

DETERMINACION DE LA CALIDAD DEL AISLAMIENTO MEDIANTE LA MEDICION DEL FACTOR DE PERDIDAS (TANGENTE DELTA)

Cadavid R. Héctor
PROFESOR UNIVERSIDAD DEL VALLE

Aponte M. Guillermo
PROFESOR UNIVERSIDAD DEL VALLE

Pabón Bernardo
ESTUDIANTE UNIVERSIDAD DEL VALLE

Perea Edwin
ESTUDIANTE UNIVERSIDAD DEL VALLE

El presente artículo recopila los resultados de la medición de la tangente delta, mediante pruebas realizadas sobre generadores del laboratorio de la Universidad del Valle, empleando un puente de Schering.

1. Introducción

En la actualidad los generadores proveen el 90% de la energía eléctrica consumida en el país, teniendo la mayoría de ellos bastantes años de funcionamiento.

Los sistemas de aislamiento, aplicados en las máquinas rotativas, una vez en funcionamiento, se someten al proceso natural de envejecimiento, ocasionado principalmente por las grandes cargas mecánicas, tales como presión y fricción, y por la expansión térmica de los materiales. Estas cargas cambiantes aceleran aún más el fenómeno del envejecimiento. En consecuencia, la medición de la condición del aislamiento forma parte indispensable del mantenimiento preventivo, para garantizar, por un lado, la seguridad del suministro de energía, y por otro, la seguridad de operación de unos equipos cuyos costos son elevados.

Ultimamente se ha presentado un gran avance en la tecnología de fabricación de los generadores, lo cual ha permitido que éstos se construyan de mayor potencia y menor tamaño. La reducción en el tamaño y en el costo de los alternadores

ha sido posible mediante el uso de nuevas técnicas, materiales y compuestos aislantes, lo cual a su vez ha ocasionado en algunos casos un deterioro más acelerado. La medición del factor de pérdidas o tangente delta (δ) permite determinar la calidad del aislamiento del generador y su tasa de deterioro, con el fin de predecir daños e introducir así correctivos que aumenten la vida útil de la máquina.

Con la empresa CHIDRAL se planteó la posibilidad de medir la tangente delta en algunos de sus generadores, para lo cual previamente se haría un estudio teórico y pruebas sobre equipo de laboratorio.

El proyecto se generó en la necesidad de determinar el deterioro del aislamiento de los generadores y demás máquinas rotativas de las hidroeléctricas de nuestro país y de la comarca, por ser éste un factor crítico después de 10 a 15 años de su continuo funcionamiento.

2. Resumen

Inicialmente se efectuó un estudio teórico-práctico sobre la medición de la tangente delta o factor de pérdidas en los devanados de

los generadores, como elemento para juzgar la calidad de los materiales aislantes utilizados en los mismos, con el propósito de aplicar posteriormente este método en los generadores de las plantas hidroeléctricas de la región.

En el Laboratorio de Alta Tensión de la Universidad se dispone de un puente de Schering y un condensador patrón, cuyas características se exponen más adelante, que permiten realizar la medición de la tangente delta a las tensiones de trabajo nominales de los generadores que en la actualidad se fabrican, y que por la corriente que maneja limita su utilización hasta generadores de 20 MVA.

Se estudiaron los circuitos y procedimientos recomendados por las normas y publicaciones internacionales, para efectuar la medición de la tangente delta en generadores. Se realizaron posteriormente mediciones sobre un generador marca OERLIKON de 14 KW, existente en el laboratorio de la Universidad, siguiendo los esquemas mostrados en las figuras 4 y 5; los resultados obtenidos se indican en las figuras 6 y 7, y en las tablas 1 y 2.

En la siguiente etapa del proyecto se tenía previsto efectuar la

medición de la tangente delta en los generadores de la planta de Calima, pero por diversos motivos dicha planta no puede salir de servicio sino hasta fines del presente año, por lo que se está estudiando con CHIDRAL la posibilidad de efectuar pruebas en otra planta, probablemente la del Bajo Anchicayá.

Con este proyecto se muestra cómo en la Universidad, mediante la orientación de su función investigativa hacia la atención de problemas concretos, y con el apoyo de las empresas del sector eléctrico, se pueden plantear soluciones sencillas, a costos bajos, y que representen una solución adecuada y que permita un mejor conocimiento de los problemas.

Al finalizar el proyecto se espera brindar apoyo para el desarrollo tecnológico de nuestra región, al poder tener la posibilidad de realizar estas pruebas, fundamentales dentro de las políticas de competencia mediante calidad, que está planteando el Gobierno nacional.

Las mediciones dieléctricas son, hoy día, parte integral del control de calidad de los fabricantes de estos equipos y factor de gran ayuda para la realización de un adecuado mantenimiento por parte del usuario.

3. Factor de Pérdidas Dieléctricas (Tangente Delta)

Cuando un dieléctrico está sometido a una diferencia de tensión, circula por él una pequeña corriente que tiene dos componentes fundamentales: Una corriente capacitiva (I_c) y una corriente resistiva (I_r) debida a la conductancia transversal, la cual fundamentalmente es la que causa las pérdidas de energía (figura 1.b).

Cuando el dieléctrico está sometido a una tensión continua, la corriente capacitiva disminuye con el tiempo, hasta que la corriente total alcanza un valor constante correspondiente a la corriente resistiva.

Si el dieléctrico está sometido a una tensión alterna, las corrientes capacitiva y resistiva quedan establecidas durante todo el tiempo que el dieléctrico está bajo la acción de la tensión alterna.

Todo dieléctrico puede representarse por un condensador ideal, exento de pérdidas, y una resistencia, esta se puede considerar conectada en serie o en paralelo (figuras 1 y 2).

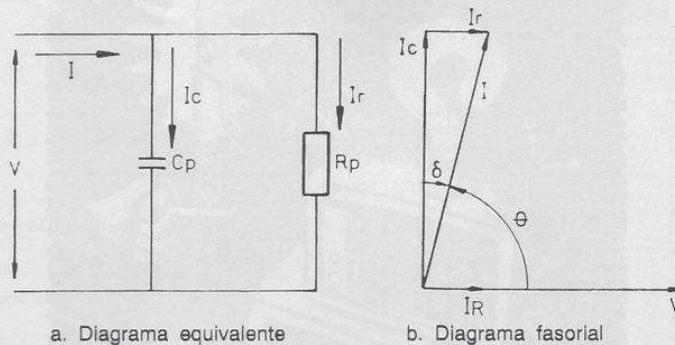


Figura 1. Circuito en serie de un dieléctrico

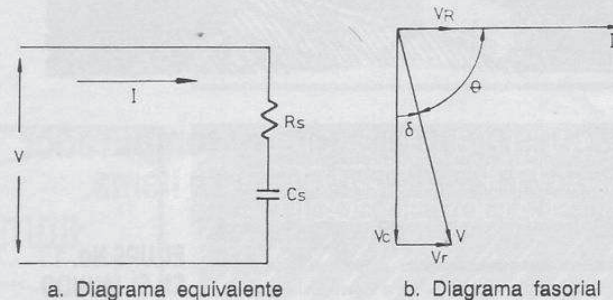


Figura 2. Circuito en paralelo de un dieléctrico

El Factor de Pérdidas Dieléctricas de un material aislante es la tangente del ángulo de pérdidas (δ):

$$\tan \delta = \frac{I_r}{I_c} \quad (\text{Circuito Paralelo})$$

$$\tan \delta = \frac{V_r}{V_c} \quad (\text{Circuito Serie})$$

De las figuras 1 y 2 se tiene que la tangente delta es:

$$\tan \delta = \frac{1}{2 \pi f C_p R_p} \quad (\text{Circuito paralelo})$$

$$\tan \delta = 2 \pi f R_s C_s \quad (\text{Circuito serie})$$

4. Efecto de la Temperatura y del Voltaje

El factor de potencia del aislamiento varía directamente con la temperatura, pero el grado con el cual esto ocurre depende de los

materiales utilizados. Es deseable que las medidas sean hechas dentro de límites de temperatura relativamente estrechos, para permitir la comparación de los resultados del factor de potencia de aislantes de diferentes máquinas y para diferentes ocasiones en una misma má-

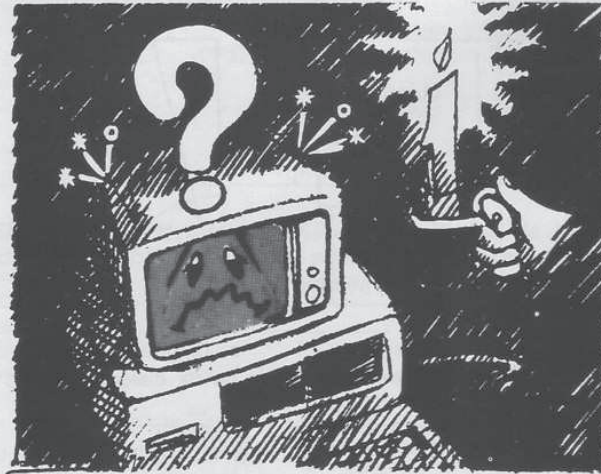
quina. En el uso de tangente delta es muy conveniente, para la comparación de resultados de pruebas de materiales, usar el mismo equipo en idénticas condiciones experimentales.

5. Teoría general del puente de Shering

El método del puente de Schering se basa en el principio clásico de los puentes, comparando la muestra a probar con un capacitor estándar libre de pérdidas.

La principal ventaja de este tipo de puente consiste en que tanto la capacitancia como el factor de potencia pueden ser medidos a voltaje nominal.

La condición de balance puede ser fácilmente encontrada, si la muestra se representa por su circuito equivalente serie, tal como se indica en la figura 3; las otras ramas del puente son un capacitor estándar



Después de un apagón, su computador no va a saber ni cómo se llama.



Best Power Technology, Inc.

**EL UPS No. 1
EN EL MUNDO**

- ✓ Protección contra descargas eléctricas y sobretensiones.
- ✓ Aislación, incluyendo una línea de salida neutra con conexión a tierra.
- ✓ Regulación.
- ✓ Energía continua.
- ✓ Energía de onda sinusoidal.
- ✓ Diseñado para alimentar fuentes de alimentación conmutadas.

Distribuidores autorizados para Colombia:

TELEFONOS:

CALI: 675090 - 675091

BOGOTA: (91) 2247344 - 2242816



COMUNICACIONES,
TELÉFONICA S.A.

MEDELLIN: (94) 3310397 - 3311194
PEREIRA: (963) 359920

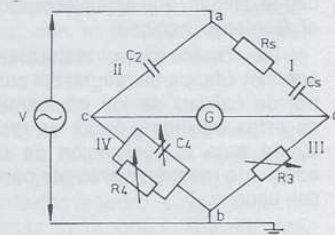


Figura 3. Puente de Shering

Las impedancias de las cuatro ramas son las siguientes:

$$Z_1 = R_3 + \frac{1}{j2\pi f C_2}$$

$$Z_2 = \frac{1}{j2\pi f C_2}$$

$$Z_3 = R_3$$

$$Z_4 = \frac{R_4}{1 + j2\pi f R_4 C_4}$$

Aplicando la ecuación general de equilibrio de puentes en corriente alterna, se obtiene:

$$Z_1 \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$$

$$\left[R_3 + \frac{1}{j2\pi f C_2} \right] \cdot \left[\frac{R_4}{1 + j2\pi f R_4 C_4} \right] = \left[\frac{1}{j2\pi f C_2} \right] \cdot R_3$$

$$\left[\frac{j\omega R_3 C_2 + 1}{j\omega C_2} \right] \cdot \left[\frac{R_4}{1 + j\omega R_4 C_4} \right] = \left[\frac{R_3}{j\omega C_2} \right] \cdot R_3$$

$$(j\omega R_3 C_2 + 1) \cdot R_4 = (1 + j\omega C_4 R_4) \cdot R_3 \cdot \frac{C_2}{C_2}$$

$$R_4 + j\omega R_3 C_2 R_4 = \frac{R_3 C_2}{C_2} + j\omega C_4 R_4 R_3 \cdot \frac{C_2}{C_2}$$

Igualando las partes reales y las imaginarias:
Entonces:

$$R_4 = \frac{R_3 C_2}{C_2}$$

$$R_3 C_2 R_4 = C_4 R_4 R_3 \frac{C_2}{C_2}$$

$$R_3 = R_3 \frac{C_4}{C_2}$$

$$C_2 = C_2 \frac{R_4}{R_3}$$

Como el propósito es la medición del factor de potencia $\tan \delta$, entonces para el circuito serie se tiene:

$$\tan \delta = 2\pi f R_3 C_2$$

Sustituyendo en esta última ecuación los valores de R_3 y C_2 :

$$\tan \delta_3 = 2\pi f C_4 R_4$$

Para lograr el equilibrio del puente, se mantienen constantes R_3 (o R_4) y C_2 y se varían R_4 (o R_3) y C_4 .



INSTITUTO DE
ELECTRONICA Y
COMPUTACION

ELECTRONICA INDUSTRIAL

- Analógica y digital
- Control Industrial
- Microprocesadores en Control

INSTRUMENTACION INDUSTRIAL

- Neumática, Hidráulica y Electrónica

CONTROLADORES LOGICOS PROGRAMABLES

- Seminarios
- Asesorías
- Montajes

Av. 9a Norte No. 16N-17 Tel. 612846 Cali



FABRICA DE LAMPARAS
INCANDESCENTES,
FLUORESCENTES, MERCURIO,
HALOGENAS Y SODIO

Materiales Eléctricos



Fabricación: Lámparas tubulares fluorescentes

TODO EN ILUMINACION

Calle 19 No. 15-28
Tels.: 841899/893404/806649 Cali

CAIDAS DEL SISTEMA...?
CORTES DE ENERGIA...?
PICOS DE VOLTAJE...?



! LA SOLUCION !

U.P.S. PWM

SISTEMA ININTERRUMPIDO DE POTENCIA



• UPS ON LINE OFF LINE

- REGULADORES
- CARGADORES
- MULTIENCHUFE
- SUPRESOR DE PICOS THOR



Calle 4a. No. 64-14 - Tel./Fax 314887 - Cali - Colombia

de alto voltaje C_2 , una resistencia variable no inductiva R_3 , y un resistor variable R_4 , conectado en paralelo con la capacitancia variable C_4 .

Dado que la impedancia de las ramas Z_1 y Z_2 son mucho mayores en comparación con las ramas Z_3 y Z_4 , casi todo el voltaje aparece a través de los capacitores, lográndose que el detector y las ramas resistivas, que conforman el puente de Schering propiamente dicho, permanezca a un voltaje cercano a cero. Con esta disposición se busca la protección del operario, sin que esté expuesto al riesgo que representa el alto voltaje cuando se hace el ajuste de balanceo en las ramas Z_3 y Z_4 .

Si se llega a producir la ruptura en el elemento que se está probando, o en el capacitor C_2 , los terminales c o d podrían quedar a una tensión igual a la suministrada por la fuente de alimentación; para protección ante esta situación se colocan en paralelo dispositivos de seguridad contra sobrevoltajes.

En la operación del puente de Schering influye grandemente el efecto de las capacitancias parásitas, por el error que introducen en la medición.

El efecto de las capacitancias parásitas se elimina utilizando cables coaxiales apantallados entre el puente y las ramas, Z_1 y Z_2 ; éstos se conectan al sistema blindado que encierra completamente el puente. Dicho blindaje actúa como conexión a tierra para todo el circuito, y hace que la totalidad de las capacitancias parásitas queden a potencial cero.

6. Descripción del equipo utilizado

Para la medición de la Tangente Delta se dispone de un puente de Schering (Marca TINSLEY, Modelo 4550).

La rama I contiene la muestra a medir R_3 - C_2 , la rama II corresponde al condensador patrón C_2 , marca Kamdem Electrical, modelo CLP200, de 100.1 pF, 200 KV.

La rama III contiene una resistencia variable R_3 de cinco dials o posiciones:

- 10x1000 Ω
- 10x100 Ω
- 10x10 Ω
- 10x1 Ω
- 10x0.1 Ω (precisión del 1%).

La rama IV está conformada por una capacitancia C_4 con un valor total de 2.11 μf , continuamente variable mediante cuatro dials:

- 10x0.001 μf
- 10x0.01 μf
- 10x.01 μf
- 1 μf (fijo).

Tiene también una resistencia R_4 formada por una caja decadal resistiva no inductiva de tres dials o posiciones:

- 10x1 Ω
- 10x10 Ω
- 10x100 Ω (Precisión del 1%).

Para la detección del cero se utiliza un galvanómetro de vibración marca TINSLEY, TIPO 5210; una llave de inversión se utiliza para indicar la polaridad de la desviación que se presenta en el galvanómetro, al balancear el puente.

Una resistencia shunt tipo 4550E, la cual presenta 5 shunts internos capaces de soportar hasta 5 amperios como máximo, se usa para evitar que la corriente a través del puente exceda de 30 ma.

Se recomienda ajustar el valor de la resistencia R_4 en 265.2 Ω para obtener lecturas directas del Factor de Pérdidas.

Aumentando lentamente la sensibilidad del detector de nulidad, se regula en primera instancia R_3 hasta obtener la desviación mínima, luego C_4 , y se procede así alternadamente hasta que se obtenga la menor desviación del detector.

El puente está equilibrado cuando la corriente por el detector de nulidad se hace cero; se tiene en ese momento:

$$\tan \delta = 0.1 \cdot C_3$$

$$C_N = \frac{R_4 \cdot C_2}{R_3}$$

$$R_N = \frac{R_3 \cdot C_4}{C_2}$$

C_2 tiene un valor fijo determinado por el capacitor estándar, que en este caso es de 100.1 pF; el equilibrio se obtiene entonces variando R_3 y C_4 .

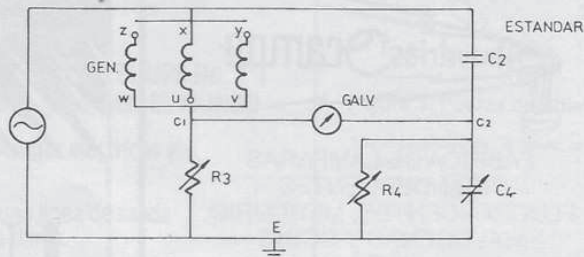


Figura 4. Esquema de conexiones para la medición de C_x .

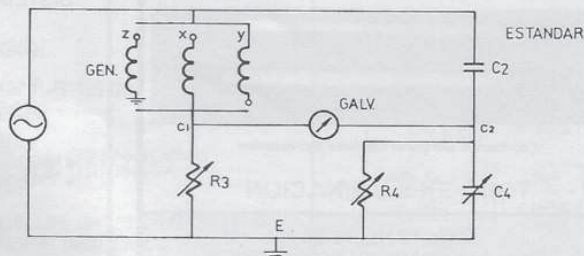


Figura 5. Esquema de conexiones para la medición de C_{xy} .

Tabla No. 1
TANGENTE DELTA PARA FASE X

		$C_2 = 100.1\text{pF}$		C_x $R_4 = 267\Omega$	$F = 60\text{ Hz}$
U Kv	R_3 Ω	C_4 μfad	R_x Ω	C_x pfad	Tan δ
0.2	11050	1.7	186618319	2.43223	0.171116
0.4	11060	1.9	208762169	2.43003	0.191247
0.6	11050	2.03	222844228	2.43223	0.204342
0.8	11080	2.06	226751440	2.42565	0.207350
1.0	11070	2.10	230945758	2.42784	0.211378
1.2	11103	2.07	228325154	2.42062	0.208350

Tabla No. 2
TANGENTE DELTA PARA FASES XY

		$C_2 = 100.1\text{pF}$		C_{xy} $R_4 = 267\Omega$	$F = 60\text{ Hz}$
U Kv	R_3 Ω	C_4 μfad	R_x Ω	C_x pfad	Tan δ
0.2	11040	1.900	208384661	2.434	0.191247
0.4	11080	2.030	223449235	2.425	0.204332
0.6	11080	2.060	226751440	2.425	0.207352
0.8	11103	2.070	228325159	2.420	0.208359
1.0	11105	2.090	230572720	2.420	0.210372
1.2	11108	2.105	232290284	2.190	0.211882

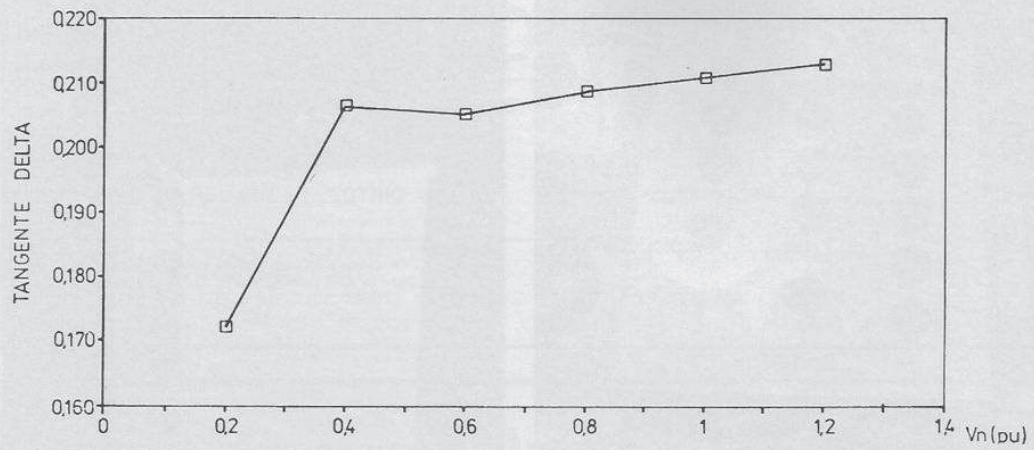


Figura 6. Tangente delta para fase X

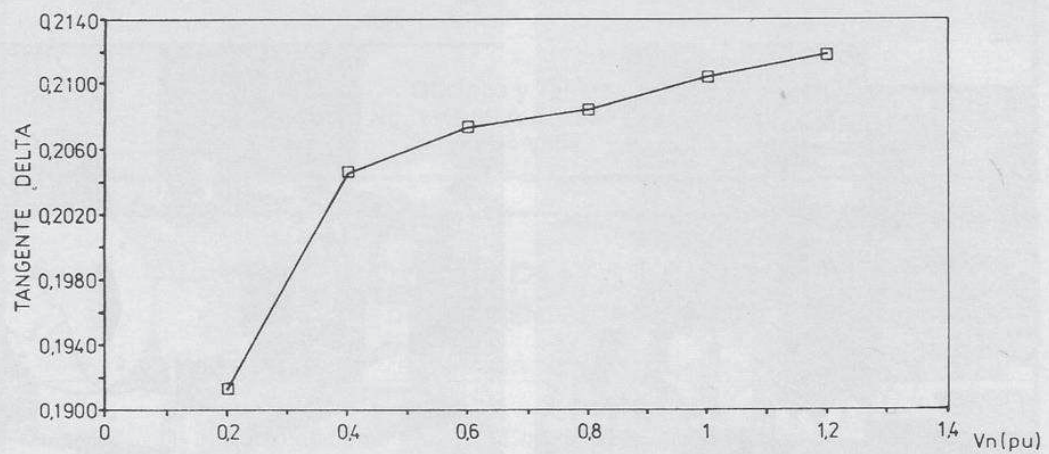


Figura 7. Tangente delta para fases XY

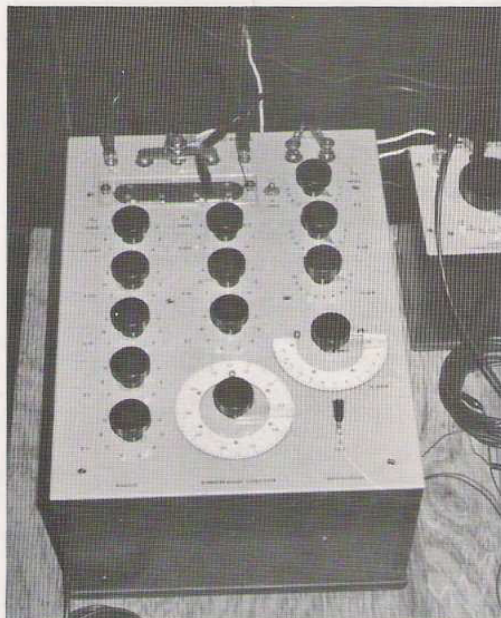


Figura 8. Puente Básico Tipo 4550

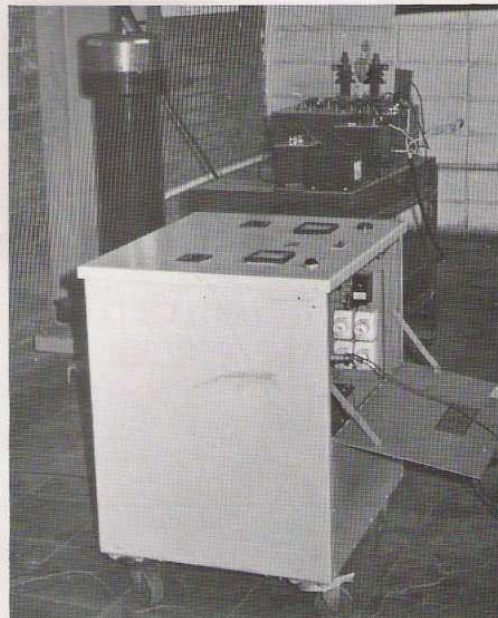


Figura 9. Montaje para la prueba



Figura 10. Condensador patrón

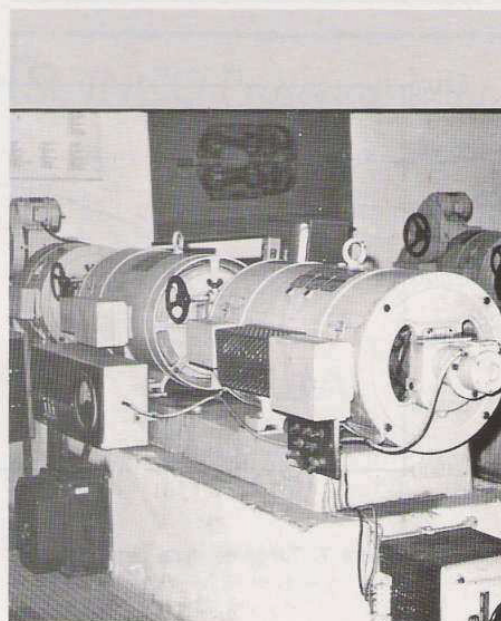


Figura 11. Medición sobre el generador OERLIKON

7. Resultados

Las tablas No. 1 y No. 2 muestran los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en el generador OERLINKON del laboratorio de la Universidad del Valle, para el caso de conexión fase-tierra y para el de fase-fase, respectivamente. Las mediciones se efectúan mediante las conexiones que se muestran en las figuras 4 y 5.

Las figuras 6 y 7 muestran gráficamente los resultados de las tablas 1 y 2. Las fotografías de las figuras 8 a 11 ilustran el equipo utilizado.

8. Conclusiones

En el artículo se presentan las posibilidades existentes de utilizar el factor de pérdidas dieléctricas (tan δ), como medio para realizar un buen control de la calidad del aislamiento. Con la medición periódica de dicho factor se obtiene información suficiente para determinar si la calidad de los materiales dieléctricos utilizados en los equipos se mantiene durante su vida útil, permitiendo programar un mantenimiento preventivo cuando sea requerido.

Cuando se efectúan pruebas de factor de pérdidas sobre un aparato completo, es indispensable trazar un sistema equivalente con todas las capacitancias que puedan intervenir en la medición; para lo anterior es necesario considerar la disposición física de los embobinados y, además, tener en cuenta los factores externos, tales como la inducción de líneas o aparatos cerca del lugar bajo prueba, las capacitancias a tierra, el material entre terminales, el estado superficial de la máquina, falsos contactos de los terminales de prueba; cuyos efectos pueden ser mayores al del propio dieléctrico.

Para juzgar la calidad de un dieléctrico no se debe considerar sólo un valor de tan δ , determinado a una cierta tensión, sino que debe obtenerse la curva de variación en función de la tensión. Un aumento

brusco en el valor del Factor de Pérdidas se atribuye a la posible aparición de descargas parciales, contaminación o también a la presencia de humedad.

Para una buena y completa evaluación de materiales aislantes de un equipo eléctrico es conveniente incluir equipos de medida del Factor de Pérdidas Dieléctricas y de nivel de descargas parciales, ya que los valores arrojados por ellos ayudan a acreditar o desvirtuar las cualidades que como aislante puedan brindar dichos materiales.

Aunque grandes volúmenes de aislamientos pueden ser probados simultáneamente por el factor de potencia, éste es generalmente óptimo en la descomposición del sistema en sus elementos individuales. Las lecturas sobre equipos individuales son más significativas que las lecturas globales, porque éstas pueden ser comparadas con valores publicados para aislamientos particulares.

Datos del Factor de Pérdidas son muy útiles en bobinas de alto gradiente de voltaje y son utilizados para:

- a. Comparar materiales y procesos.
- b. Como prueba de control de calidad y de mantenimiento preventivo del aislamiento.

Un incremento del factor de potencia en el aislamiento durante el tiempo de servicio puede ser el resultado del proceso de deteriorización que incrementa la formación de huecos dentro de la estructura del aislamiento o por requerimientos térmicos y/o excesivos en operación en consecuencia de cortocircuitos, de vibraciones y golpes.

Las mediciones periódicas en máquinas rotativas deben tratar de realizarse en las mismas condiciones de temperatura, presión y humedad, debido a que estos fenómenos físicos afectan el comportamiento de los dieléctricos.

9. Bibliografía

Pabón, Bernardo. Perea, Edwin. "Medición de la Tangente Delta en Generadores". Proyecto de Grado. Universidad del Valle. Cali, 1991.

Aponte, Guillermo. "Medición del Factor de Potencia del Aislamiento".

Jornadas Nacionales de Ingeniería Eléctrica, Bogotá 1987.

Saavedra, Jaime R. "Medición del Factor de Potencia del Aislamiento".

Proyecto de Grado. Universidad del Valle. Cali, 1967.

Harris, Forest K. "Electrical Measurements" B. John Wiley and Sons, 1962.

C. Fink, "Standard Handbook for Electrical Engineers", 10th. Edition, 1968.

IECPUBL. Nr. 60: "High-voltage test techniques", 1962.

American Standard Association: "American Standard for measurement of voltage in dielectric test". AIEE Nr 4 ASA 3 68.1, 1953.

Petersons, O.: "A self-balancing high-voltage capacitance bridge".

IEEE Trans. on Instrum. and Measurem IM 13 (1964) 216-224.

Hippel, A. R. von: "Dielectric materials and applications".

Cambridge, Mass.: MIT Press 1954.

H. Terasa, S. Hirabayashi, T. Hasegawa and K. Kimura "A New AC Current Tesis Method for Non-Destructive Insulation Tests", IEEE Trans PAS-99, 4, pp. 1557-1564, July/August, 1980.