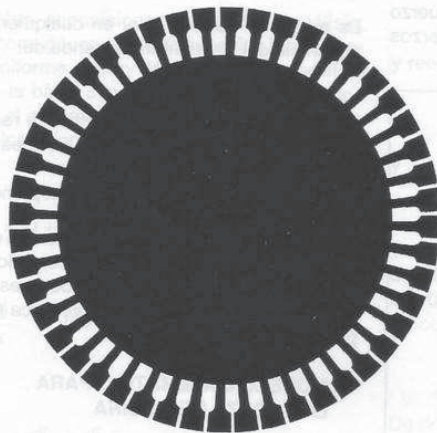


Modelo matemático de la descarga en la cabeza de bobina de un generador



RESUMEN

El estudio de las descargas parciales en generadores, cada día toma mayor importancia en nuestro país, lo que se presenta en este artículo es el resultado de un proyecto de postgrado que abre las puertas para investigaciones futuras sobre el tema.

El trabajo se concentró sobre la naturaleza de las descargas parciales a la salida inmediata de la ranura en una bobina de un generador, llegando a un modelo físico y circuital que permite desarrollar las ecuaciones que gobiernan tal fenómeno. De igual manera se plantean las soluciones y el estado de arte del fenómeno que han sido objeto de investigación por parte de los fabricantes de máquinas eléctricas.

1. LA DESCARGA PARCIAL

Una descarga parcial se define como una descarga eléctrica en la cual no hay perforación del aislamiento principal.

2. DESCARGAS PARCIALES EN MAQUINAS ELECTRICAS ROTATIVAS

En máquinas rotativas (por encima de 8 Kv.) pueden ocurrir descargas parciales en las siguientes partes:

- Entre hilos conductores
- En el aislamiento principal
- Entre cabezas de bobina de fases diferentes

- Oscar R. Tudela R., Esp. - Ingeniero Electricista
Profesor Asociado, Laboratorio de Máquinas
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle
- Guillermo Aponte M., M.Sc. - Ingeniero Electricista
Profesor Titular, Laboratorio de Alta Tensión
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle
- Luis Freyder Posso B.
Estudiante del Programa Postgrado en Ingeniería
Eléctrica - Universidad del Valle

- Entre la superficie del aislamiento principal y la ranura.
- En la salida inmediata a la ranura

En los dos primeros casos se trata de descargas parciales internas debidas al elevado gradiente de potencial sobre algún espacio de aire que ha quedado durante el proceso de aislamiento de la bobina.

Los casos restantes corresponden a descarga parcial externa o superficial. El tercer caso se debe a la falta de un adecuado espaciado entre cabezas de bobina de fases diferentes. El cuarto caso, conocido como corona o descarga de ranura, sucede cuando la superficie semiconductora del aislamiento principal pierde contacto con el núcleo. El último caso, objeto de este artículo, se conoce como descarga superficial a la salida inmediata de la ranura o en la cabeza de bobina y su naturaleza es diferente al caso tercero.

Debe recordarse que adicionalmente en el esfuerzo eléctrico, las bobinas están sujetas a esfuerzos mecánicos, térmicos y electrostáticos.

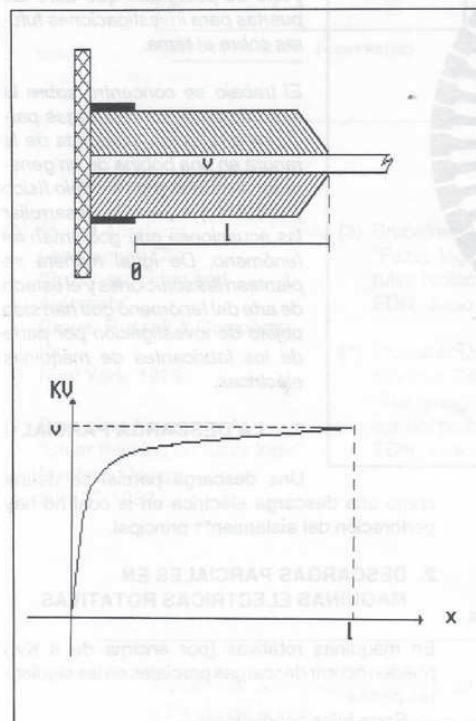


Fig. 1. Distribución del potencial en la bobina a la salida de la ranura

3. DESCARGAS PARCIALES EN CABEZA DE BOBINA

La naturaleza de este caso específico puede asimilarse a la de un condensador, con uno de sus electrodos a un potencial alto, en el caso referido: la parte externa de la cabeza de bobina más alejada de la ranura, y el otro electrodo conectado a un potencial de tierra: la salida de la bobina inmediata a la ranura en contacto con el núcleo. La superficie exterior de la cabeza de bobina más alejada a la ranura tratará de asumir el mismo potencial del conductor del devanado. Esta situación causa un cambio brusco en el potencial que aparece en la superficie exterior del aislamiento de la bobina en la zona de transición entre la ranura y la parte saliente de la bobina. Dicho cambio brusco de potencial impone unos gradientes muy elevados al espacio de aire adyacente al núcleo, originando la ruptura dieléctrica del mismo y las descargas superficiales en esta región del devanado. (Fig. 1)

La magnitud del potencial en cualquier punto de la superficie del aislamiento depende de:

- El voltaje del conductor
- El espesor, constante dieléctrica y resistividad del aislamiento a la temperatura en cuestión
- La forma del conductor aislado
- La distancia superficial desde el plano de tierra.

A lo anterior se adiciona la configuración de las barras, los rebordes y dedos del núcleo, los anillos de soporte, las amarras, etcétera, en los alrededores del sector de bobina que sobresale, lo cual complica el análisis del problema.

4. MODELO MATEMATICO PARA LA CABEZA DE BOBINA

El modelo puede representarse por un circuito eléctrico teniendo en cuenta que el aislamiento se comporta como un dieléctrico real.

El circuito se ilustra en la Fig. 2.

En este circuito se consideran las siguientes variables, partiendo del modelo paralelo del aislamiento:

- C = Capacitancia de la pared aislante por unidad de longitud.
- R = Resistencia de la pared aislante por unidad de longitud
- r = Resistencia superficial del aislamiento por unidad de longitud.
- e = Tensión instantánea

$$\Delta r = r \, dx;$$

$$\Delta C = C \, dx;$$

$$\Delta R = R \, dx$$

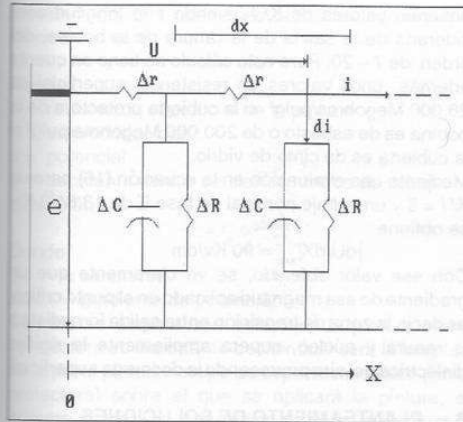


Fig. 2. Circuito eléctrico equivalente del sistema Núcleo-aislamiento-conductor a la salida de la ranura.

Las siguientes suposiciones facilitan el análisis: aislamiento homogéneo; contacto superficial aislamiento-núcleo uniforme; no hay diferencia de potencial en el sector de la barra conductora analizado; el único medio entre el aislamiento y el núcleo es el aire y no hay obstáculos físicos. En un elemento dx:

$$d\vec{U} = (\vec{I} + d\vec{I}) r dx \quad (1)$$

$$\frac{\partial \vec{U}}{\partial x} = (\vec{I} + d\vec{I}) r \quad (2)$$

$$d\vec{I} = d\vec{I}_c + d\vec{I}_r \quad (3)$$

$$d\vec{I} = \Delta C \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_R}{\Delta R} \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vec{I}}{\partial t} = C \frac{\partial (\vec{U} - \vec{e})}{\partial t} \frac{\partial x}{\partial t} + \frac{(\vec{U} - \vec{e})}{R} \frac{\partial x}{\partial t} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \vec{I}}{\partial x} = C \frac{\partial (\vec{U} - \vec{e})}{\partial t} + \frac{\vec{U} - \vec{e}}{R} \quad (6)$$

Si se elimina la variable tiempo con la notación fasorial

$$\frac{d\vec{U}}{dX} = (\vec{I} + d\vec{I}) r \quad (7)$$

$$\frac{d\vec{I}}{dX} = -(\vec{E} - \vec{U}) Y \quad (8)$$

Donde,

$$Y = \frac{1 + j\omega CR}{R} dx \quad (9)$$

Siendo Y, el fasor de admitancia por unidad de longitud de la pared del aislamiento.

Despreciando a dI en la ecuación (7) y derivando de nuevo:

$$\frac{d^2 \vec{U}}{dX^2} = \frac{d(\vec{I} \cdot r)}{dX} = r \frac{d\vec{I}}{dX} \quad (10)$$

y reemplazando (9) en (10)

$$\frac{d^2 \vec{U}}{dX^2} = -(\vec{E} - \vec{U}) Y \cdot r \quad (11)$$

y

$$\frac{d^2 \vec{I}}{dX^2} = Y \cdot r \cdot \vec{I} \quad (12)$$

Teniendo en cuenta las condiciones de frontera y definiendo $\alpha^2 = Y \cdot r$:

$U = 0$, para $x = 0$; $I = 0$, para $x = \ell$

Se obtiene la solución para $\vec{U}$:

$$\vec{U} = \vec{E} \left[1 - \frac{e^{-\alpha(\ell-x)} + e^{-\alpha(x)}}{e^{-\alpha\ell} + e^{-\alpha}} \right] \quad (13)$$

De donde puede llegarse a la expresión:

$$|U/E| = \sqrt{\frac{(A-B)^2 + (C-D)^2}{(A)^2 + (C)^2}} \quad (14)$$

Donde,

$A = \cosh K \cos K$

$B = \cosh[K(\ell-x/\ell)] \cos[K(\ell-x/\ell)]$

$C = \sinh K \sin K$

$D = \sinh K(\ell-x/\ell) \sin K(\ell-x/\ell)$

$K = \ell \sqrt{j\omega cr/2} = \ell \sqrt{j\omega \epsilon_0 r} = \ell \sqrt{\epsilon_0} \omega \epsilon_0 r/2$

ϵ_0 = constante dieléctrica del vacío

ϵ = constante dieléctrica del aislamiento

ρ = resistividad superficial del aislamiento

δ = espesor del aislamiento

Las gráficas de la ecuación (14) se presenta en la Fig. 3, para diferentes valores de k y ℓ

Derivando la ecuación (14) se puede obtener una expresión para el gradiente de potencial:

$$\left| \frac{dU}{dx} \right| = \left| E \right| \frac{K}{\ell} \sqrt{\frac{(E - F)^2 + (G - H)}{(A)^2 + (C)^2}} \quad (15)$$

Donde,

$$E = \sinh K(\ell - x/\ell) \cos K(x/\ell)$$

$$F = \cosh K(\ell - x/\ell) \sin K(x/\ell)$$

$$G = \cosh K(x/\ell) \sin K(\ell - x/\ell)$$

$$H = \cos K(x/\ell) \sinh K(\ell - x/\ell)$$

con los valores de A y B antes definidos.

En la Fig. 4. se muestra la variación del gradiente.

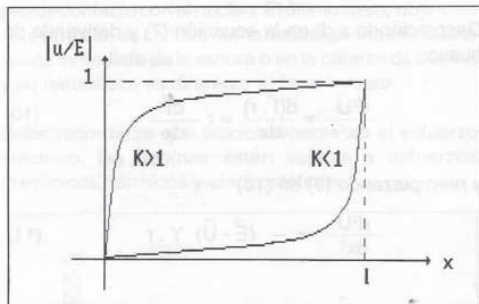


Fig 3. Distribución del potencial superficial para diferentes valores de K.

En el punto crítico, es decir, cuando $x = 0$, el gradiente es:

$$\left| \frac{dU}{dx} \right| = \frac{E K \sqrt{2}}{\ell} \quad (16)$$

5. EL PROBLEMA PRACTICO

Considerando un aislamiento típico de mica como el de las máquinas de voltaje mayores de 6 Kv, se

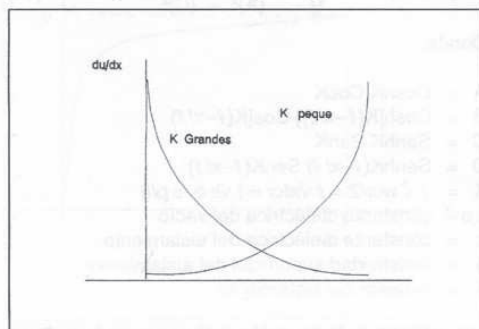


Fig. 4. Distribución del gradiente para diferentes valores de K.

obtienen valores de K/ℓ , siendo ℓ la longitud considerada de la salida de la ranura de la bobina, del orden de 7 ~ 20. Para este cálculo se tiene en cuenta además unos valores de resistencia superficial de 20.000 Megohms/pulg² si la cubierta protectora de la bobina es de asbesto o de 200.000 Megohms/pulg² si la cubierta es de cinta de vidrio.

Mediante una evaluación en la ecuación (16) para un $K/\ell = 8$ y un voltaje nominal de fase E de $13.8/\sqrt{3}$ Kv, se obtiene:

$$\left| \frac{dU}{dx} \right|_{x=0} = 90 \text{ Kv/cm}$$

Con ese valor obtenido, se ve claramente que un gradiente de esa magnitud aplicado en el punto crítico, es decir, la zona de transición entre salida inmediata a la ranura y núcleo, supera ampliamente la rigidez dieléctrica del aire provocando la descarga superficial.

6. PLANTEAMIENTO DE SOLUCIONES, ESTADO DEL ARTE

Todos los planteamientos de las soluciones al problema de la descarga superficial a que se hace referencia, giran alrededor de lo que sugiere la solución teórica para la ecuación de gradiente de potencial en el punto crítico, ecuación (16).

Como el voltaje E está definido para la máquina, la única variable a manejar en dicha expresión es el factor K; el cual depende de la resistividad superficial y de la capacitancia transversal del dieléctrico. El manejo de estos dos parámetros ha permitido una serie de soluciones o prácticas, algunas exitosas y otras no.

Las soluciones actuales se basan en la utilización de cintas semiconductoras, pinturas semiconductoras y láminas metálicas, que tratan de lograr un control eficaz de la distribución del gradiente de potencial en la superficie de la cabeza de la bobina.

Pinturas semiconductoras: Tal vez por la facilidad de aplicación y la muy alta posibilidad de obtener capas muy uniformes, ha sido el método más desarrollado. Inicialmente se utilizaron pinturas semiconductoras con una resistividad superficial relativamente alta que aunque teóricamente satisfacían la condición de gradiente en el punto crítico, desmejoraban la unión con la pintura utilizada en la superficie de bobina alojada en la ranura.

Posteriormente se utilizaron pinturas semiconductoras con resistividades bajas sin lograrse un control adecuado del gradiente de voltaje de final de la capa. Antes de 1960 se planteó una solución, que aún hoy se continúa utilizando, de obtener una distribución uniforme tanto del potencial como el gradiente en la superficie de la cabeza de bobina, mediante una pintura semiconductor con una característica voltaje-resistencia o gradiente-resistencia no lineal, bastante

pronunciada. Las relaciones utilizadas por algunos fabricantes son:

$$r = r_0 u^{-\gamma}$$

Donde,

r = resistencia superficial de la pintura semiconductor

u = potencial

γ = constante dentro de ciertos rangos de voltaje.

o también

$$r = r_0 e^{-\beta du/dx}$$

Donde,

β = constante

du/dx = gradiente de potencial.

Cuando se emplea una determinada pintura semiconductor es importante decidir cuál será la longitud de la parte pintada, el tipo de soporte mecánico (cinta protectora) sobre el que se aplicará la pintura, el número de capas y la forma como se va a efectuar el traslape con la parte recta que se aloja en la ranura. Algunas publicaciones sugieren que gradientes de potencial menores de 5 kv/cm pueden asegurar un comportamiento confiable de esta región de la bobina ante descargas superficiales.

Para voltajes un poco más elevados de 16 Kv se combinan algunas técnicas; como por ejemplo dos capas de pintura separadas por un aislamiento.

Cintas: La técnica en este caso ha sido utilizar las cintas de diferentes resistencias ($10^6 \Omega$ - $10^{10} \Omega$) colocadas en forma escalonada de tal manera que permitan una variación de la resistencia a lo largo de la parte de la cabeza de bobina y se pueda lograr un control del gradiente. Lo mismo puede hacerse con cintas semiconductoras.

La técnica con cintas no ha sido muy afortunada por la dificultad de lograr una aplicación homogénea de la misma y por lo tanto un control adecuado del gradiente.

Laminillas semiconductoras o metálicas: Un método empleado para suprimir las descargas parciales en las cabezas de bobina, en el caso de máquinas de voltajes superiores a 20 Kv, es utilizar laminillas metálicas embebidas en el aislamiento principal y dispuestas de una manera geométrica, que permiten un control efectivo del gradiente en la superficie del devanado. Inicialmente se trabajó buscando la distribución óptima de las laminillas y en este sentido avanzaron investigadores como Veverka; llegando a obtener resultados bastante satisfactorios.

Las laminillas metálicas se insertan en el aislamiento como un encintado de corrido al traslape de borde y consisten de 1/2 mil de laminilla metálica y un mil de soporte aislante.

Los inconvenientes de este sistema radican en lo dispendioso de la implementación y el peligro por la potencialidad del deterioro del aislamiento a causa de alguna lámina metálica.

Las variaciones del potencial o del gradiente se eliminaron combinando tres pinturas semiconductoras externas con dos láminas semiconductoras. Este sistema ha reportado soportar 150 Kv sin presencia de corona.

REFERENCIAS

1. THIENPONT, J. and SIE. T.H. "Suppression of surface discharges in the Stator Windings of High Voltage Machines". Cigre., 1964, Report No. 122.
2. WEDDLETON, R.F., et al. "Corona Protection for High-Voltage Stator Windings". IEEE Rotating Machinery, 41A1C74.
3. FROMM, Marvin. "Surface Corona in High Voltage Machines". Proceeding of 7th Electrical Insulation Conference, October 1967, pp. 58-61 IEEE 32C79-19.
4. DAY W.J. et al.. "End Turn Corona Suppressing Coatings Their Composition and Effect". National Electrical Coil Division, MacGraw-Edison Company. pp. 1-3
5. POSSO L.F.: "Descargas superficiales en las cabezas de bobina de los generadores hidroeléctricos". Proyecto de grado para optar título de Magister en Sistemas de generación de Energía Eléctrica. Universidad del Valle.
6. BOTTS C.J.: "Corona in High Voltage Rotating Machine Windings". IEEE. Electrical Insulation Magazin; July/August 1988, Vol. 4. No. 4.
7. GONZALES G. y VALENCIA M. A.: "El efecto corona y su incidencia en las máquinas rotativas". Tesis de grado. Universidad del Valle. 1991.

AUTORES

Oscar Román Tudela Rangel.- Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, 1974. Estudios de especialización en Máquinas Eléctricas en la Escuela Politécnica Federal de Laussana, Suiza. Profesor de tiempo completo de la Universidad del Valle desde 1978.

Guillermo Aponte Mayor.- Ingeniero Electricista de la Universidad del Valle, M.Sc. en Ingeniería Eléctrica en el Area de Alta Tensión en Instituto de Ciencia y Tecnología, Universidad de Manchester - UMIST - Inglaterra. Profesor de tiempo completo Departamento de Electricidad, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, desde 1981.

Luis Freyder Posso Buriticá.- Ingeniero Electricista Universidad del Valle 1981, Profesor universitario tiempo parcial en la Universidad del Valle y Universidad Autónoma de Occidente. Experiencia de 10 años en centrales de CVC y candidato a grado en el Magister de Generación de Energía Eléctrica en la Universidad del Valle. ☐

67