

motor tico

BOLETÍN MENSUAL PREPARADO POR WWW.MOTORTICO.COM, COSTA RICA

SETIEMBRE 2014

Estrés de Voltaje en bobinados de máquinas

En el motor y el generador eléctrico siempre están presentes los materiales aislantes (Aislación), para hacer circular la corriente por el camino esperado y se produzca el efecto deseado. Este es un hecho a tomar en cuenta en el dimensionamiento magnético y eléctrico del bobinado. Pero los materiales aislantes reales son siempre ligeramente conductores de electricidad, y esto puede ser aumentado por estrés eléctrico, térmico, mecánico, ambiental, o por ataque químico. El estrés ambiental incluye, por ejemplo, la presencia de humedad, las partículas abrasivas en el enfriamiento del aire, la suciedad y la radiación. A nivel de estrés eléctrico, un material aislante tiene que tener una resistencia al voltaje suficiente para evitar descargas disruptivas tanto en las pruebas de tensión, o cuando se exponen a los sobrevoltajes (pulsos de voltaje) en el trabajo normal. La estimación de esfuerzos a los que el aislamiento puede estar expuesto durante su vida útil, y el dimensionamiento del aislamiento basado en este análisis, juntos se llaman **Coordinación de Aislamiento**, y el objetivo de esto será mantener bajas y controladas la conductividad del aislamiento, y las pérdidas dieléctricas. Se analiza a continuación algunos temas al respecto.

Definición de rigidez dieléctrica

Se define **Rigidez Dieléctrica** como la valor límite de la intensidad de voltaje que puede soportar el material aislante, en el cual pierde su propiedad de aislar y pasa a ser un conductor. Se mide en voltios por metro (V/m). También se puede definir como el máximo voltaje que puede soportar un aislante sin perforarse. Se le denomina voltaje de rotura de un dieléctrico. Por ejemplo, la rigidez dieléctrica de la mica es alto, con pérdidas dieléctricas bajas y su resistencia superficial es alta. Por lo tanto, la mica es casi indispensable en las máquinas eléctricas de media tensión, en el que siempre hay algunas descargas parciales.

Dimensionamiento del aislamiento

El estrés producido por fuentes mecánicas, eléctricas y térmicas a que el aislamiento está expuesto definen el dimensionamiento de una máquina eléctrica en términos de estos materiales. Este estrés degrada las propiedades del aislamiento a lo largo del tiempo, y son condiciones irreversibles, aunque sí controlables. Además, en la selección del material aislante, el estrés causado por las condiciones de funcionamiento, tales como acumulación de suciedad, productos químicos, aceites, humedad y radiación deben tenerse en cuenta.

Por ejemplo, la resistencia a la compresión del aislamiento es generalmente más alta que la resistencia a la tracción, por lo tanto, en el diseño, se debe apuntar a los aislamientos que están expuestas a la compresión en lugar de fuerzas de tensión. Veamos un caso concreto: los enlaces de fibra de vidrio pueden ser empleadas para recibir las tensiones de tracción ejercida sobre el aislamiento (ejemplo: rotor de una máquina de CC). Los arrollamientos son también expuesto a esfuerzos de cizallamiento en sus extremos (fuerzas cortantes). Aunque también se requieren que bajo ciertas circunstancias sean flexibles, como durante el arranque de los motores. Por lo general, en máquinas de baja tensión, es suficiente que el aislamiento se adapta a la deformación causada por la expansión térmica del alambre de cobre. Además, la estructura de la máquina tiene que soportar las vibraciones y fuerzas electrodinámicas, tales como el arranque y una falla de cortocircuito. Incluso, en la operación normal se produce una frecuencia natural de vibración, que debe ser considerada, y que es del doble de la frecuencia de alimentación. Esta fuerza se crea como resultado del flujo magnético y la corriente del bobinado del funcionamiento normal.

Estrés de voltaje en el aislamiento

Además del voltaje de funcionamiento normal, la construcción del aislamiento de una máquina eléctrica también tiene que soportar sobrvoltajes temporales a la frecuencia de operación, así como sobrvoltajes de maniobra y transitorias (pulsos). Se debe considerar el espesor de las capas aislantes, y para esto se obtiene un valor aproximado del espesor mínimo de la capa de aislamiento d , mediante la aplicación de la ecuación siguiente:

$$d = \frac{U}{E_{max}}$$

Donde:

d es el espesor del material aislante.

U es el voltaje sobre el aislamiento.

E_{max} es la rigidez dieléctrica del material.

Si el sistema de aislamiento se compone de varias capas en serie, los espesores de estas capas pueden ser estimados según lo siguiente:

$$U = E_1 d_1 + E_2 d_2$$

Lo que implica que el voltaje U se distribuye entre los 2 materiales aislantes, y esto según la capacidad de cada uno.

*NOTA ANECDOTICA DEL AUTOR: Una vez, visitando a un colega, noté que usaba **masking tap (material de fabricación: papel)** como capa inicial para aislar las soldaduras de los cables de salida, luego colocaba un espaguetti (con este bastaría). Yo le comenté que el making tape no es un material adecuado para ser usado en motores eléctricos. Él respondió que no le afectaba, y ayudaba a reforzar. Pero la teoría explicada lanza por la borda su explicación, ya que en presencia del voltaje, en este material se concentrará un fuerte campo eléctrico que podría generar un arco eléctrico que producirá calor y fallas prematuras. Hay que enfatizar, que en un arreglo de aislantes en serie, el voltaje se divide entre los distintos materiales, y será el de menor capacidad dieléctrica el que concentre el mayor campo eléctrico. Lo ideal es que se distribuya uniformemente.*

De acuerdo con la norma IEC para máquinas eléctricas rotativas (IEC 60034), la tensión de prueba debe llevarse a cabo con un voltaje de CA a una frecuencia de 50 ó 60 Hz. En baja tensión la prueba para máquinas con potencias por debajo de 1 kW tiene que ser de:

$$U_{prueba} = 2U_{nominal} + 500 [V]$$

Para máquinas de más de 1 kW, la tensión de prueba tiene que ser:

$$U_{prueba} = 2U_{nominal} + 1000 [V] \text{ (Al menos 1500 V)}$$

El período de prueba es de 5 s para motores usados, cuya potencia es menor o igual a 5 kW, y para los nuevos motores de 1min.

Máquinas de media tensión también tienen que soportar las ondas de choque de voltaje. La prueba se hace con:

$$U_{prueba} = 4U_{nominal} + 5kV [V]$$

En estas máquinas, debido al riesgo de fracaso, se permite hacer ensayos en bobinas separadas en el laboratorio.

La tensión del pulso se ajusta para que tenga un tiempo de subida t_r de 1.2 ms, y una duración mantenida de 50 ms. ¿Qué significa tiempo de subida? Desafortunadamente, los 2 principales estándares de máquinas eléctricas definen distinto el tiempo de subida (IEC 60034 y NEMA MG1). En general, se asumirá **tiempo de subida** de un pulso de voltaje, que recibe el bobinado, como el tiempo comprendido entre el 10% y el 90% de su nivel. Ver Fig. 1.

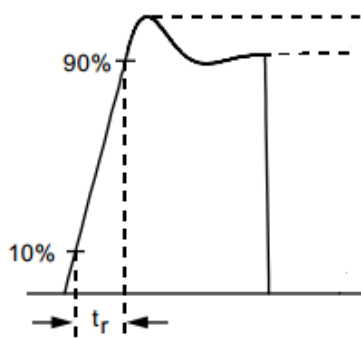


Figura 1 Tiempo de subida t_r de un pulso de voltaje

Es interesante analizar cómo se propaga este pulso de voltaje por medio de las bobinas, partiendo desde la primera vuelta, hasta la última. En general, no todas las vueltas de una bobina reciben el mismo nivel de voltaje, con un efecto progresivo a decaer. Pero siempre serán las primeras vueltas las que se someten a mayor estrés de voltaje de las ondas incidentes.

Fuentes de pulsos de voltaje

Las máquinas eléctricas rotativas pueden someterse a pulsos de voltaje transitorios, lo cuales podrían provocar daños en el sistema de aislamiento, por lo tanto deben estar preparados para soportarlos. Las fuentes más comunes de estos pulsos de voltaje son (ver Fig. 2):

- Ensayos en fábrica o centros de servicios, para máquinas nuevas o en reparación.
- Encendido y apagado de motores de gran tamaño.
- Conmutación de bancos de condensadores automáticos.
- Descargas atmosféricas (rayos).
- Maniobras de las compañías eléctricas.
- Variadores electrónicos de velocidad (variadores de frecuencia).

Ver Fig. 2 con un ejemplo de un pulso de voltaje.

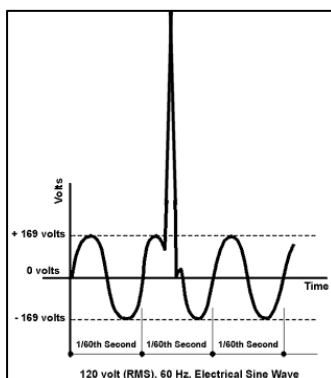


Figura 2 Pulso de voltaje típico en señal senoidal de 60Hz y 169Vpeak.

La Fig. 3 muestra un caso de los pulsos de voltaje producidos por el encendido y apagado de condensadores en un banco automático.

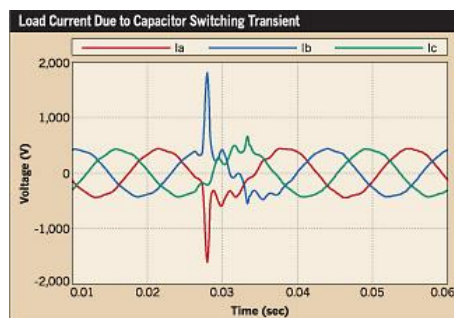


Figura 3 Pulso de voltaje por conmutación de condensadores.

Se considera a continuación la última de las fuentes de pulsos de voltaje, esto es: los variadores de velocidad.

Motores con aislamiento para uso con variadores de velocidad

Los motores para uso con variador se conocen como **Inverter Duty**, y se enrollan con sistemas de aislamiento resistentes a los pulsos de voltaje, ya que los variadores son fuentes potenciales de pulsos de voltaje. El fenómeno se conoce como **Onda Reflejada**, y se produce por el cambio de impedancia entre el cable de alimentación y el motor, que se da al transitar el frente de onda del voltaje. La Fig. 4 presenta la señal de voltaje que puede llegar a los terminales de un motor, si las condiciones se dan, principalmente relacionadas con: las largas distancia entre el variador y el motor (típicamente mayores a 20-30 metros); y el valor de la frecuencia de conmutación del variador, donde valores altos promueven la generación de la onda reflejada.

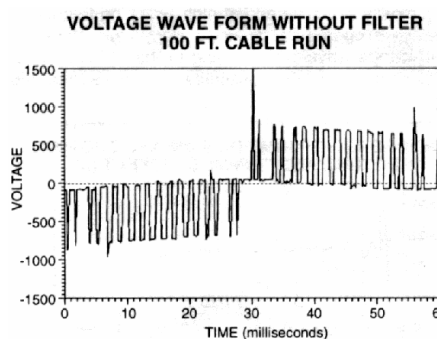


Figura 4 Onda de voltaje en bornes de un motor mostrando- fenómeno de onda reflejada con pulso de 1500V

El estandar NEMA MG 1 - Parte 31, y el IEC 60034, especifican que los sistemas de aislamiento para uso con variador, de bajo voltaje (menos de 600V) deben estar diseñados para soportar un límite superior de **3.1** de voltaje línea-línea del motor. El tiempo de subida de los pulsos deben igualar o superar el **0.1µs** (micro segundo). Estos motores se pueden utilizar sin filtros adicionales o reactores de carga previstos para que no superan el límite superior en los terminales del motor, aunque se recomienda el uso de filtros para mayor seguridad. Por otro lado, los motores inverter duty en media tensión con una calificación base que supera los 600 V deben ser capaz de soportar un voltaje límite superior igual a **2.04** veces el voltaje nominal línea-línea del motor, con tiempos de subida igual o superior a **1 µs**.

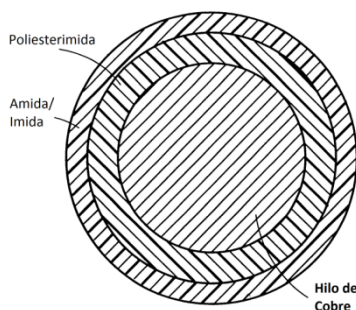


Figura 5 Construcción de un alambre magnéto para uso con variador

Para combatir los efectos que produce el fenómeno de onda reflejada, el primer material a considerar es el alambre magnéto, y las compañías producen estos materiales con estas capacidades. La Fig. 5 muestra un alambre magnéto para uso con variador, formado por 2 materiales aislantes. La combinación de la capa de base de poliéster, y la capa superior de amida-imida modificada, proporcionan un sistema de aislamiento con dureza excepcional y buenas propiedades dieléctricas.

