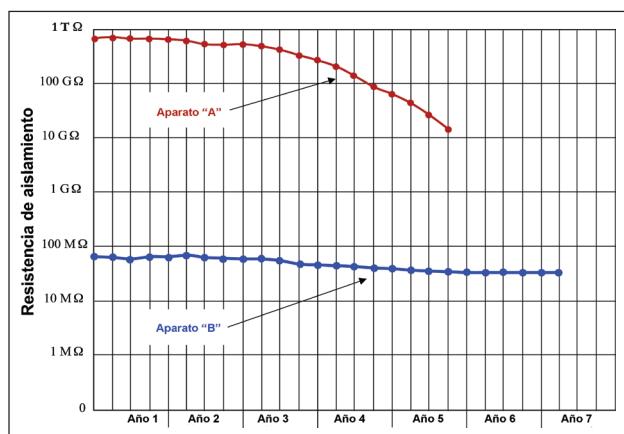


Figura 18: Comparación de tendencias de los resultados de las pruebas

Las lecturas de resistencia de aislamiento se deben considerar de una forma relativa más que absoluta. Pueden variar mucho en un motor o máquina probados tres días seguidos sin que eso signifique que el aislamiento se encuentre en mal estado. Como se mencionó, la información importante es la tendencia de las lecturas en un periodo de tiempo, que muestra una reducción de la resistencia y advierte sobre los problemas futuros. Por tanto, las pruebas periódicas resultan críticas para el mantenimiento preventivo de equipos eléctricos. El intervalo entre pruebas (mensual, semestral, anual, etc.) depende del tipo, localización e importancia del equipo. La evaluación de una serie de lecturas tomadas en un periodo de meses o años transforma al operador en un especialista en diagnósticos.

Se debe realizar las pruebas periódicas del mismo modo cada vez. Utilice las mismas conexiones de prueba y aplique el mismo voltaje de prueba durante la misma cantidad de tiempo. Las pruebas también se deben realizar a aproximadamente la misma temperatura, o deben ser corregidas a la misma temperatura por el operador. Un registro de la humedad relativa cerca del equipo en el momento de la prueba es útil para evaluar la lectura y la tendencia dado que temperaturas bajas y humedad alta podrían sugerir condensación sobre la superficie del aislamiento. Por esta razón resulta esencial asegurar que el equipo que se va a probar esté a una temperatura superior al punto de rocío, puesto que de otra manera se formará condensación que distorsionará las lecturas, a menos que la medición se tome utilizando el terminal de protección.

La tabla siguiente contiene algunas observaciones generales sobre cómo interpretar las pruebas periódicas de resistencia de aislamiento y de qué se debe hacer con el resultado.

| Condición | Qué hacer |
|--|--|
| a) Valores de aceptables a altos y bien mantenidos | <ul style="list-style-type: none"> ■ No es causa de preocupación, bien mantenidos. |
| b) Valores de aceptables a altos, pero con una tendencia constante hacia valores más bajos | <ul style="list-style-type: none"> ■ Localizar y remediar la causa y verificar la tendencia decreciente. |
| c) Bajos pero bien mantenidos | <ul style="list-style-type: none"> ■ Las condiciones probablemente estén bien pero debe verificarse la causa de los valores bajos. Tal vez sea simplemente el tipo de aislamiento utilizado. |
| d) Tan bajos como para no ser seguros | <ul style="list-style-type: none"> ■ Limpie y seque, o eleve los valores de otra manera antes de poner el equipo en servicio (pruebe el equipo mojado mientras se va secando). |
| e) Valores aceptables o altos previamente bien mantenidos pero que bajan súbitamente | <ul style="list-style-type: none"> ■ Realice pruebas a intervalos frecuentes hasta que la causa de los valores bajos se localice y se remedie o, ■ hasta que los valores se estabilicen a un nivel más bajo pero seguro para la operación o, ■ hasta que los valores sean tan bajos que sea inseguro mantener el equipo en operación. |

Prueba de tiempo vs. resistencia

Los procedimientos de prueba estandarizados que se han empleado por años se benefician con las capacidades perfeccionadas de las pruebas de diagnóstico mejoradas. La más básica de estas es el método tiempo-resistencia. Una propiedad importante del aislamiento, y que debe ser bien comprendida, es que se "carga" durante el curso de una prueba debido al movimiento de los electrones como se explicó previamente. Este movimiento de electrones constituye una corriente.

Su valor como un indicador de diagnóstico se basa en dos factores opuestos; la corriente se reduce conforme la estructura alcanza su orientación final, mientras que la "fuga" promovida por la humedad o el deterioro pasa una corriente constante relativamente grande. El resultado neto es que con aislamiento en buen estado, la corriente de fuga es relativamente pequeña y la resistencia se eleva continuamente conforme la corriente decrece por los efectos de carga y absorción dieléctrica. El aislamiento deteriorado pasará cantidades relativamente grandes de corriente de fuga a una tasa constante según el voltaje aplicado, que tenderá a disfrazar los efectos de carga y absorción.

Graficando las lecturas de resistencia a intervalos de tiempo desde el inicio de la prueba produce una curva creciente e uniforme para un aislamiento en buen estado, pero una gráfica "plana" para equipo deteriorado. El concepto de la prueba tiempo-resistencia es tomar lecturas sucesivas a intervalos determinados. Se basa en las magnitudes relativas de las corrientes de fuga y de absorción en aislamientos limpios y secos comparada con las de aislamientos húmedos o contaminados. Un aislamiento en buen estado muestra un aumento continuo de la resistencia en función del tiempo. En un aislamiento contaminado la corriente de fuga es mucho más grande y los efectos de la corriente de absorción son, por tanto, menos aparentes.

Los beneficios de la prueba de tiempo-resistencia son que es relativamente independiente de la temperatura y que puede dar información concluyente sin los registros de pruebas anteriores.

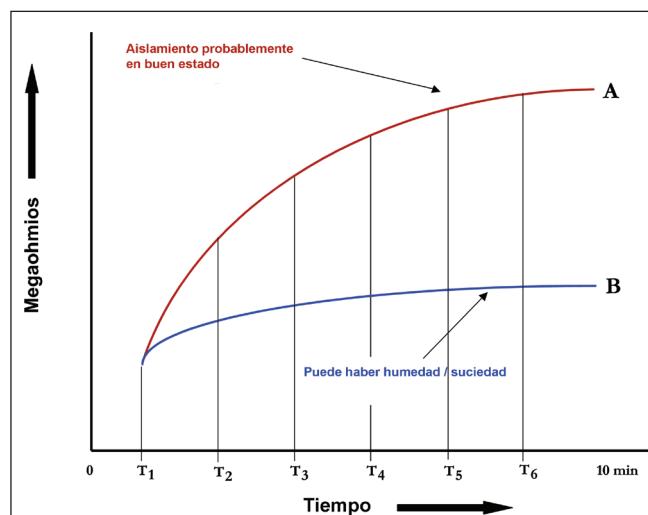


Figura 19: Gráfica de prueba de tiempo-resistencia

Prueba de índice de polarización

La implementación más simple de la prueba de tiempo-resistencia para un aislamiento sólido se representa mediante la conocida prueba de índice de polarización

(PI), que requiere sólo dos lecturas seguidas por una división simple; la lectura del primer minuto se divide por la lectura de décimo minuto para obtener una relación. El resultado es un número puro y se puede considerar independiente de la temperatura puesto que la masa térmica del equipo que se está probando generalmente es tan grande que el enfriamiento total que tiene lugar durante los diez minutos de la prueba resulta despreciable.

En general, una relación baja indica poco cambio, y por lo tanto un aislamiento en mal estado, mientras que una relación alta indica lo opuesto. Las referencias a valores PI típicos son comunes en la literatura, lo que hace que esta prueba sea empleada amplia y fácilmente. Sin embargo, se dice "en general" porque como se mencionó anteriormente hay materiales que muestran muy poca o ninguna absorción dieléctrica. La realización de una prueba en esos materiales produce entonces un resultado muy cercano a 1.

Nótese que las lecturas de resistencia por sí mismas son difíciles de trabajar, puesto que pueden ir de valores enormes en equipos nuevos a unos cuantos megaohmios antes de retirarlos de servicio.

Una prueba como la PI es particularmente útil porque se puede realizar aún en los equipos más grandes, y produce una evaluación auto-contenida con base en lecturas relativas más que en valores absolutos. Pero no se puede calcular PI con un equipo de pruebas de rango limitado, porque "infinito" no es un número. Los equipos de pruebas avanzados alcanzan el rango de teraohmios, y por ello no se salen de la gráfica. Los equipos de producción más grandes y más nuevos se pueden probar fácilmente y producir datos repetibles para registro y subsecuente evaluación de tendencias. El cuadro siguiente destaca valores PI seleccionados y su significado para el operador.

| Índice de polarización | Estado del aislamiento |
|------------------------|------------------------|
| <1 | Malo |
| 1-2 | Cuestionable |
| 2-4 | Adecuado |
| >4 | Bueno |

Los valores superiores a 4 indican un equipo excelente para el que probablemente no sea necesaria ninguna acción dentro del programa de mantenimiento inmediato. Sin embargo, a veces el operador deberá utilizar el criterio para realizar juicios críticos.

Algunos valores de PI (arriba de 5) podrían indicar aislamiento quebradizo o agrietado; esto podría ser casi obvio. Un aumento súbito de PI mayor de 20%, sin haber realizado mantenimiento alguno, es una advertencia; el aislamiento puede mantener su valor por períodos largos, pero no es probable que mejore espontáneamente.

Un beneficio de la prueba PI es que puede proporcionar en diez minutos una indicación de la calidad del aislamiento en equipos muy grandes, que podrían tomar una hora o más para cargarse totalmente, ver figura 20. Con la prueba de lectura puntual, el operador debería esperar hasta que se estabilice la lectura. Por esta razón es normal realizar una prueba PI con voltaje relativamente bajo antes de aplicar los voltajes altos típicamente utilizados en una prueba de tensión no disruptiva.

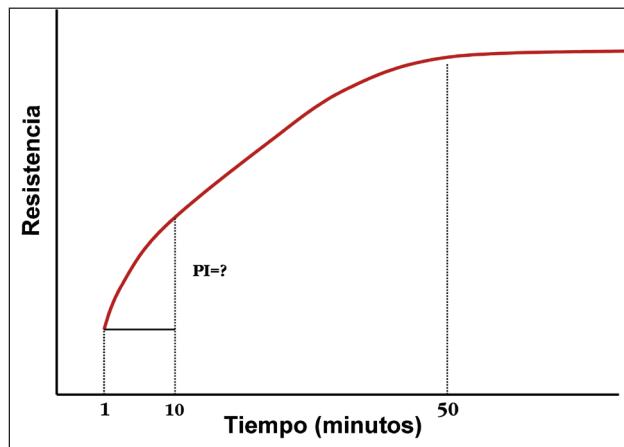


Figura 20: Beneficio de la prueba de polarización en equipos grandes

Aunque la tabla de valores de PI se ha usado durante muchos años y es bien aceptada, ocasionalmente se pueden encontrar lecturas de PI que son excepcionales. Hace muchos años se probó el nuevo estator de un generador de 3750 kVA y se obtuvo una lectura de PI de 13,4. El estator se había enfriado y no cabía duda de que aún estaba en su fase de curado. Las pruebas subsiguientes produjeron valores decrecientes de PI hasta que se estabilizaron en 4,7. Durante el mantenimiento de rutina los valores de PI no alcanzan esos valores elevados.

Resulta interesante destacar que mucha gente ha intentado utilizar la prueba de PI en transformadores llenos de aceite y no puede entender por qué un transformador que está en buen estado les da resultados próximos a 1. La respuesta es simple. La prueba de PI no es adecuada para transformadores llenos con aceite. El concepto depende de las estructuras relativamente rígidas de los materiales aislantes sólidos, donde se requiere energía de absorción para la reconfiguración de la estructura electrónica de moléculas comparativamente fijas en contra del campo del voltaje aplicado. Debido a que este proceso puede llevar a un estado final teórico (en "tiempo infinito", que obviamente no puede lograrse en el campo práctico, pero que puede aproximarse razonablemente), el resultado es una disminución sostenida de la corriente a medida que

las moléculas llegan a su alineamiento "final". La prueba de PI, definida por este fenómeno, no se puede aplicar con éxito a materiales fluidos porque el pasaje de la corriente de prueba a través de una muestra rellena de aceite crea corrientes de convección que constantemente agitan el aceite, lo que da lugar a una carencia caótica de estructura que se opone a la premisa básica de la prueba PI.

Prueba de escalón de voltaje

Puesto que el aislamiento bueno es resistivo, un incremento en el voltaje de prueba lleva a un incremento en la corriente, de modo que la resistencia permanece constante. Cualquier desviación de esto puede significar un aislamiento defectuoso. Con voltajes de prueba más bajos, 500 V o 1000 V, es muy posible que estos defectos no se observen, pero conforme se eleva el voltaje se llega a un punto donde puede ocurrir la ionización dentro de las grietas o las cavidades, lo que da por resultado un incremento de la corriente, y por tanto una reducción de la resistencia de aislamiento. Nótese que no es necesario llegar al voltaje de diseño del aislamiento para que estos defectos se hagan aparentes, dado que se busca simplemente la ionización en el defecto.

La prueba de escalón de voltaje sigue exactamente este principio y puede emplearse de manera práctica con voltajes de 2500 V y superiores. La prueba de escalón de voltaje se puede emplear como una prueba de subvoltaje o sobrevoltaje. Sin embargo, se debe recordar que una prueba de sobrevoltaje puede ocasionar una falla catastrófica si se rompe el aislamiento debido a que los equipos de prueba de alto voltaje poseen mucha potencia disponible. Una prueba de subvoltaje realizada con un equipo de prueba de aislamiento tiene relativamente poca potencia disponible y por lo tanto es menos probable que ocasione una prueba destructiva.

Un procedimiento reconocido estándar consiste en incrementar el voltaje en cinco escalones iguales de un minuto de duración y registrar la resistencia de aislamiento final en cada nivel. Una reducción clara o inusual reducción de la resistencia indica una debilidad incipiente. La electrónica moderna permite capturar esas lecturas de forma automática.

A continuación se muestran resultados posibles de una prueba de escalón de voltaje sobre un motor, de 500 a 2500 voltios y su significado para el operador:

- Si no hay diferencia apreciable en los valores: el aislamiento está en buen estado.
- Si hay diferencia apreciable en los valores: el aislamiento requiere un reacondicionamiento más minucioso.

- Si el aislamiento falla a 2500 V: se debe dudar del estado del motor; lo más probable es que falle cuando se ponga en servicio aun cuando se haga un intento de reacondicionarlo basándose solamente en pruebas a bajo voltaje.

Los gráficos de la figura 21 se tomaron en un motor húmedo y sucio (trazo inferior) y después de limpiarlo y secarlo (trazo superior).

En general, si se observa una desviación de 25% en las mediciones de resistencia en el rango de voltajes sucesivos, es una indicación de la presencia de humedad u otro contaminante. Un daño físico localizado puede revelarse además por ruptura o arco. Una aguja con movimiento tembloroso puede anticipar esta condición cuando se acerca al voltaje de ruptura. Puede ser deseable finalizar la prueba en este punto antes que la ruptura del aislamiento deteriore más aún las condiciones del objeto bajo prueba.

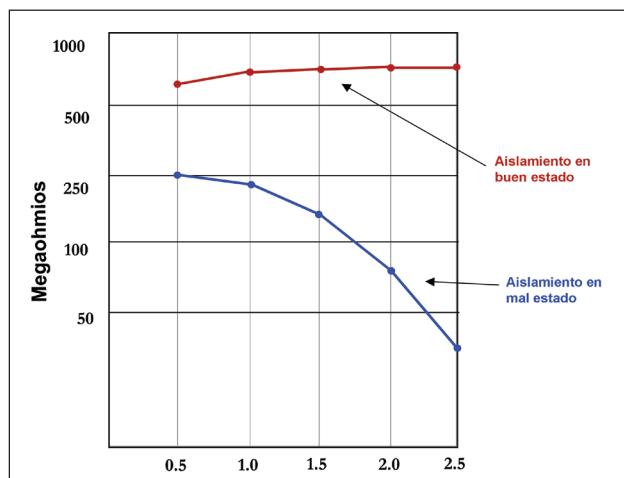


Figura 21: Gráfico de escalón de voltaje

Como en la prueba de PI, la prueba de escalón de voltaje es una prueba repetible y auto-evaluable, que por su corta duración está libre de influencias extrañas tales como el efecto de la temperatura.

Prueba de rampa de voltaje

La prueba de rampa de voltaje se encuentra respaldada en IEEE95-2002 como parte de las prácticas recomendadas para pruebas de aislamiento de maquinaria eléctrica de CA (2300 V y superiores) con aplicación de alto voltaje de CC. Cuando se utiliza este método de prueba, el voltaje de prueba se incrementa gradualmente (en rampa) a una velocidad definida hasta llegar a un nivel final, lo que redunda en un incremento en la corriente. Cualquier variación en la corriente, en comparación con el incremento en el voltaje de prueba aplicado puede proporcionar información de diagnóstico útil sobre el estado del aislamiento.

Esta prueba se realiza usualmente sobre máquinas rotativas, y ayuda a diagnosticar distintos defectos y deterioros en el aislamiento tales como:

- Grietas o fisuras
- Contaminación superficial
- Resina no curada
- Absorción de humedad
- Delaminación
- Huecos

La Oficina de Reclamación (Bureau of Reclamation) de Estados Unidos recomienda esta prueba para un amplio rango de máquinas rotativas con aislamientos de poliéster, asfalto y epoxi-mica. Otra aplicación posible para la prueba de rampa es realizar pruebas sobre dispositivos de supresión de voltaje, monitoreando el voltaje aplicado a una corriente específica.

La prueba de rampa permite controlar mejor el voltaje de prueba aplicado en comparación con la prueba de escalón de voltaje, advirtiendo antes sobre una inminente ruptura de aislamiento y por lo tanto, permite evitar daños en el aislamiento. Adicionalmente, la velocidad de incremento de voltaje es típicamente de 1000 V por minuto mientras que durante un incremento en escalón la velocidad es típicamente de 1000 V por segundo. Una menor velocidad de incremento de voltaje hace menos probable la aparición de daños en el aislamiento. Como ventaja adicional, la prueba de rampa permite al usuario separar la corriente de fuga de las corrientes capacitivas y de polarización. Esto permite detectar pequeños defectos en el aislamiento de un modo más fácil.

La prueba de rampa de voltaje, así como la prueba de escalón de voltaje, requiere del operador la interpretación de los resultados de pruebas y la determinación del estado del aislamiento a partir de los gráficos generados. A continuación se muestra una guía rápida sobre qué información entregan los resultados gráficos:

- Los devanados en buen estado producen una curva de corriente suave, de crecimiento casi lineal en función del voltaje aplicado.
- Se debe considerar cualquier desvío de una curva suave como una advertencia de que la prueba del aislamiento puede estar acercándose a una posible ruptura (los desvíos pueden aparecer tan cerca como 5% por debajo del voltaje de ruptura).
- Un brusco aumento en la corriente generalmente indica que la ruptura es inminente.
- No es común una brusca caída en la corriente, pero si ocurre cuando el voltaje de prueba supera al máximo voltaje operativo del devanado, también puede indicar una ruptura inminente.

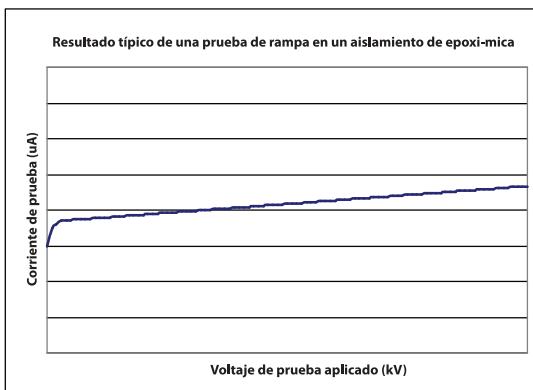


Figura 22: Resultado típico de una prueba de rampa en un aislamiento de epoxi-mica

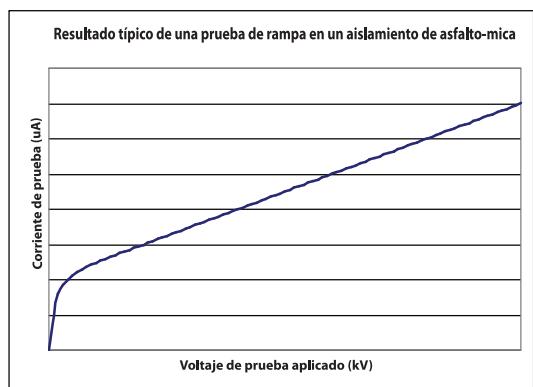


Figura 23: Resultado típico de una prueba de rampa en un aislamiento de asfalto-mica

Si se comparan los resultados del aislamiento de epoxi-mica de la figura 22, con los del aislamiento de asfalto-mica de la figura 23, la diferencia observada se debe al nivel de corriente de absorción existente. El aislamiento de asfalto-mica presenta un nivel muy superior de corriente de absorción comparada con la corriente de fuga de conducción. Esto redunda en una pendiente mucho más empinada. Sin embargo, ambos aislamientos se diagnostican en buen estado debido a la respuesta lineal observada.

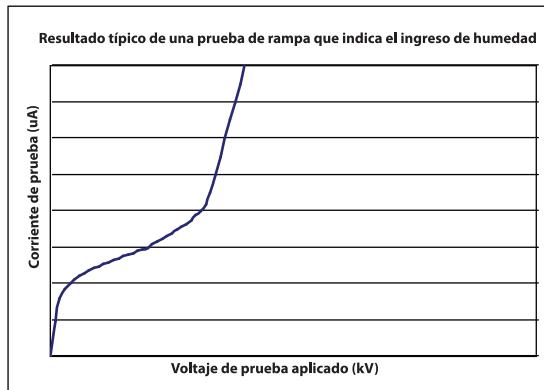


Figura 24: Resultado típico de una prueba de rampa que indica el ingreso de humedad

La figura 24 muestra la respuesta de un aislamiento con humedad absorbida. Esto puede deberse, por ejemplo, a un periodo prolongado sin uso. Esta prueba, debido a un rápido incremento en la corriente, hubiera sido detenida para evitar una ruptura.

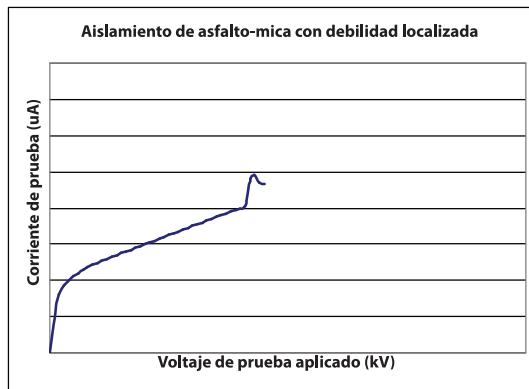


Figura 25: Aislamiento de asfalto-mica con debilidad localizada

Viejos aislamientos de asfalto pueden entregar una respuesta levemente no lineal y pueden mostrar desviaciones o irregularidades muy pequeñas en el gráfico de corriente. Una debilidad localizada de importancia presentará un incremento brusco mucho mayor en la corriente, como se muestra en la figura 25. En este caso la prueba fue cancelada dado que la curva se tornaba vertical; era una inminente una ruptura en este caso

Si existen grietas en el aislamiento de pared a tierra, también se observará una brusca respuesta de corriente casi vertical, a menudo precedida por pequeños picos, antes de que finalmente ocurra la ruptura. La figura 26 muestra una respuesta típica, en este caso en un aislamiento de epoxi-mica.

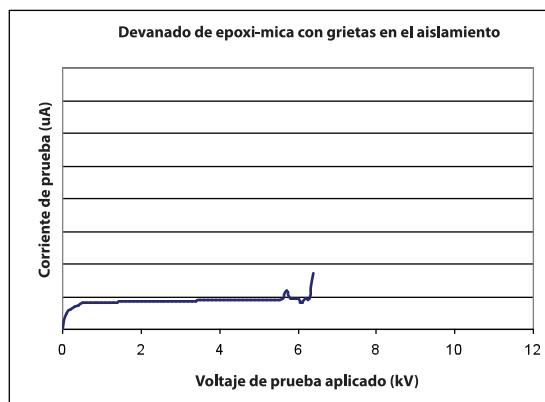


Figura 26: Devanado de epoxi-mica con grietas en el aislamiento

También se pueden comparar las curvas de corriente de diferentes fases. Los tres devanados deberían entregar resultados comparables. Una fase que muestra una respuesta diferente, como en la figura 27, generalmente indica un problema en el estado del aislamiento.

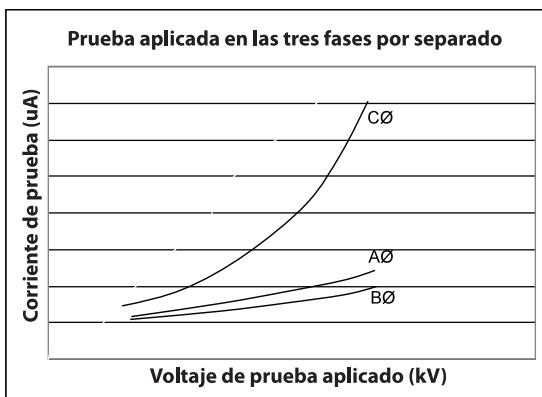


Figura 27: Prueba aplicada en las tres fases por separado

Los gráficos que se muestran son ejemplos del tipo de fallas que se pueden diagnosticar con la prueba de rampa. Se puede obtener mayor detalle sobre las capacidades de diagnóstico de esta prueba consultando a IEEE95-2002.

Prueba de descarga dieléctrica

La prueba de Descarga Dieléctrica (DD) es un método de prueba relativamente nuevo desarrollado por EdF, la empresa de energía nacional de Francia, basado en muchos años de investigación. Mientras que los otros métodos mencionados miden las corrientes que fluyen durante el proceso de carga, la prueba DD mide la corriente que fluye durante la descarga de la muestra bajo prueba. De este modo, no es una prueba de resistencia de aislamiento pura sino más bien un complemento a las pruebas de aislamiento tradicionales.

La carga que se almacena durante la prueba de aislamiento se descarga de manera automática al final de la prueba cuando los resistores de descarga del equipo de prueba de aislamiento se conectan a través de los terminales.

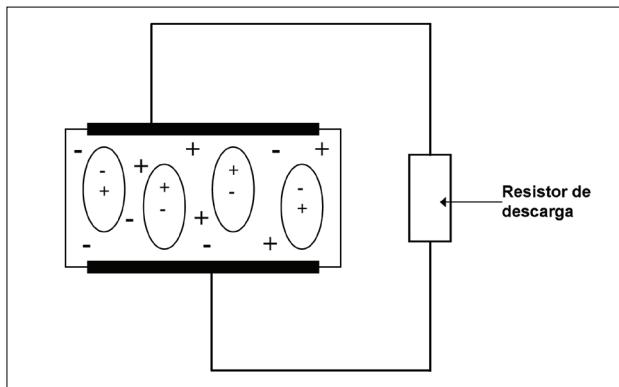


Figura 28: Descarga de la carga almacenada en el objeto bajo prueba

La velocidad de descarga depende solamente de los resistores de descarga y de la cantidad de carga almacenada en el aislamiento. Sin embargo, la carga capacitiva se descarga rápidamente hasta que el voltaje a través del aislamiento se ha reducido casi a cero. En ese momento el efecto de las corrientes de fuga será despreciable. De esta manera, solo queda la inversión de la absorción dieléctrica. Esto se conoce como reabsorción dieléctrica y es una imagen especular de la absorción dieléctrica.

La corriente capacitativa decae rápidamente desde un valor muy alto con una constante de tiempo relativamente corta (unos pocos segundos). La corriente de absorción (o de reabsorción durante una descarga) siempre comienza en un nivel alto pero tiene una constante de tiempo mucho más larga (hasta de muchos minutos). Es ocasionada por los dipolos que hacen aleatoria su alineación dentro del aislamiento y la capa de electrones que regresa a una forma no distorsionada. Esto se comporta como una corriente que fluye si el circuito de descarga todavía está conectado, o un voltaje que reaparece en la muestra si se deja en circuito abierto. La rápida eliminación de los efectos de las corrientes de fuga y capacitativa permite interpretar el grado de polarización del aislamiento y relacionarlo con la humedad y otros efectos de polarización.

El objeto bajo prueba se carga primero de 10 a 30 minutos a un alto voltaje, hasta que haya tenido lugar la absorción total. (Los equipos de pruebas de aislamiento de Megger que automatizan esta prueba cargan la muestra bajo prueba durante 30 minutos). En este tiempo, la capacitancia se carga completamente y la absorción eléctrica está en esencia, completa. Solo continúa fluyendo la corriente de fuga. En este punto se remueve el voltaje de prueba y el aislamiento se descarga a través de los resistores de descarga internos del instrumento para disipar rápidamente la carga capacitiva. Después de 60 segundos de descarga, se mide el flujo de corriente remanente.

En este punto la capacitancia se ha descargado y el voltaje colapsado de modo que la carga almacenada en los dipolos puede verse independientemente de las corrientes de "enmascaramiento" que dominan durante la fase de descarga de una prueba de aislamiento.

Los resultados medidos se introducen en la fórmula siguiente y se calcula un índice.

$$\frac{\text{Corriente que fluye después de 1 minuto (nA)}}{\text{Voltaje de prueba (V)} \times \text{capacitancia (\mu F)}}$$

La medición depende de la temperatura, de modo que es importante realizar la prueba a una temperatura de referencia o registrar la temperatura. El aislamiento en equipos de alto voltaje a menudo se compone de capas, donde cada capa tiene su propia capacitancia y resistencia de fugas asociadas. Cuando el aislamiento está construido de esta manera, el objetivo es hacer cada capa de manera que la solicitud de voltaje sea compartida equitativamente entre capas. Cuando se descarga el aislante, la carga de cada capa se reducirá en forma pareja hasta que no haya voltaje remanente.

Cuando hay una capa con fallas entre dos capas en buen estado, disminuye su resistencia de fuga mientras que su capacitancia probablemente permanece igual. El resultado de una prueba estándar de aislamiento será determinado por las capas en buen estado y no es probable que se detecte la condición anterior. Pero durante la descarga dieléctrica, la constante de tiempo de la capa con fallas será diferente que las otras y producirá un valor DD más alto. Un valor de DD bajo indica que la corriente de reabsorción está decayendo rápidamente y que la constante de tiempo de cada capa es similar. Un valor alto indica que la reabsorción exhibe tiempos de relajación prolongados, lo que puede indicar un problema.

A través de investigación práctica en condiciones típicas, principalmente llevada a cabo por EdF, se llegó a los factores de calidad de la siguiente tabla. Esta técnica fue desarrollada para generadores de alto voltaje pero se puede aplicar en cualquier aislamiento de capas múltiples.

| Valor de descarga (en mA V ⁻¹ F ⁻¹) | Estado del aislamiento |
|--|------------------------|
| > 7 | Malo |
| 4 - 7 | Pobre |
| 2 - 4 | Cuestionable |
| < 2 | Adecuado |

Problemas diferentes/pruebas diferentes

Como se acaba de ver, la prueba de descarga dieléctrica se puede usar para identificar problemas en una capa individual de un aislamiento de capas múltiples. Otros métodos de prueba podrían no apuntar a problemas en este tipo específico de estructura de aislamiento. En forma similar, la prueba de índice de polarización resulta particularmente valiosa para la detección del ingreso de humedad, aceite y contaminaciones penetrantes similares. Estos contaminantes proporcionan trayectorias convenientes para fugas eléctricas, que dañan el aislamiento circundante y finalmente se queman en forma de "corto". Este tipo de problemas se revela casi con cualquier voltaje de prueba y aparecerá como un PI característicamente "plano". La humedad y los contaminantes también reducirán los valores de las lecturas, pero esto requiere un valor previo para comparación; la prueba PI tiene la ventaja de hacer una comparación interna.

Sin embargo, otros problemas parecen como que "aprueban" una prueba de PI o una prueba simple de lectura puntual al producir valores de resistencia altos con un voltaje dado. Tales problemas incluyen los daños físicos localizados como agujeros, o aislamientos secos y quebradizos en equipos envejecidos. Las pruebas de escalón de voltaje revelan este tipo de problemas. Una mayor cantidad de imperfecciones dejarán pasar corriente conforme se apliquen voltajes cada vez más altos, y se traducirán en una disminución de la resistencia. El voltaje más alto producirá arcos a través de los pequeños espacios de aire, proporcionando una advertencia temprana de un problema incipiente. A medida que el equipo envejece, tales espacios pueden estrecharse por acumulación de suciedad y humedad hasta que se produce un corto a tierra.

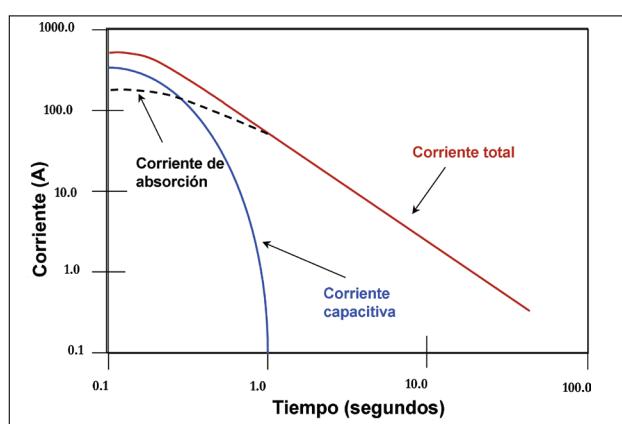


Figura 29: Corrientes de reabsorción

APÉNDICES

Fuentes potenciales de error / Asegurar resultados de prueba de calidad

La siguiente sección identifica varias áreas de error potencial en pruebas de aislamiento arriba de 1 kV. Estos factores pueden ser de menor importancia en pruebas de 1 kV, pero los incrementos de voltajes y sensibilidades los hacen críticos para pruebas de mayor voltaje.

Cables de pruebas

Se debe tener cuidado de instrumentos con cables de baja calidad cuya especificación de voltaje es menor que el voltaje empleado. Es extremadamente importante que las únicas corrientes de fuga durante una medición sean las del aislamiento bajo prueba. Si los cables de prueba de por sí producen fugas, se puede estar midiendo la resistencia de aislamiento de los cables y no la del objeto bajo prueba.

Todos los cables de prueba suministrados con los equipos de prueba de aislamiento de Megger son de alta calidad y se han probado para resistir voltajes claramente superiores al voltaje más alto generado por el instrumento en particular. Aun así, es importante reducir las fugas dispersas evitando que los cables de prueba hagan contacto entre sí, con tierra y particularmente con agua.

Se puede encontrar información adicional sobre el diseño y la importancia de condiciones de operación seguras en la página 34.

Mediciones superiores a 100 GΩ

Las mediciones de hasta 100 GΩ se pueden realizar sin precauciones especiales, asumiendo que los cables de prueba estén razonablemente limpios y secos. El terminal de protección se puede utilizar para eliminar los efectos de fugas superficiales si es necesario.

Se requieren mayores precauciones por sobre 100 GΩ dado que las corrientes de fuga dispersas pueden deteriorar la calidad de las lecturas tomadas.

Tenga las siguientes precauciones:

- Los cables de prueba no deben tocarse entre sí o con otro objeto puesto que esto inducirá trayectorias de fuga.
- Deben evitarse las puntas afiladas en las conexiones de los cables de prueba puesto que esto promoverá una descarga por efecto corona.
- Los conectores de prueba del instrumento deben ser profundos para que no ocurran fugas indeseadas entre los terminales.

Declaraciones de exactitud

Preste mucha atención a la declaración de exactitud de un equipo de pruebas de aislamiento. No acepte un simple más/menos porcentaje en unidades digitales. La declaración también debe incluir más/menos un número de dígitos, puesto que ninguna pantalla digital puede fijar su último dígito (dígito menos significativo o l.s.d.) a un número único. Las exactitudes especificadas como "porcentaje de lectura" indican el mismo error en todos los puntos de la escala.

Las declaraciones analógicas listadas como "porcentaje de escala" o "deflexión total de escala" (f.s.d.) pueden ser engañosas. Debido a que el intervalo de exactitud se basa en la longitud total de la escala, introduce un porcentaje creciente de error a medida que se elevan las lecturas en una escala logarítmica. En otras palabras, la misma cantidad de anchos de aguja en el extremo bajo expandido de la escala cubrirá solamente unos pocos megaohmios, mientras que en el extremo superior contraído será de cientos de megaohmios. Por tanto, cuando se requiera una especificación de exactitud deseada, no se debe detener en la declaración de porcentaje sino que se deben examinar también los términos.

Las declaraciones de exactitud también pueden resultar engañosas si no se las explica con cuidado. Asegúrese de verificar el rango cubierto por la declaración de exactitud de la hoja de datos, dado que puede variar de forma dramática para distintos instrumentos. Hay una diferencia significativa entre un instrumento que posee una exactitud de 5% hasta 40 GΩ o 100 GΩ, y uno que posee una exactitud de 5% hasta 1 TΩ. Algunos instrumentos proveen una declaración de exactitud pero no indican el rango de aplicación. Siempre consulte por el rango para una exactitud determinada, si no se lo especifica previamente.

Nota: Desconfíe de instrumentos que no posean curvas de carga publicadas.

Suministro del voltaje indicado

La regulación del voltaje de un equipo de pruebas de aislamiento se indica en el manual de instrucciones con una gráfica de carga que muestra el voltaje de salida contra la carga de resistencia. La curva de carga asegura que, con valores de resistencia de aislamiento típicos, el equipo de pruebas de aislamiento suministra el voltaje de prueba nominal pleno al objeto bajo prueba. Aunque esto puede parecer obvio, no es necesariamente el caso a menos que así lo establezca el fabricante del equipo de pruebas. Un equipo de pruebas mal regulado puede bajar su carga con una carga resistiva alta, de modo que el aislamiento del objeto bajo prueba puede experimentar solo

una fracción del voltaje de prueba nominal, que el transformador puede entregar solamente en condiciones máximas. No es probable que esta instrumentación venga provista con una curva de carga.

Esta fue la condición que descubrieron los inspectores de agencias de especificaciones, como UL®, entre "equipos de pruebas" que fueron modificados de forma improvisada a partir de transformadores y otros componentes en el campo, para realizar pruebas de alto potencial. Las inadecuaciones de tales sistemas llevaron a una terminología muy específica relativa al voltaje de salida que aparece comúnmente ahora en la literatura de las normas. Los equipos de pruebas de aislamiento de Megger suministran y mantienen el voltaje de prueba nominal una vez que se aplica una carga mínima en proporción a los valores típicos de aislamiento (generalmente 1 a 10 MΩ, según el modelo y el voltaje seleccionados). El voltaje de prueba es generalmente de algunos voltios por encima del nominal, pero no debe caer por debajo de este, para mantener la integridad de la prueba y la repetibilidad cuando se realice el mantenimiento preventivo programado. Si se requieren datos de informe excepcionalmente exactos, algunos modelos muestran el voltaje de prueba real además del voltaje seleccionado y esta información se incluye entre los datos proporcionados en la conclusión.

Rechazo de interferencia

La interferencia es el ruido eléctrico producido a distintas frecuencias, que puede aparecer en la muestra bajo prueba. Generalmente se debe a corrientes o voltajes inducidos por equipos adyacentes y es muy común en subestaciones, en particular en las de alto voltaje donde predominan las frecuencias de potencia. Este ruido eléctrico superpone una señal de CA en la corriente de prueba de CC y puede ocasionar variaciones considerables en las lecturas y puede incluso impedir que el operador obtenga una lectura, si está más allá de la capacidad de su instrumento. Como ejemplo, un ruido eléctrico de 4 mA de 50/ 60 Hz es bastante típico de los que se puede encontrar en subestaciones grandes (400+ kV).

Sea consciente de la capacidad del equipo de pruebas de aislamiento para cancelar efectivamente los efectos de este ruido de CA, que redundará en la capacidad de realizar mediciones en condiciones cada vez más difíciles. Sin embargo, no todo el ruido se limita a las frecuencias de potencia. Para tomar en cuenta otras frecuencias, algunos instrumentos en el tope del rango incorporan filtros de software adicionales, que pueden eliminar los efectos de este ruido. Es importante que el instrumento que se use concuerde con el nivel anticipado de frecuencia.

Reglas sobre realización de pruebas y comparación

La comparación de resultados para determinar la velocidad de degradación resulta clave para el concepto general de mantenimiento preventivo/predictivo. Sin embargo, se debe destacar que este concepto se aplica a lecturas tomadas a intervalos discretos de mantenimiento. Aun así, resulta imperativa una estandarización estricta de los procedimientos y las condiciones de prueba. La comparación entre lecturas puntuales tomadas en el momento es un escenario totalmente diferente y cargado con errores potenciales.

Es tentador tratar de respaldar las pruebas tomando lecturas adicionales. Se pueden hacer algunos ajustes al objeto bajo prueba o a la disposición del mismo, o alguien más puede tener dificultades para aceptar el resultado y desear verificarlo. Pero un equipo de pruebas de aislamiento no es lo mismo que un multímetro. Las pruebas de alto voltaje se comportan como el Principio de Incertidumbre de Heisenberg (no se pueden conocer ambas, la velocidad y la posición de un electrón) aplicado a aislamiento. Esto quiere decir, el acto de la medición afecta al objeto que se está midiendo, de modo que las lecturas subsecuentes no se están tomando precisamente en el mismo objeto.

Como se ha descrito, el acto de realizar una prueba de aislamiento polariza el material aislante. Esto de hecho modifica su configuración eléctrica y sus propiedades dieléctricas. Debido a que el material aislante es, por diseño, un mal conductor, puede tomar un tiempo considerable para que ocurra su relajación o el retorno a una configuración aleatoria. Inmediatamente después de la finalización de una prueba, el elemento bajo prueba no es exactamente el mismo que antes de la prueba. Una prueba realizada inmediatamente después será afectada, a veces en forma considerable, por la carga remanente de la primera prueba. ¿Qué medición es la correcta? ¡Ambas lo son! Resulta esperable que cada una de ellas dé una medición correcta de las condiciones del aislamiento en el momento de la prueba. Además, los procedimientos estándar de descarga normales de la industria no son suficientes para la institución de repetición de pruebas. Estos procedimientos tienen por objeto la seguridad del personal, no la calificación del objeto bajo prueba. Las cargas residuales pueden permanecer por horas o incluso días, que pueden estar por debajo de la percepción humana pero todavía ser enormes para un medidor sensible. El equipo se debe dejar conectado a tierra durante varias horas, o preferentemente hasta el día siguiente, antes de realizar pruebas adicionales. Y aún entonces no deben pasarse por alto los factores externos, en especial la temperatura.

Esto no significa que no deba realizarse nunca la repetición de la prueba. Como información relativa, puede ser bastante valiosa. Pero se debe mantener en perspectiva. No espere que las lecturas coincidan.

Dos operadores distintos también pueden no observar el mismo grado de detalle con respecto al procedimiento. La temperatura es un factor. Si el equipo se enciende, tal vez para verificar su funcionamiento, y luego se vuelve a probar, la segunda prueba no es necesariamente comparable con la primera. El tiempo de la prueba también se pasa fácilmente por alto. Un operador puede tomar el tiempo rígidamente mientras que otro simplemente espera la estabilización de la lectura. Esto puede dar lugar a que las mediciones se tomen en puntos diferentes de la curva de tiempo-resistencia (como se ha ilustrado en la prueba de lectura puntual), y de nuevo los dos resultados no serán comparables.

Si esto parece una excesiva atención a los detalles, considérese lo expresado por las agencias de normas. Las organizaciones como UL® y ASTM® no escriben procedimientos que digan, en efecto, "conecte un medidor y tome una lectura". Más bien, ellos especifican cada variable, incluida la configuración, el procedimiento y las características del instrumento de prueba, antes que los resultados se consideren en conformidad. Los procedimientos de mantenimiento estándar ameritan una atención no menor.

Especificación CAT

Además de las obvias especificaciones de desempeño, también se debe evaluar a la instrumentación de acuerdo a diferentes normas de calidad. Entre ellas, la seguridad es la más importante. Una de las normas de seguridad más reconocida y respetada fue establecida por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) en EN61010-1:2001. Esta norma define los requerimientos que deben cumplir los instrumentos de prueba para proteger contra descargas y explosiones por arcos eléctricos en entornos específicos. No es suficiente simplemente determinar que un instrumento tiene una "especificación CAT", como se dice normalmente. La especificación CAT debe ser comprendida, dado que describe rigurosamente en qué tipo de entornos eléctricos puede trabajar con seguridad o no, con un equipo dado.



Figura 30: Los modelos MIT de Megger aseguran que la especificación CAT se aplica a todos los terminales por razones de seguridad. Algunos de los instrumentos en el mercado hoy en día son engañosos.

Lineamientos de la especificación CAT

La especificación CAT se compone de dos parámetros: uno que indica el nivel del sistema y otro que especifica el voltaje de operación nominal. Designar a una unidad como "CAT IV 600 V" significa que la misma es segura de operar en cualquier entorno eléctrico hasta incluso de CAT IV, sobre un cable o aparato especificado a 600 V nominal entre fase y tierra. Evite los productos que determinan la especificación CAT pero que no aclaran el nivel de voltaje. Esto es información incompleta y su ausencia puede resultar costosa en términos de operación segura. La especificación CAT define el nivel de transitorios (pico de voltaje o sobrevoltaje) que el instrumento ha sido diseñado para soportar. Los transitorios varían en tamaño y duración, dependiendo de la fuente. Un transitorio puede tener muchos kV en amplitud pero con una duración muy corta, donde 50 µs (microsegundos) es un intervalo típico. El peligro principal consiste en que cuando ocurre en la parte superior del voltaje senoidal, puede dar inicio a un arco que continuará hasta el fin del ciclo. En un entorno CAT IV, la corriente disponible de cortocircuito puede superar los 1000 amperios. Dentro del instrumento que se encuentra probando el circuito, esto puede generar cientos de kilovatios de calor en un espacio pequeño, durante algunos milisegundos. La rápida expansión del aire puede ocasionar la desintegración o explosión del instrumento. Fuego, quemaduras y esquirlas peligrosas serán la consecuencia de esto.

Los instrumentos diseñados para una categoría en particular tienen suficiente despeje entre las partes críticas para evitar que un arco genere la ruptura inicial cuando ocurre un transitorio. IEC61010 define los requerimientos de diseño necesarios para declarar que un instrumento cumple con una determinada especificación de categoría, y especifica tanto los requerimientos eléctricos como los físicos (llamadas distancias de fuga y de despeje) que deben tener los circuitos y el estuche.

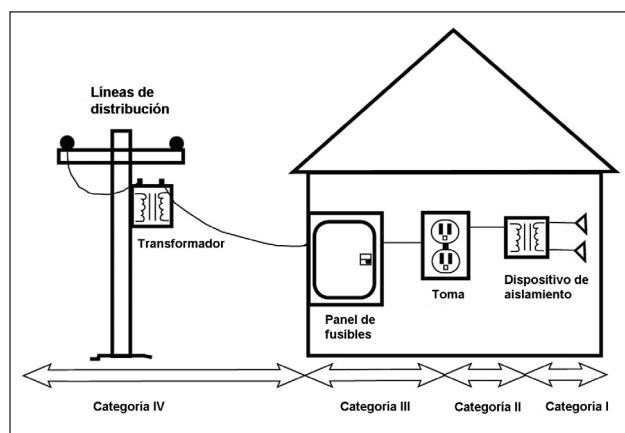


Figura 31: Alimentación eléctrica separada en categorías

La importancia de la especificación CAT

La especificación CAT se determina por la distancia aguas abajo del transformador que alimenta a las instalaciones. Las líneas de transmisión aéreas o subterráneas constituyen el entorno CAT IV debido a que la energía disponible desde el suministro es mucho mayor cerca del transformador. Este es el entorno más peligroso de todos y requiere del nivel más alto de protección. A medida que el voltaje pasa por el panel de fusible hacia el edificio, la impedancia del circuito aumenta y los transitorios resultan amortiguados, reduciendo de esta manera la energía disponible en el transitorio. Este proceso de amortiguamiento progresivo, menores energías y disminución del riesgo continúa por las siguientes categorías. Aguas abajo de la entrada de la alimentación se encuentra el entorno CAT III. Desde la toma en adelante, la especificación es de CAT II, y en el interior de los equipos (fotocopiadoras, televisores, etc), aislados por un transformador interno, el entorno es CAT I.

Esta atenuación es la responsable de que generalmente los equipos hogareños no explotan, pero sí puede hacerlo un multímetro. El rango de medición de voltaje de un multímetro puede incluir la especificación para el entorno CAT IV, y de esa manera generar la impresión errónea de que el equipo de pruebas se puede utilizar allí.

Algunas estadísticas básicas sobre la especificación CAT

No confunda el voltaje de operación o estacionario con los voltajes transitorios. El equipo de pruebas debe ser capaz de soportar de manera segura transitorios de muchas veces el voltaje nominal. Por ejemplo, para especificar a un equipo de pruebas como seguro en una línea de 300 Vrms de fase a neutro en un entorno CAT IV, este debe ser capaz de soportar un impulso de 4 kV.

La serie de equipos de MIT y S1 de Megger con una salida máxima de voltaje de 5 y 10 kV están clasificados como unidades CATIV 600V, lo cual indica que son capaces de soportar un impulso de 8 kV. Los equipos de 15 kV recientemente introducidos, el MIT1525 y el S1-1568 están clasificados como CATIV 1000 y son capaces de soportar un impulso de 12 kV.

¿Cuál es el riesgo real de estos hechos? Transitorios pequeños de unos pocos cientos de voltios ocurren todos los días, pero por fortuna, los transitorios grandes (de 5 a 12 kV) no ocurren a menudo. Pero eso no significa que no se los debe tener en cuenta. Al trabajar con un instrumento correctamente especificado, las probabilidades de una ruptura peligrosa se encuentran en el orden de una en un millón por cada hora conectado a la alimentación. Pero al reducir la protección en una categoría, las probabilidades de un accidente se incrementan por un factor de alrededor de 30. Esto significa que por

cada 100 operadores que utilizan instrumentos en una categoría equivocada sobre cargas vivas por una hora por día, 200 días por año, es probable que se produzca una situación peligrosa cada 18 meses.

Pruebas de resistencia de aislamiento de maquinaria rotativa

En marzo del año 2000, la Junta de Normas de IEEE-SA aprobó una revisión de la norma IEEE 43-1974 por parte de Electric Machinery Committee de la IEEE Power Engineering Society. Esta revisión es la norma IEEE 43-2000, la "Práctica recomendada de IEEE para pruebas de resistencia de aislamiento en maquinaria rotativa". Los cambios en los diversos tipos de aislamiento usados en las maquinarias eléctricas rotativas han resultado en diferentes características de resistencia de aislamiento, y por lo tanto, han requerido una revisión sustancial de la norma IEEE. De acuerdo con IEEE, la norma está dirigida a:

- Individuos/organizaciones que fabrican máquinas rotativas.
- Individuos/organizaciones que sean responsables de la aceptación de máquinas rotativas nuevas.
- Individuos/organizaciones que prueben y den mantenimiento a máquinas rotativas.
- Individuos/organizaciones que operen máquinas rotativas.

Megger recomienda que cualquiera que esté involucrado en la prueba y/o el mantenimiento de maquinaria rotativa revise esta norma detalladamente. Describiremos algunos de los puntos más destacables.

La norma 43-2000 del IEEE recomienda un procedimiento para la medición de la resistencia de aislamiento de los devanados de la armadura y del campo en máquinas rotativas especificadas a 1 hp, 750 W o potencia mayor y se aplica a máquinas sincrónicas, máquinas de inducción, máquinas de CC y condensadores sincrónicos. No se aplica a máquinas de potencia fraccionaria. También recomienda el voltaje para las prueba de aislamiento (basada en los rangos del devanado) y los valores mínimos aceptables de la resistencia de aislamiento para los devanados de las máquinas rotativas de CA y CC.

La siguiente tabla proporciona lineamientos para el voltaje de CC que será aplicado durante una prueba de resistencia de aislamiento. Se recomiendan voltajes de prueba de hasta 10 kV para devanados especificados para más de 12 kV.

| *Voltaje especificado para el devanado (V) | Voltaje de CC en pruebas de resistencia de aislamiento (V) |
|--|--|
| <1000 | 500 |
| 1000-2500 | 500-1000 |
| 2501-5000 | 1000-2500 |
| 5001-12,000 | 2500-5000 |
| >12,000 | 5000-10,000 |

* Voltaje nominal de línea-a-línea para máquinas trifásicas de CA, voltaje de línea-a-tierra para máquinas monofásicas, y voltaje directo nominal para máquinas de CC o devanados de campo

La norma recomienda que cada fase sea aislada y probada por separado (de ser posible) dado que este enfoque permite realizar comparaciones entre fases. Las dos fases que no son probadas deben ser conectadas a tierra en la misma tierra que el núcleo del estator o el cuerpo del rotor. Cuando todas las fases son probadas de forma simultánea, lo único que se prueba es el aislamiento a tierra. Las mediciones de resistencia de aislamiento deben ser hechas con todo el equipo externo (cables, capacitores, supresores de sobrevoltaje, etc.) desconectados y conectados a tierra debido a que estos objetos pueden influenciar la lectura de la resistencia. Se deberá utilizar una tierra común para prevenir pérdidas de fuga en el circuito de tierra, que puedan afectar los resultados de la prueba.

La norma cita a la prueba de resistencia de aislamiento y la prueba del índice de polarización (PI), y recomienda realizar ambas pruebas (si es posible). Esto indica que el historial de las pruebas deberá ser usado para el seguimiento de los cambios. Si el historial no está disponible, la norma proporciona valores mínimos para ambas pruebas que se pueden utilizar para estimar la situación en que se encuentra el devanado. Estos son los valores más bajos recomendados para realizar una prueba de sobrevoltaje o poner en operación.

Los valores mínimos recomendados para el PI están basados en la clase térmica de los materiales de aislamiento y se aplican a todos los materiales de aislamiento indiferentemente de su aplicación de acuerdo con el IEC 60085-01: 1984. La prueba del PI no es aplicable para devanados de campo no aislados. Tenga en cuenta que un PI muy alto (mayor a 8) para devanados de estatores con aislamientos de algodón barnizado, hojas de mica-resina o asfáltico, puede indicar que el aislamiento ha envejecido térmicamente y puede estar en riesgo de fallar. Se puede realizar una inspección física para confirmar si el aislamiento está reseco y quebradizo.

| Especificación de clase térmica | Valor mínimo de PI |
|---------------------------------|--------------------|
| Class A | 1,5 |
| Class B | 2,0 |
| Class F | 2,0 |
| Class H | 2,0 |

La resistencia de aislamiento mínima recomendada después de un minuto a 40°C se puede determinar a partir de la siguiente tabla. La resistencia mínima de una fase del devanado de una armadura de tres fases probada con las otras dos conectadas a tierra debe ser aproximadamente el doble de la del devanado total. Si cada fase es probada por separado (con los circuitos de protección usados en las fases que no están bajo prueba), la resistencia mínima observada deberá ser tres veces el devanado total.

| Resistencia mínima del aislamiento (MΩ) | Muestra de prueba |
|---|--|
| kV* + 1 | Para la mayoría de devanados de antes de 1970, todos los devanados de campo, y otros no descritos abajo. |
| 100 | Para la mayoría de armaduras de CC y devanados de CA construidos alrededor de 1970 (bobinas pre-formadas). |
| 5 | Para la mayoría de las máquinas con bobinas del estator bobinadas al azar y bobinas preformadas con rango inferior 1 kV. |

* kV es el voltaje nominal de terminal-a-terminal de la máquina, en kV rms.

La especificación de la máquina determina si los devanados del motor deben alcanzar el valor mínimo para cualquiera de las pruebas de resistencia de aislamiento o prueba de PI, o si deben alcanzar el mínimo para ambas pruebas.

| Especificación de la máquina | Criterio de evaluación |
|------------------------------|--|
| 10.000 kVA o menos | Debe tener, YA SEA un valor de la prueba de PI o BIEN un valor de la prueba de resistencia de aislamiento (a 40°C) por sobre los valores mínimos recomendados. |
| Superior a 10.000 kVA | Debe tener, TANTO el valor de la prueba de PI COMO el valor de la prueba de resistencia de aislamiento (a 40°C) por sobre los valores mínimos recomendados. |

Efectos de la temperatura

Las variaciones de temperatura pueden tener un efecto significativo en las lecturas de resistencia de aislamiento. La resistencia cae marcadamente con un incremento en la temperatura para el mismo aparato. Cada tipo de material aislante tiene un grado diferente de cambio en la resistencia en función de la temperatura. Se han desarrollado tablas de factores de corrección por temperatura para distintos tipos de aparatos eléctricos y pueden solicitarse al fabricante. A falta de estas, se recomienda que uno desarrolle sus propias tablas de factores de corrección registrando dos valores de resistencia para el mismo equipo a dos temperaturas diferentes. Se puede trazar entonces una gráfica de resistencia (en una escala logarítmica) en función de la temperatura (en una escala lineal). La gráfica es una línea recta y se la puede extrapolar para cualquier temperatura de modo que los factores se pueden leer directamente.

En lugar de datos detallados, una regla empírica es que por cada 10°C de incremento en temperatura, la resistencia se reduce a la mitad; o por cada 10°C de disminución de la temperatura, la resistencia se duplica. Por ejemplo, una resistencia de $100\text{ G}\Omega$ a 20°C se hace de $25\text{ G}\Omega$ a 40°C .

¿Por qué es importante la corrección por temperatura? Considere el ejemplo de la siguiente tabla de un motor probado en momentos diferentes del año a temperaturas diferentes (todas dentro de una banda de 15°C). Los ajustes de temperatura se hicieron utilizando la corrección de la regla empírica.

| Fecha | Resistencia del aislamiento ($\text{M}\Omega$) | Temperatura $^{\circ}\text{F}$ | Resistencia d' aislamiento corregida por temperatura ($\text{M}\Omega$) |
|--------|--|--------------------------------|---|
| Ene-01 | 15.000 | 68 | 14.990 |
| Jun-01 | 9.000 | 80 | 14.276 |
| Ene-02 | 14.500 | 68 | 14.490 |
| Jun-02 | 8.500 | 82 | 14.562 |
| Ene-03 | 14.300 | 68 | 14.290 |
| Jun-03 | 8.700 | 81 | 14.341 |
| Ene-04 | 14.500 | 68 | 14.490 |
| Jun-04 | 8.900 | 81 | 14.671 |
| Ene-05 | 14.200 | 69 | 14.748 |
| Jun-05 | 8.900 | 80 | 14.117 |
| Ene-06 | 13.600 | 68 | 13.591 |
| Jun-06 | 8.900 | 78 | 13.071 |
| Ene-07 | 13.500 | 66 | 12.491 |
| Jun-07 | 7.500 | 80 | 11.896 |
| Ene-08 | 11.300 | 68 | 11.292 |
| Jun-08 | 6.500 | 80 | 10.310 |
| Ene-09 | 8.000 | 67 | 7.693 |

Las lecturas tomadas crean confusión si no se corrigen por temperatura. Cuando se trazan, producen una gráfica que es de uso limitado para determinar una tendencia. Si los mismos datos se corrigen por temperatura y se trazan, la gráfica comienza a proporcionar un cuadro valioso del deterioro del aislamiento.

La corrección por temperatura resulta particularmente importante cuando se prueba con mayores voltajes y altos niveles de sensibilidad.

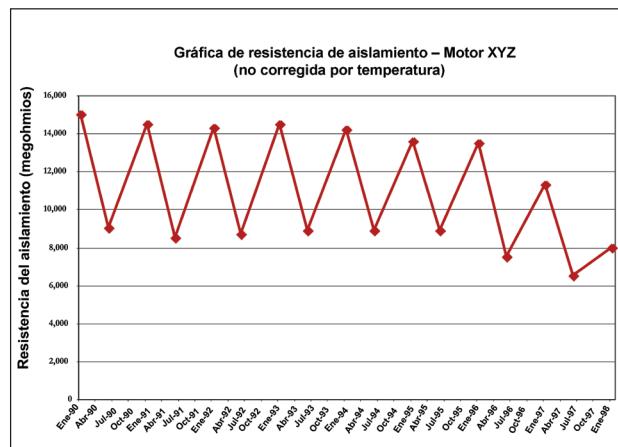


Figura 32: Gráfica de resistencia de aislamiento no corregida por temperatura



Figura 33: Gráfica de resistencia de aislamiento corregida por temperatura

Efectos de la humedad

La humedad tiene un efecto en la resistencia de aislamiento, pero no se lo puede cuantificar tan claramente como el de la temperatura debido a que los diferentes tipos de aislamiento absorberán humedad en distintos grados, como lo hacen las distintas edades y condiciones del mismo tipo. Lo mejor que se puede decir es que la humedad es un factor que no se debe pasar por alto cuando se evalúan los resultados. A diferencia de la temperatura, el efecto de la humedad no es un gradiente constante y en tanto la temperatura permanezca por encima del punto de rocío, la humedad no afectará en forma apreciable las lecturas de aislamiento.

El incremento de humedad en el aire del entorno (ambiente) puede afectar la resistencia de aislamiento en distintos grados. Si el equipo opera regularmente por encima de la temperatura del punto de rocío (la temperatura a la que el vapor de la humedad en el aire se condensa como un líquido), las lecturas de la prueba no serán muy afectadas por la humedad. Aun cuando el equipo que se va a probar se encuentra inactivo, lo anterior continua cumpliéndose —en tanto su temperatura se mantenga por encima del punto de rocío (y las superficies del aislamiento estén libres de contaminantes tales como ciertas pelusas y ácidos o sales, que tienen la propiedad de absorber humedad).

En equipos eléctricos, la preocupación principal es la condición de las superficies expuestas donde se condensa la humedad y afecta la resistencia total del aislamiento. Los estudios muestran, sin embargo, que el rocío se forma en las grietas y huecos del aislamiento antes de que sea evidente en la superficie. Las mediciones del punto de rocío proporcionarán una pista de si tales condiciones no detectables a simple vista pueden existir y alterar los resultados.

Los efectos de la humedad requieren mayor atención conforme crecen los voltajes de prueba, porque los voltajes altos pueden dar lugar a la ionización mucho más fácilmente que los bajos voltajes. Como resultado, la humedad que no produce un efecto notable a 1 kV puede producir lecturas sorprendentemente bajas a 5 kV. Esto no constituye necesariamente un problema. La diferencia en respuesta a dos voltajes diferentes se puede utilizar para detectar humedad y las pruebas realizadas con y sin terminal de protección se pueden usar para detectar humedad superficial o humedad interna.

Protección contra ingreso

En algún lugar de la letra pequeña de los boletines de productos de equipo de prueba existe una clasificación IP, un número que da al operador información vital. De hecho, la clasificación IP permite al operador saber si un equipo de prueba es adecuado para su aplicación y entorno de prueba.

IP representa "Protección contra ingreso" (IP, por sus siglas en inglés). Esto es el grado al que el instrumento puede resistir la invasión de materia extraña. El sistema de clasificación IP ha sido establecido por la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) en su Norma 529, y se utiliza como una guía para ayudar al operador a proteger la vida del instrumento. También puede ayudar al operador a tomar una decisión de compra más informada al asegurarse de que el equipo de prueba está diseñado para los entornos que enfrentará.

La clasificación IP está compuesta por dos dígitos, cada uno significa características diferentes. La designación indica que tan bien está sellado el elemento contra la invasión por materiales extraños, tanto polvo

como humedad (cuanto más altos sean los números, mejor será el grado de protección). ¿Qué le dice al comprador una clasificación típica IP54 sobre las capacidades de aplicación de un modelo? Si quiere expresarlo con corrección, se dice IP cinco-cuatro, no cincuenta y cuatro. Cada número se relaciona con una especificación separada, no entre sí.

El primer dígito se refiere a la penetración de partículas, refleja el grado al que los objetos sólidos pueden penetrar la cubierta. Un nivel de 5 indica "protegido contra el polvo" así como contra la introducción de un alambre de 1,0 mm. Solamente existe una categoría más alta: "hermético al polvo". El segundo dígito se refiere a la humedad. Una clasificación de "4" significa resistencia a "salpicaduras de agua en cualquier dirección". Las clasificaciones más altas de 5 a 8 indican "chorro de agua" e inmersión "temporal" o "continua".

¿Y entonces? Bien, suponga que el instrumento en consideración estaba clasificado solo como IP43. ¿Qué diría esto al operador sobre su utilidad? ¿Se podría utilizar en una cantera o en una planta de cemento? ¡A duras penas! La clasificación ante partículas 4 indica "objetos iguales o mayores de 1 mm". Esto es una roca grande en comparación con las partículas producidas en los procesos industriales. El polvo en suspensión podría poner la unidad fuera de servicio.

Suponga que la unidad está clasificada como IP42. Una clasificación de humedad de 2 indica goteo de agua. Por lo tanto, no sería resistente a rocío en suspensión. Adquirir un instrumento para un entorno que excede sus capacidades IP significa que probablemente el operador necesitará otro muy pronto. ¿Qué tal una clasificación IP40? Una clasificación de humedad de 0 significa que la unidad no está protegida contra la penetración de líquidos.

Las tablas a continuación proporcionan una guía para distintas clasificaciones IP y lo que significan para el operador:

| Protección contra el ingreso de partes peligrosas (primer dígito) | |
|--|--|
| Número | Descripción |
| 0 | No protegido |
| 1 | Protegido contra el acceso con el dorso de la mano (50 mm) |
| 2 | Protegido contra acceso con los dedos juntos (12 x 80 mm) |
| 3 | Protegido contra acceso con una herramienta (2.5 mm) |
| 4, 5, 6 | Protegido contra acceso con un alambre (1.0 mm) |

| Protección contra penetración de objetos extraños sólidos (primer dígito) | |
|---|--------------------------------------|
| Número | Descripción |
| 0 | No protegido |
| 1 | Objetos iguales o mayores de 50 mm |
| 2 | Objetos iguales o mayores de 12.5 mm |
| 3 | Objetos iguales o mayores de 2.5 mm |
| 4 | Objetos iguales o mayores de 1 mm |
| 5 | A prueba de polvo |
| 6 | Hermético al polvo |

| Protección contra el ingreso de líquidos (segundo dígito) | |
|---|--|
| Número | Descripción |
| 0 | No protegido |
| 1 | Goteo de agua vertical |
| 2 | Goteo de agua, inclinado hasta 15° |
| 3 | Roció de agua, hasta un ángulo de 60° contra la vertical |
| 4 | Salpicaduras de agua, en cualquier dirección |
| 5 | Chorro de agua, en cualquier dirección |
| 6 | Chorro de agua a presión, en cualquier dirección |
| 7 | Inmersión temporal en agua |
| 8 | Inmersión continua en agua |

Pruebas de alto potencial

No existe realmente una definición precisa de la prueba de "alto potencial". Se la utiliza a menudo, pero su definición es situacional, a gusto del que la realiza, se podría decir. Básicamente, una prueba de alto potencial es una prueba de solicitud eléctrica realizada a un voltaje dos o más veces el voltaje nominal y a veces es conocida como prueba de rigidez dieléctrica o prueba de comprobación.

Puesto que la prueba se realiza con un voltaje considerablemente superior al voltaje nominal del equipo bajo prueba, constituye una prueba de sobrevoltaje diferente de la prueba de aislamiento de alto voltaje, que se aplica generalmente a un voltaje inferior al voltaje nominal del equipo. Realizar una prueba de sobrevoltaje crea solicitudes anormales en la muestra bajo prueba y puede contribuir a la aceleración del envejecimiento del aislamiento. De hecho, algunas normas requieren que se incremente el voltaje hasta que ocurra una ruptura en la muestra bajo prueba.

Si se va a aplicar una prueba de sobrevoltaje, normalmente se realiza previamente una prueba de PI de voltaje menor que el nominal para precalificar el aislamiento.

Las pruebas de alto potencial se pueden realizar con voltajes de CA o CC, según sea necesario. Las muestras que posean una capacitancia considerable aparecerán como cortocircuito en una prueba de CA, lo que requiere un equipo de pruebas con una potencia muy grande para superar a las corrientes de carga capacitativa. En estos casos es bastante normal realizar una prueba de CC con un valor equivalente al pico.

Lecturas de corriente (nA) vs. Lecturas de resistencia ($M\Omega$)

Los equipos de pruebas de aislamiento miden la corriente y luego la convierten en una lectura de resistencia. ¿Por qué se hace esto? Bien, más que nada, es una tradición. Los aislamientos buenos producen una lectura alta mientras que los aislamientos pobres producen una lectura baja. Además, los aislamientos buenos son predominantemente resistivos. Si se duplica el voltaje de prueba, se duplica la corriente que fluye pero la resistencia permanece constante. Sin embargo, a veces resulta más fácil diagnosticar problemas al considerar las corrientes reales que fluyen.

La selección es indistinta debido a que muchos equipos de pruebas de aislamiento modernos son capaces de presentar las mediciones en cualquiera de estas unidades.

Capacidad de quemado

Los equipos de pruebas de aislamiento de alta gama superiores a 1 kV a menudo incluyen un modo de "quemado". Es una función que puede no usarse nunca; sin embargo tiene una función útil dentro de un rango estrecho de aplicaciones.

Los equipos de pruebas de aislamiento generan voltajes altos sobre resistencias significativas. Sin embargo, si ocurre una ruptura dentro del aislamiento, la resistencia disminuye, la corriente se incrementa y el voltaje cae. Si se sigue midiendo de esta manera, esto haría que el arco de la ruptura se extinga, la resistencia aumente y el voltaje se incremente lo que a su vez ocasionalaría la ruptura, y así sucesivamente. Este ciclo continuo no permite la medición de la resistencia y de hecho podría abrir agujeros o agrandar las trayectorias de quemado. Antes de causar mayor daño, la mayoría de los equipos de pruebas de aislamiento se apagarán.

Sin embargo, si uno desea encontrar la localización de la ruptura, la parada de seguridad del equipo puede resultar inconveniente en extremo. Por esta razón algunos instrumentos ofrecen un modo opcional de quemado; se ignora la parada automática y se mantiene un arco de baja corriente. Se debe entender, sin embargo, que la limitación de cortocircuito del

instrumento todavía tiene efecto. El equipo de pruebas no proporcionará un corto "muerto". La función le permite al operador localizar o identificar la falla buscando una chispa o vestigios de humo, o tal vez mediante un detector de ionización. Las perforaciones en los devanados se pueden identificar, cubrirse con barniz aislante, y volver a poner el equipo en servicio. En el mantenimiento de cables, se utilizan equipos de pruebas de alto potencial con corrientes mucho más altas que las de los equipos de pruebas de aislamiento para "romper" una falla de alta resistencia, convirtiéndola en un "cicuito abierto" que resulta mucho más fácil de reconocer por medio de técnicas de reflexión de arco.

Secado de equipo eléctrico

La electricidad y el agua no forman un buen equipo y con frecuencia resulta necesario "secar" el aislamiento. Esto se puede hacer para eliminar la humedad superficial o tal vez expulsar a la humedad del interior del aislamiento. Incluso algunos equipos tienen bobinas de calentamiento internas que se pueden utilizar para este propósito. Sin embargo, se dispone también de otros métodos para el secado de equipos eléctricos.

La solución más satisfactoria para el problema implica colocar los devanados en un horno con control de temperatura y circulación de aire adecuados. Se pueden utilizar bancos de lámparas infrarrojas cuando esto no sea posible, o se puede construir una caseta conveniente alrededor de la máquina, usando serpentines de vapor o resistencias eléctricas como fuente de calor. Se deben proveer aberturas para la circulación libre del aire puesto que de otra manera la expulsión de la humedad simplemente daría lugar a un incremento de la humedad dentro de la cámara de secado. Se pueden utilizar ventiladores para aumentar el caudal del aire.

El secado en vacío también se ha utilizado de manera efectiva para acelerar la vuelta del equipo a servicio, pero este método requiere precauciones adicionales y solo debe ser realizado por personal experimentado.

Otro método utilizado con frecuencia es circular una corriente de bajo voltaje por los devanados. Sin embargo, este método no debe usarse hasta que la resistencia de aislamiento haya alcanzado un valor no menor que 100 MΩ. Se debe limitar la corriente a solo una fracción de los amperios nominales, y se debe mantener un cuidado control de las temperaturas máximas alcanzadas en las partes aisladas. Las temperaturas máximas de secado en los devanados no deben exceder los 194 °F (90 °C) medidas por medio de un termómetro. Esto evitará no solo un rápido deterioro térmico del aislamiento sino también daños por las altas presiones que resultarían si se produjera vapor.

Si se requiere el secado, los registros ayudan a determinar cuando el aislamiento está libre de humedad. Como un ejemplo de la importancia de las lecturas anteriores, considere un motor que se ha inundado. Después de la limpieza, una lectura puntual con el equipo de prueba de Megger indica 15 MΩ. Si los registros pasados indican que la resistencia de aislamiento estaba entre 10 y 20 MΩ, el motor estaría en buena forma. Si, por el contrario, los registros muestran que los valores normales iban de 100 a 150 MΩ, el operador debe saber que aún existe humedad en los devanados del motor.

Durante las operaciones de secado, cuando se usan los valores de resistencia de aislamiento como un indicador de la aptitud de los devanados para servicio o para aplicación de potencial de prueba, debe continuarse el secado por un tiempo suficiente para asegurarse de que los valores son confiables. Con frecuencia la curva de resistencia tomará una o más depresiones agudas antes de nivelarse o continuar incrementándose en una dirección positiva. Esto se debe a la acción de la humedad que está saliendo de los devanados. Cuando la máquina está completamente seca, se requiere una limpieza adicional para eliminar el polvo remanente. Esto se puede hacer por medio de aire comprimido a una presión no superior a 40 psi.

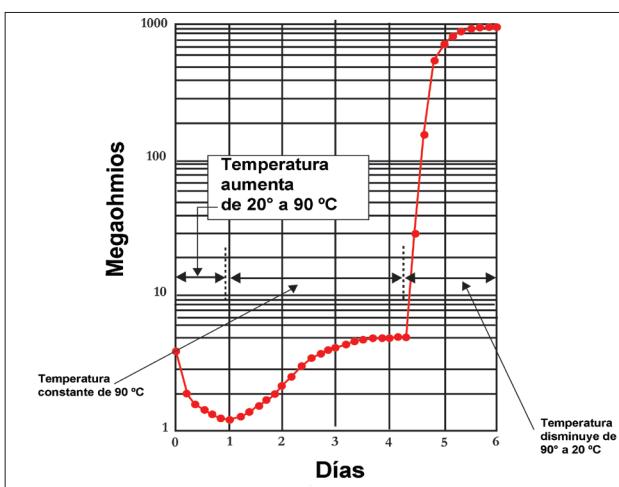


Figura 34: Curva típica de secado de resistencia

La figura 34 muestra una curva típica de secado para la armadura de un motor de CC y muestra cómo cambia la resistencia de aislamiento. Durante la primera parte de la corrida, la resistencia disminuye debido a la temperatura más alta. Luego se eleva a una temperatura constante conforme avanza el secado. Finalmente, alcanza un valor alto, conforme se alcanza la temperatura ambiente (20 °C).

Se debe realizar una advertencia importante sobre la prueba de un aislamiento húmedo con un equipo de pruebas de aislamiento: el equipo húmedo es susceptible a la ruptura por voltaje. Si los devanados

han absorbido mucha humedad aún los voltajes bajos pueden perforar el aislamiento. Por tanto, el operador debe tener mucho cuidado antes de aplicar voltajes altos. Los equipos de pruebas de aislamiento de Megger más avanzados permiten que se ajuste el voltaje de prueba desde 25 hasta 5000 voltios en incrementos de a 25 voltios.

Descarga del elemento bajo prueba

Quizás le hayan enseñado a descargar un capacitor y luego almacenarlo con los terminales en corto. Se preguntará por qué, si se ha descargado el capacitor y tal vez se verificó que no había voltaje en las terminales, ¿se requiere poner en corto los terminales?

La razón es la corriente de absorción dieléctrica. Si los terminales se dejan abiertos, la energía almacenada por absorción dieléctrica se liberará lentamente con la carga negativa migrando a un terminal y la carga positiva al terminal positivo. A lo largo del tiempo, esta carga se puede acumular hasta un nivel peligroso, tan alto como el voltaje de prueba original y con una cantidad considerable de energía que lo respalda. Esta energía puede matar.

Al final de la prueba de aislamiento la muestra bajo prueba se parece mucho a un capacitor cargado, allí queda una cantidad considerable de energía almacenada dentro del dieléctrico del aislamiento.

Existe una "regla empírica" importante sobre la carga y descarga de elementos bajo prueba. Esta regla sugiere que el operador descargue el objeto bajo prueba durante cinco veces el tiempo de duración de la prueba. Si el operador realiza una prueba de PI de 10 minutos, debe permitir la descarga de la unidad durante 50 minutos.

Un instrumento de buena calidad descargará de manera automática la muestra bajo prueba, tan pronto como se complete o se interrumpa la prueba. Algunos instrumentos de menor calidad poseen una perilla de selección o interruptor separados para descarga, que agrega un paso a una prueba. Si se olvida este paso, el objeto bajo prueba puede ser mortal para la siguiente persona que lo maneje.

Los equipos de pruebas de aislamiento de Megger también detectan el voltaje a través de la muestra bajo prueba durante la fase de descarga y muestran este voltaje hasta que ha caído a un nivel seguro. En este punto, resulta seguro operar la muestra.

Sin embargo, todo lo que se ha descargado hasta este punto es la carga capacitiva almacenada. Como se explicó al principio de este folleto, al principio de la prueba toda la capacitancia se carga relativamente rápido. En forma similar, al final de la prueba la carga capacitiva se descarga relativamente rápido. Pero la corriente de absorción dieléctrica tarda mucho más entrar y también en liberarse.

Por esto, aunque la muestra es segura de operar inmediatamente, si los terminales no están en corto gradualmente adquirirán carga y se volverán peligrosos una vez más. Entonces, a menos que el equipo se regrese a servicio, se debe asegurar que los terminales se pongan en corto y conectados a tierra.

Tiempo de carga para equipos grandes

Una pregunta que se hace con frecuencia es: "¿cuánto tiempo se tarda en cargar un equipo determinado?" La respuesta es: "¡No sabemos!"

¿Por qué no? Bien, la respuesta depende de la configuración real de cada equipo particular. Por ejemplo, el S1-5010 de Megger especifica una velocidad de carga de "menos de 5 segundos por microfaradio con una corriente de cortocircuito de 2 mA" y "2,5 segundos por microfaradio con una corriente de cortocircuito de 5 mA". Entonces, si se conoce la capacitancia de la muestra bajo prueba se puede calcular el tiempo de carga; sin importar si se trata de un motor, un cable o una capa de material aislante.

Equipos de pruebas de aislamiento accionados por motor

Otra pregunta que se hace frecuentemente es: "¿Qué les pasó a los viejos equipos de pruebas de aislamiento en caja de madera accionados por motor?" Algunos piensan que estos sentaron las bases para las pruebas de aislamiento y todavía las cumplen.

Estos equipos de pruebas en caja de madera accionados por motor externo, se produjeron entre 1910 y 1972 y usaban el "ohmímetro de bobinas cruzadas" original patentado por Evershed. Era un mecanismo pesado y grande, y como su nombre sugiere, tenía dos bobinas en ángulo una con otra. Fue el primer "ohmímetro verdadero". La construcción del mecanismo tenía sus ventajas y desventajas.

La ventaja principal era que debido al peso del mecanismo, poseían una inercia considerable y eran, por tanto, bastante insensibles a eventos de interferencia y transitorios. Esto redundaba en un movimiento muy suave. Por desgracia, el peso mismo del mecanismo lo hacía bastante delicado y los instrumentos debían manejarse con cuidado. Además, los instrumentos tenían que nivelarse antes de usarse y por ello, llevaban un nivel en la escala y patas ajustables. Los mecanismos eran también bastante insensibles con capacidades de resistencia máxima, que podían estar en el orden de muchos megaohmios o pocos gigaohmios.

Se desarrollaron fuentes alternativas de potencia. El viejo generador era grande y pesado, como puede atestiguar alguien que haya operado con manivela uno de esos viejos instrumentos; es cierto que nadie deseaba realizar una prueba PI dando vueltas a la manivela, pero a falta de fuentes de potencia no quedaba alternativa.

Los avances tecnológicos permitieron que se pudieran usar "mecanismos electrónicos" más robustos y exactos. Se desarrollaron nuevos generadores de bajo voltaje mucho más fáciles de accionar a mano, y finalmente la tecnología de baterías permitió que se emplearan solo baterías. Esto dio lugar a las fuentes de potencia muy estables con las que se cuenta hoy en día.

El uso de la electrónica ha redundado en instrumentos más livianos, más robustos, más exactos y que responden más rápidamente. Pueden proporcionar más información que permite ver eventos transitorios que anteriormente estaban ocultos por la inestabilidad relativa de las fuentes de potencia y la inercia del movimiento.

¿Cuál es mejor? Decida usted.

DISEÑO DE LOS CABLES DE PRUEBA

El objetivo de diseño de los conjuntos de cables de prueba es el de facilitar la conexión con diferentes sistemas desenergizados, para realizar mediciones de resistencia de aislamiento. En todos los casos, es responsabilidad del usuario emplear prácticas de trabajo seguras y verificar que el sistema se encuentra en una condición segura antes de realizar una conexión. Incluso los sistemas aislados eléctricamente pueden presentar una capacitancia significativa, que adquirirá una carga elevada durante la realización de la prueba del aislamiento. Esta carga puede resultar mortal y nunca se deben tocar las conexiones durante las pruebas, incluyendo a los cables y las pinzas. Se debe descargar el sistema de manera segura antes de tocar las conexiones.

Los cables de prueba son un componente clave de cualquier instrumento de precisión; y la seguridad, larga vida útil y la capacidad de permitir conexiones confiables con la gran variedad de piezas de prueba que se encuentran en la vida real, son de máxima importancia.

Un diseño cuidadoso asegura la repetibilidad de las conexiones, que hace práctico y seguro su uso. Se deben utilizar solamente los mejores y más adecuados materiales, para lograr la mezcla ideal entre desempeño y seguridad. Como ejemplo, el cuidadoso diseño de un cable asegura que este permanezca flexible en todo tipo de condiciones y que posea propiedades de aislamiento extremadamente buenas, que no afectan las mediciones.

El uso de un cable con doble aislamiento de silicona asegura mediciones seguras y confiables. Realizar pruebas con cables de mala calidad o con fugas eléctricas puede entregar mediciones engañosas, y puede ocasionar que un aislamiento en buen estado sea diagnosticado como si tuviera fallas, ocasionando una pérdida tanto de tiempo como de dinero en reparaciones innecesarias. Esto es particularmente importante cuando se utilizan cables de prueba largos.

Mejoras significativas en seguridad

La norma internacional IEC 61010-031 detalla los requerimientos de seguridad para conjuntos de sensores portátiles a mano para mediciones y pruebas eléctricas. Se compusieron algunas enmiendas para esta norma, en particular: prevención de riesgos de arcos eléctricos y cortocircuitos.

Se consideran dos riesgos: (1) el peligro de que la punta de una sonda o una pinza cocodrilo ponga en contacto temporal a dos conductores de alta energía, y (2) el peligro de ruptura de un contacto mientras hay flujo de corriente.

Estos riesgos son particularmente aplicables a muchos de los entornos en los cuales se utilizan equipos de prueba de 5 kV y 10 kV. Si una sonda o pinza realiza un corto entre los dos conductores de alta energía durante la conexión, se ocasionará una corriente extremadamente alta que calentará el metal y derretirá el aislamiento. Esto en sí mismo puede ocasionar quemaduras severas al operador u observador que se encuentre cerca de la pinza o sonda. Además, si se rompiera el contacto cuando fluye esta corriente, podría ocurrir una situación extremadamente peligrosa conocida como arco eléctrico.

La norma describe el peligro del arco eléctrico de la siguiente manera: "El arco eléctrico ionizará el aire en la cercanía del arco, lo que permite el flujo de corriente en la cercanía de la punta de sonda o pinza cocodrilo. Si hay suficiente energía disponible, la ionización del aire continuará creciendo y el flujo de corriente a través del aire también. El resultado es un arco eléctrico, muy similar a una explosión, y puede causar heridas o la muerte a un operador o un observador."

IEC 61010-031:2008 requiere la utilización de puntas de sonda y pinzas cocodrilo especialmente construidas para mitigar el riesgo de arcos eléctricos y cortocircuitos, y este requerimiento se aplica a todas las pinzas cocodrilo especificadas para las Categorías de instalación III o IV (CATIII o CATIV). Por ello, las superficies exteriores de las pinzas cocodrilo no deben ser conductoras y no debe ser posible acceder a partes metálicas (como se define en la norma) con la pinza cerrada.

Durante la fase de diseño se utilizan procedimientos detallados de medición y prueba para evaluar las distancias de fuga y de despeje, para asegurar el cumplimiento de la norma. La accesibilidad a las superficies metálicas conductoras se determina utilizando un dedo de prueba estándar de la IEC.

Cosas a tener en cuenta para una operación segura

En entornos de pruebas eléctricas, las prácticas de trabajo seguras resultan esenciales para garantizar la seguridad de los operadores. Las pruebas de aislamiento en entornos de alto voltaje y alta energía poseen riesgos particulares, que se detallan a continuación:

1. Mantener la practicidad de uso en una pinza completamente aislada

Si el aislamiento adicional de una pinza impide su operación y su capacidad para lograr conexiones confiables con la amplia variedad de barras, conductores y terminales necesarios, este diseño resulta inútil y el operador puede verse tentado a retirar este aislamiento adicional para poder realizar la conexión.

2. Protección contra capacitancias cargadas en cables largos

Asegurar los enchufes de alto voltaje a la salida del instrumento reduce la probabilidad de una desconexión accidental del enchufe, lo que podría hacer que una carga letal siga almacenada al finalizar la prueba, y en que el instrumento informe erróneamente la ausencia de voltaje. La función para asegurar los enchufes es fácil de utilizar y evita una desconexión del "extremo del enchufe", y ayuda a mantener el circuito cerrado para la descarga al final de la prueba.

3. Protección contra altos voltajes en un entorno CAT IV 600 V o CATIV 1000 V

Cuanto más aguas arriba sean los sistemas de alimentación con los cuales se realizan las conexiones (la categoría de sobrevoltaje CAT IV se relaciona con la alimentación provenientes de fuentes industriales), se requiere mayor protección contra sobrevoltajes. De manera natural se producen transitorios en la alimentación, normalmente originados por acciones de commutación o rayos ocurridos a distancia que aplican sobrevoltajes de varios miles de voltios sobre los equipos conectados, cables de prueba, pinzas, etc. Estos equipos deben contar con mecanismos para proteger al operador durante el proceso de conexión. Una pinza especificada para utilizar con una alimentación de 600 V y una categoría de sobrevoltaje CAT IV debe ser capaz de tolerar sobrevoltajes de este tipo, de hasta 8 kV.

Una pinza especificada para utilizar una alimentación de 1000 V y una categoría de sobrevoltaje CAT IV debe ser capaz de tolerar sobrevoltajes de este tipo, de hasta 12 kV.

Las pinzas que son moldeadas a partir de polímero aislante de alta resistencia dieléctrica, con dimensiones definidas con cuidado, permiten asegurar que las distancias de fuga y despeje eléctricas se conserven incluso en condiciones adversas.

4. Protección de la salida del instrumento (5 kV, 10 kV or 15 kV)

Muchos operadores temen que la salida de sus equipos de prueba de aislamiento puede ser de 5, 10 o de 15 kV. En realidad, la corriente disponible en el instrumento se limita a unos pocos miliamperios y presenta en sí misma un riesgo relativamente bajo.

El riesgo aquí no es tanto la salida del instrumento, sino el entorno de trabajo. Si la carga conectada es capacitiva, esto puede entregar una energía muy significativa cuando se la carga a un alto voltaje por el instrumento, y puede ser mortal si se la toca. Además, cuando se realizan pruebas de aislamiento en muchos entornos de alto voltaje, es común tener que subir escaleras para alcanzar conexiones con equipos tales como transformadores, con los riesgos asociados del trabajo en alturas. En una situación así, un impulso de corriente que en otras circunstancias sería inofensivo puede hacer que el operador reacciones de una manera involuntaria, ocasionando heridas severas por una caída. Para ayudar a minimizar el riesgo las pinzas deben estar completamente aisladas.

Advertencias de seguridad

Se debe apagar, desenergizar, aislar y verificar la seguridad del circuito bajo prueba antes de realizar las conexiones para la prueba de aislamiento. Asegúrese de que el circuito no se vuelva a energizar mientras el instrumento está conectado. No se deben tocar las conexiones con el circuito durante una prueba de aislamiento.

Luego de finalizar la prueba, los circuitos capacitivos se deben descargar completamente antes de desconectar los cables de prueba. Las cargas capacitivas pueden ser letales.

Los elementos probados deben ser puestos en cortocircuito con un conductor adecuado, luego de la descarga, hasta que sea necesario ponerlos en servicio. Esto se debe realizar para evitar que la carga de absorción dieléctrica almacenada sea liberada posteriormente, elevando el voltaje hasta niveles potencialmente peligrosos.

Los cables de prueba, incluidas las pinzas cocodrilo, deben estar en buen estado, limpios, secos y libres de aislamiento roto o quebrado. No se debe utilizar un cable de prueba si alguna de sus partes se encuentra dañada.

DISEÑO DEL ESTUCHE DEL INSTRUMENTO

Los equipos de prueba de aislamiento de 5 kV a 15 kV se utilizan en muchos entornos, desde la prueba de motores en un taller, hasta la prueba de cables de potencia y equipos de conmutación en playas de distribución de alto voltaje. La naturaleza del trabajo a realizar hace necesarias una portabilidad y robustez máximas. A diferencia de la mayoría de los equipos que se encuentran en playas de distribución, donde la durabilidad y la seguridad se logran con sólidos estuches de metal conectados a tierra, los equipos de prueba de aislamiento deben ser pequeños y livianos, para permitir realizar los trabajos en distintos tipos de lugares y alturas. Para lograr esto, los fabricantes de instrumentos generalmente utilizan plástico moldeado por inyección, normalmente ABS o un material similar, para lograr un estuche liviano y duradero.

Para lograr la máxima seguridad para los usuarios, los productos deben cumplir los exigentes requerimientos de la norma internacional IEC61010 (seguridad de equipos eléctricos de medición, control y uso en laboratorio).

Los equipos de prueba de aislamiento no se diseñan solo para medir la resistencia de aislamiento en sistemas desenergizados, sino también para realizar la medición de voltaje en sistemas energizados de hasta 600 V CA (fase a tierra). En ambos casos, resulta necesario asegurarse de que el instrumento puede manejar no solo el voltaje aplicado, sino también los transitorios que puedan ocurrir en otro punto del sistema y propagarse hasta el instrumento conectado. Estos transitorios pueden ser significativos en trabajos exteriores que involucran sistemas de distribución de potencia, con una gran cantidad de energía que puede constituir un riesgo importante para el usuario. Incluso durante una prueba de aislamiento sobre un circuito desenergizado, una operación de conmutación en algún punto de la red o un rayo distante pueden inducir un gran transitorio de voltaje en el sistema desenergizado que debe ser soportado por el instrumento para proteger al usuario.

Protección de retardo de fuego

IEC61010 establece categorías de diferente severidad para estos transitorios según la localización y el voltaje de alimentación en el sistema de distribución. A medida que nos movemos aguas arriba en el sistema de distribución, nos encontramos con transitorios de creciente severidad. Los instrumentos para la conexión

con sistemas externos se deben especificar como de categoría IV (CAT IV). Por ejemplo, los instrumentos especificados como CAT IV 600 V deben ser capaces de tolerar de manera segura transitorios de 8.000 voltios.

Si se desarrolla una falla cuando se encuentra conectado a un sistema de este tipo, y el transitorio origina una descarga disruptiva dentro del instrumento, la ionización local del aire puede crear un cortocircuito efectivo en lo que puede ser una alimentación de muy alta energía, generando un peligro significativo para el usuario. Por esto, IEC61010-2-030 especifica instrumentos que permanezcan en una condición segura cuando ocurren estos transitorios.

Adicionalmente, la parte 1 de IEC61010 determina que no se propague fuego afuera del equipo en caso que ocurra una falla única en el instrumento, por ejemplo, una batería con fallas. Existen dos rutas para verificar el cumplimiento de esto: primero, realizar pruebas de "falla única" en el instrumento, y segundo, simplemente utilizar un estuche retardante del fuego. Los instrumentos más seguros cumplen la normativa de ambas maneras.

Por desgracia, si bien los materiales de plástico de inyección adecuados para la fabricación de estuches son ideales por su bajo peso y durabilidad, en general no son retardantes del fuego y no proporcionan una protección adecuada ante un evento de falla. Existen materiales con aditivos que retardan el fuego, pero tienen una durabilidad inferior, de manera que no resistirán tan bien los rigores del uso diario. Esto representa un reto para los fabricantes de instrumentos.

Megger ha adoptado un enfoque exclusivo de diseño al crear un estuche dual, donde la capa interior proporciona protección esencial contra fuego, sin comprometer la robustez y durabilidad de la carcasa exterior.

EQUIPOS DE PRUEBAS DE AISLAMIENTO DE MEGGER

Los equipos de pruebas de aislamiento de Megger de 5 kV, 10 kV y 15 kV son diseñados para uso industrial y de empresas de servicios eléctricos. Todos los equipos de prueba de aislamiento de Megger son robustos y confiables para uso de alto desempeño. Poseen una especificación de seguridad de CAT IV 1000 V en todos los terminales y se alojan en un estuche robusto de polipropileno, con protección completa de IP65 cuando se transporta. El exclusivo diseño de estuche doble de todas las unidades proporciona protección de retardo de fuego a la vez que conserva la robustez.

Los instrumentos de 10 kV cumplen totalmente con la norma IEEE 43-2000, la "Práctica recomendada de IEEE para pruebas de resistencia de aislamiento en maquinaria rotativa". Esto permite al usuario la realización de pruebas sobre cualquier tipo de motor existente. El instrumento de 15 kV cumple totalmente con la norma NETA para equipos de pruebas especificados para más de 35 kV.

MIT515, MIT525, MIT1025, MIT1525

La nueva serie MIT consta de cuatro instrumentos: dos modelos de 5-kV, una unidad de 10-kV y otro de 15-kV. La serie ha sido diseñada para uso industrial y de distribución de potencia. El MIT515 (modelo de 5-kV) se puede utilizar para realizar tanto pruebas simples de aislamiento del tipo pasa/no pasa, como también para pruebas de diagnóstico de aislamiento básicas, como la de índice de polarización (PI). Dos modelos nuevos avanzados, el MIT1025 (modelo de 10-kV) y el MIT1525 (modelo de 15-kV), poseen memoria y permiten realizar pruebas de diagnóstico de aislamiento. El MIT1025 y el MIT1525 permite realizar pruebas más rigurosas sobre equipos de voltaje más alto.

Las unidades MIT poseen un terminal/circuito de protección totalmente especificados para la obtención de resultados exactos en una amplia gama de situaciones de prueba. Las pruebas se pueden realizar con una alimentación por batería o por CA, para obtener una larga vida de baterías y un rápido tiempo de recarga. Para el almacenamiento y las tendencias de resultados, tanto el MIT525, MIT1025 y MIT1525 poseen memoria y posibilidad de descarga de datos a una PC por USB, así como pruebas de diagnóstico adicionales como el escalón de voltaje (SV) y rampa de voltaje.

Algunas de las características de la serie MIT son:

- Operación intuitiva con interruptor rotatorio
- Alimentación de línea o por batería
- Fácil reemplazo de baterías
- Prueba de rampa

S1-568, S1-1068 y S1-1568

La serie S1 se compone de tres modelos de 5-kV, 10 kV y modelos de 15 kV (S1-568, S1-1068 y S1-1568 respectivamente)

Las unidades S1 son diseñadas especialmente para empresas de servicio eléctrico, en particular para aplicación de transmisión y generación donde se encuentran los mayores ruidos eléctricos y tramos de cables largos.

Todos los modelos S1 poseen una alta potencia de salida especificada a 6 mA para atender cargas capacitivas. Adicionalmente, las unidades S1-554/2 y S1-1054/2 poseen una inmunidad incrementada al ruido eléctrico, para operar en los entornos más extremos de subestación.

Las unidades S1 poseen cinco pruebas de diagnóstico, incluidas las de PI, SV y pruebas de rampa. Los instrumentos pueden almacenar y descargar los resultados a través de los puertos USB. Además, la especificación del S1 puede ser controlada remotamente a través de los puertos USB y del software Power DB Lite para más confianza y conveniencia.

Algunas de las características de la serie S1 son:

- Salida de corriente de 6 mA que permite cargar y probar rápidamente a cargas capacitivas
- Inmunidad al ruido de 8 mA para mediciones estables en ambientes EHV
- Rango de medición de hasta 15 TΩ (modelos de 5-kV) y 35 TΩ (modelos de 10-kV)
- Transmisión de datos de prueba y descarga de resultados almacenados a través del puerto USB y Bluetooth
- Memoria incorporada para el almacenamiento de resultados
- Operación remota a través de un puerto USB



Modelos MJ15 y BM15

Equipos de prueba de aislamiento de 5-kV

- Superposición de resultados pasa/falla para realización rápida de pruebas de pasa/no pasa
- Resistencia de aislamiento de hasta 20 GΩ
- Rango de voltaje hasta 600 V que indica descarga automática

Los BM15 y MJ15 son equipos de prueba de aislamiento compactos de 5-kV, fáciles de utilizar y que proporcionan una lectura rápida y exacta de la resistencia del aislamiento. Ambos instrumentos poseen cuatro voltajes de prueba (500 V, 1 kV, 2,5 kV, 5 kV), escalas analógicas y una sensibilidad de medición de hasta 20 GΩ.

El BM15 es alimentado por 8 baterías "AA" o alcalinas recargables, mientras que el MJ15 incluye un generador para accionamiento manual por manivela, además de la alimentación por baterías.

Cables de pruebas

Megger posee una línea completa de conjuntos de cables de prueba, diseñados para un aislamiento de seguridad en cumplimiento con IEC 16010-031:2008. Estos poseen doble aislamiento siempre que sea práctico. Sin embargo, a voltajes más elevados donde las grandes dimensiones físicas harían que el doble aislamiento resulte impráctico para las pinzas, se usa el aislamiento simple. Se deben utilizar prácticas de trabajo seguras, y no se deben tocar las pinzas y conexiones mientras estén energizadas.

Se puede encontrar más información sobre cables de prueba de Megger en nuestro sitio web www.megger.com dentro de la información del grupo de productos: *Equipos de prueba de aislamiento de 5 kV y 10 kV de Megger*.



Su fuente completa de suministros para todas sus necesidades de equipos eléctricos

- Equipos de prueba de baterías
- Equipos de localización de falla en cables
- Equipos de prueba de interruptores de circuitos
- Equipos de prueba de comunicaciones de datos
- Equipos de prueba de fibras ópticas
- Equipos de prueba de resistencia de tierra
- Equipos de prueba de factor de disipación de aislamiento (C&DF)
- Equipos de prueba de resistencia de aislamiento
- Equipos de prueba de línea
- Óhmetros de baja resistencia
- Equipo de prueba de rotación de fase y motor
- Multímetros
- Equipos de prueba de aceite
- Equipos portátiles de prueba de aparatos y herramientas
- Instrumentos de calidad de suministro eléctrico
- Equipos de prueba de equipos de reconexión
- Equipos de prueba de relés
- Equipos de prueba TDR
- Equipos de prueba de transformadores
- Equipos de prueba de medidores de vatios-hora
- Bloques terminales/interruptores de prueba STATES®
- Programas de entrenamiento prácticos técnicos y de seguridad

Megger es un líder mundial en la fabricación y el suministro de instrumentos de prueba y medición usados en las industrias de energía eléctrica, cableado de edificios y telecomunicaciones.

Con instalaciones de investigación, ingeniería y fabricación en los Estados Unidos, Inglaterra y Suecia, combinadas con apoyo de ventas y técnico en la mayoría de los países, Megger está muy bien posicionado para satisfacer las demandas de sus clientes en todo el mundo.

Para más información acerca de Megger y su diversificada línea de instrumentos y prueba:

Llame al: 1-214-330-3293

Correo electrónico: csasales@megger.com

Visite nuestro sitio web: csa.megger.com



www.megger.com

USA

Megger · 4271 · Dallas, TX · 75237, EE.UU.

Tel. +1 (214) 330 3293

csasales@megger.com · www.megger.com