

Comité de Estudio D1 - Materiales y Técnicas de Ensayos Emergentes para Sistemas de Potencia

DETERMINACIÓN DE LA CARACTERÍSTICA DE TRANSFERENCIA DE LOS COMPONENTES CIRCUITALES PARA UN MODELO DE SIMULACIÓN DE AISLADORES

P. MORCELLE DEL VALLE
IITREE-FI-UNLP
Argentina

M. F. P. DEORSOLA*
Dto. de Electrotecnia-FI-UNLP
Argentina

L. J. CATALANO
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Resumen –El conocimiento del valor y la característica de la corriente de fuga en los aisladores en función de la contaminación y de la tensión aplicada, es en la actualidad una información interesante y útil para determinar el comportamiento de dichos componentes de las líneas de transmisión eléctrica.

Por otra parte, la determinación de modelos eléctricos que satisfagan en la mayor medida posible las relaciones tensión-corriente obtenidas experimentalmente permitiría, mediante simulación numérica, el estudio del comportamiento de los aisladores ante tensiones y/o contaminaciones particulares. Usualmente estos modelos de simulación están basados circuitos capacitivo-conductivos alineales con característica de transferencia simétrica.

En el presente trabajo se expone un procedimiento para la adquisición y procesamiento numérico de los datos experimentales; es decir, tensión aplicada $u(t)$ y corriente de fuga $i(t)$ resultante. Luego, basado en el estudio de la característica de transferencia de dipolos eléctricos a partir de la representación gráfica de I vs U y de I vs dU/dt (curvas de Lissajous), se propone la obtención numérica (y a posteriori analítica) de las características de transferencia de los elementos capacitivos y conductivos que modelan el circuito.

Palabras clave: Aislamiento, modelo numérico, curva característica, simulación, circuito alineal, curvas de Lissajous.

1 INTRODUCCIÓN

Entre otros, los trabajos [1] y [2] proponen modelos circuitales representativos de aisladores basados en la información temporal correspondiente a la corriente de fuga. Tanto en estas propuestas como en la mayoría de otros trabajos sobre estudios diversos de la corriente de fuga no hay información acerca de la tensión aplicada, hecho que obviamente no facilita el análisis comparativo de causa y consecuencia, tanto en relación con las formas de onda o con el desfase.

Aparte del detalle apuntado, se acepta considerar que el comportamiento eléctrico de los aisladores es el mismo independientemente de la polaridad de la tensión aplicada o el sentido de la corriente de fuga resultante. Es decir, la relación corriente–tensión puede ser alineal, pero simétrica respecto al origen (función impar).

Esta premisa de simetría causa-efecto permite aplicar la metodología que se explica y fundamenta en el trabajo [3] y obtener las curvas de transferencia, en forma numérica o analítica, de los componentes del modelo del aislador.

Además, como se explicará más adelante en el apartado siguiente, en el repaso de la mencionada metodología específicamente para el aislador, la información temporal de la tensión aplicada y la corriente de fuga re-

* mdeorsola@gmail.com

sultante son necesarias para determinar las curvas de transferencia en cuestión. En consecuencia se obtiene un modelo con más posibilidades para estimar y estudiar la corriente de fuga ante otras tensiones aplicadas, sea con distintos niveles y/o contenidos armónicos.

En definitiva, en el presente trabajo se modela una característica conductiva y una capacitiva eventualmente alineales. La corriente de fuga (consecuencia) tiene dos componentes: una conductiva, que resulta en fase con la tensión aplicada (causa), y la capacitiva que está en fase con la derivada de la causa. Esta idea se explicará y justificará en el apartado siguiente.

2 JUSTIFICACIÓN DE LAS CURVAS DE LISSAJOUS PARA TENSIÓN Y CORRIENTE EN UN CIRCUITO PARALELO CONDUCTANCIA-CAPACITANCIA.

2.1 Conductancia y capacitancia lineal

Como se anticipa en el apartado anterior, en este caso la metodología de las curvas de Lissajous se aplica al circuito de la Figura 1 vinculando la corriente resultante $i(t)$ con la tensión senoidal $u(t)$, y la misma corriente resultante $i(t)$ con la derivada temporal de la tensión $u'(t)$. El circuito en cuestión ilustra un modelo simple del aislador en el cual la conductancia G representa la conducción superficial y C la capacitancia entre bornes (volumétrica más superficial), las cuales se consideran lineales.

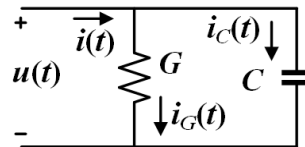


Figura 1.- Circuito de estudio

Si bien sólo se conocen $u(t)$ e $i(t)$, en las Figuras 1 y 2 se muestran $i_G(t)$ e $i_C(t)$. Además a partir de $u(t)$ se puede determinar, sea numéricamente o analíticamente, $u'(t)$. El gráfico de la Figura 2 muestra todas las magnitudes eléctricas para el caso en que la tensión aplicada sea una senoide pura.

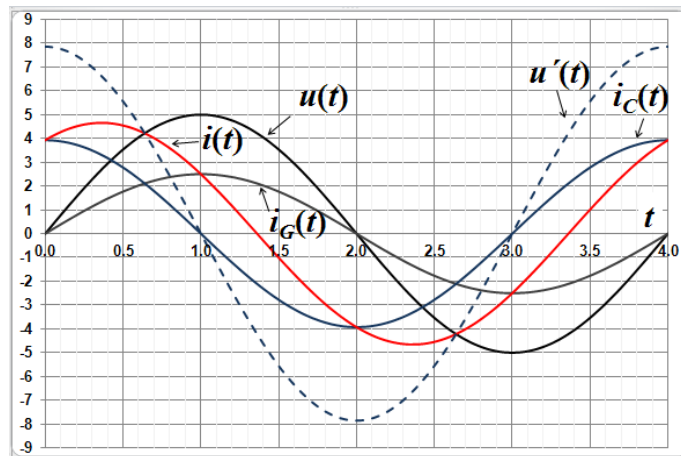


Figura 2.- Tensión, corrientes y derivada de la tensión en función del tiempo

A partir de lo anterior la curva paramétrica resultante de componer $i(t)$ con $u(t)$ da como resultado la elipse de la Figura 3, o sea $I(U)$, y la curva paramétrica resultante de componer $i(t)$ con $u'(t)$ da la elipse de la Figura 4, o sea, $I(U')$.

En el gráfico de la Figura 3 se grafica $i_G(t) = G \cdot u(t)$, o sea $I_G(U)$, correspondiente a una recta con pendiente G , y que además es consecuencia de que $i_G(t)$ está en fase con $u(t)$. Con igual proceder, en el gráfico de la Figura 4 está dibujado $i_C(t) = C \cdot u'(t)$, o sea $I_C(U')$, correspondiente a una recta con pendiente C , y que además es consecuencia de que $i_C(t)$ está en fase con $u'(t)$.

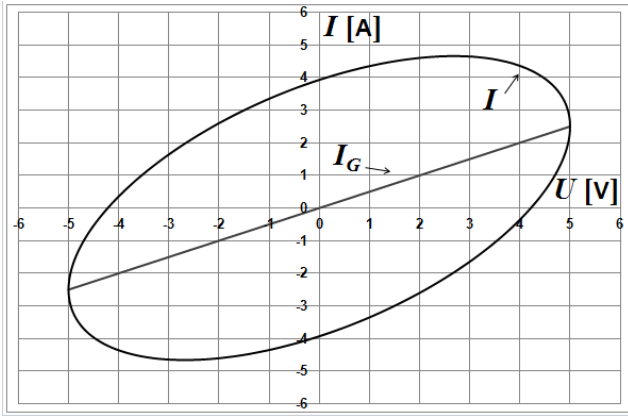


Figura 3.- Corriente vs tensión

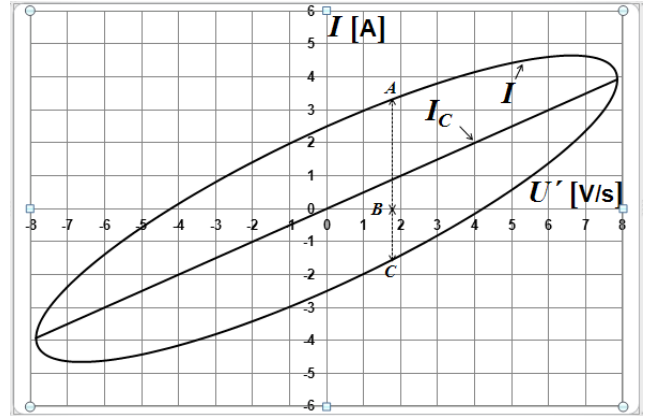


Figura 4.- Corriente vs derivada de la tensión

En cualquiera de los casos vistos se cumple la premisa de simetría impar de ambas curvas de transferencia y por lo tanto es fácil demostrar que la ordenada de cada recta, para un dado valor de abscisa, coincide con el valor medio de la suma de las ordenadas de la elipse para la misma abscisa. Por ejemplo $\frac{AB + BC}{2}$ mostrado en la Figura 4.

Concluyendo, a partir de las curvas de Lissajous (elipses para este caso lineal), que se obtienen graficando la corriente (consecuencia) en función de la tensión (causa) y de la derivada calculada de la tensión, luego de promediar las ordenadas surge la información necesaria para obtener los parámetros de los elementos componentes G y C con los cuales se puede modelar el circuito en estudio.

2.2 Modificación de las curvas de Lissajous cuando G y C son alineales.

En los aisladores reales, debido a la contaminación superficial y la formación de bandas secas, G y C pueden resultar alineales por lo cual esta característica debe tenerse en cuenta en la determinación del modelo.

Para ejemplificar esta situación se proponen las siguientes transferencias conductivas y capacitivas alineales con simetría impar y su representación, Figuras 5 y 6.

$$I_G(U) = \frac{U}{2} + \frac{U^3}{50}$$

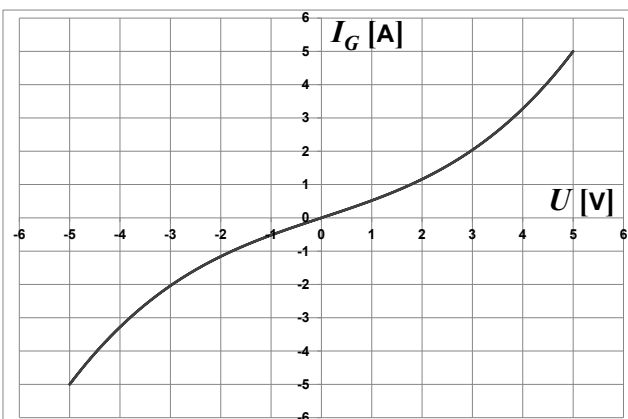


Figura 5.- $I_G(U)$

$$I_C(U') = \frac{U'}{2} - \frac{U'^3}{300}$$

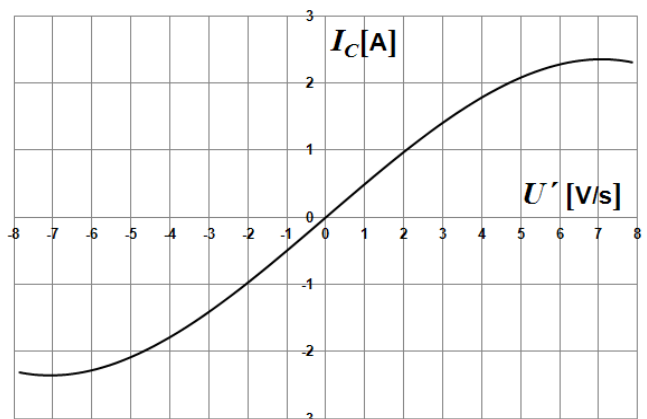


Figura 6.- $I_C(U')$

Si ahora se vuelve a aplicar tensión alterna senoidal al nuevo circuito paralelo resulta el gráfico de la Figura 7, en el cual se presentan las mismas magnitudes eléctricas que en la Figura 2. Se puede observar que, excepto la tensión, todas las demás señales son poliarmónicas, consecuencia típica de la aplicación de tensión senoidal pura a un sistema alineal.

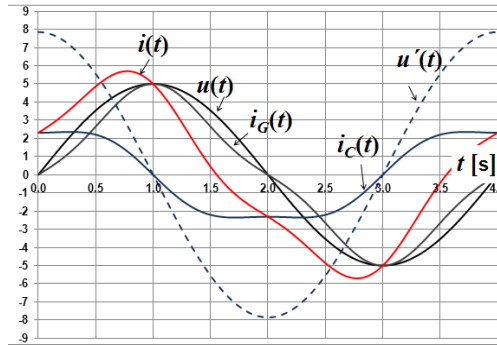


Figura 7.- Tensión, corrientes y derivada de la tensión en función del tiempo (G y C alineales)

Procediendo como en 2.1, las curvas de Lissajous para esta nueva situación son las mostradas en las Figuras 8 y 9. En ambos gráficos se representan las transferencias alineales de las Figuras 5 y 6 y se verifica que dichas curvas son las mismas que resultan de hacer los valores medio de las ordenadas de las elipses como se explicó en el penúltimo párrafo de 2.1.

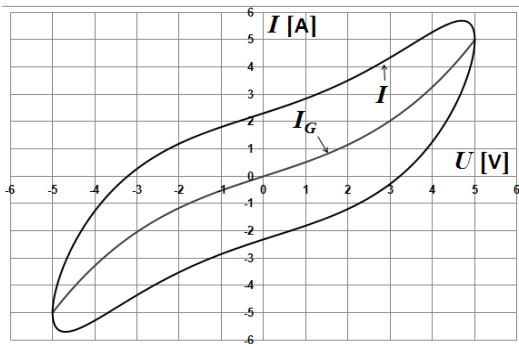


Figura 8.- Corriente vs tensión (G alineal)

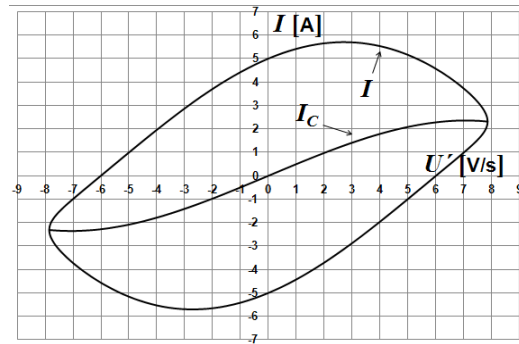


Figura 9.- Corriente vs derivada de la tensión (C alineal)

2.3 Algunos comentarios respecto de la metodología propuesta

La justificación explicada en los párrafos anteriores tiene en cuenta que las curvas de transferencia posean simetría impar y en consecuencia, una vez determinadas, podrán aproximarse numéricamente mediante polinomios, también de grado impar.

Por otra parte en los ejemplos presentados, la característica de la tensión (causa) se considera sinusoidal pura, aunque no hubiese cambiado nada considerarla cosenoidal. En cambio, hay restricciones en la aplicación del método si la tensión tiene contenido armónico y con dos casos posibles:

- La forma de onda causa mantiene simetría impar que determina curvas de Lissajous con concavidades y convexidades, lo que hace engorroso el cálculo de cada una de las curvas conductivas y capacitivas.
- Las armónicas generan formas de onda causa con simetría par, lo que provoca asimetrías en las curvas de Lissajous y resultando finalmente incierto el cálculo de cada una de las curvas conductivas y capacitivas.

Otro aspecto es consecuencia del hecho que el aspecto capacitivo del modelo se obtiene a partir de la derivada de la tensión. La información disponible de esta señal causa resultará de adquisición digital la que inevitablemente agregará contenido armónico de muestreo. La derivada se magnifica proporcionalmente al orden del contenido armónico por lo que será de suma importancia el correcto filtrado de los datos de la tensión, de modo de no aportar falsa información en el posible aspecto alineal de la transferencia capacitiva.

3 APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL CASO DE UN AISLADOR POLIMÉRICO DE MEDIA TENSIÓN.

3.1 Aislador estudiado y condiciones de prueba.

El aislador polimérico utilizado para aplicación del procedimiento, cuya características principales están consignadas en la Tabla I, se ilustra en la Figura 10.

TABLA I. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL AISLADOR EN ESTUDIO

Tensión nominal [kV]	Diámetro de aletas [mm]	Diámetro del cuerpo [mm]	Distancia de arco [mm]	Línea de fuga [mm]	Paso [mm]
17,5	100	25	195	405	300



Figura 10.- Aislador en estudio y aspecto del rocío sobre el mismo

Para la determinación de las curvas de transferencia se aplicaron dos niveles de tensión senoidal, para distintas condiciones superficiales del aislador.

Respecto del acondicionamiento de la superficie, las aplicaciones se realizaron con el aislador seco, húmedo y con rocío de agua de dos resistividades volumétricas diferentes. En la Figura 10 se muestra el aspecto del rocío aplicado sobre el aislador.

Las condiciones de prueba para obtener las curvas de transferencia se resumen en la Tabla II. Las condiciones de la superficie se identifican con 1, 2, 3 y 4 y se usan como referencia en las gráficas de resultados.

TABLA II. CONDICIONES DE PRUEBA PARA OBTENER LAS CURVAS DE TRANSFERENCIA

Tensión aplicada [kV]	Condición de la superficie	
8,4	1	Seco
	2	Húmedo
	3	Rocío con agua de 10 kΩ.cm
	4	Rocío con agua de 1 kΩ.cm
10	1	Seco
	2	Húmedo
	3	Rocío con agua de 10 kΩ.cm
	4	Rocío con agua de 1 kΩ.cm

3.2 Circuito experimental para la adquisición de los datos.

El circuito de prueba se muestra en las Figuras 11 y 12.

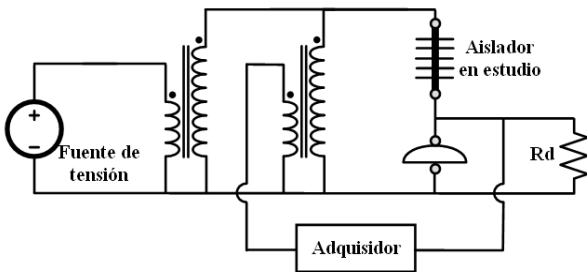


Figura 11.- Esquema del circuito de prueba



Figura 12.- Foto de la instalación de prueba

La fuente de tensión que se indica en la Figura 11 es senoidal sin armónicas y mediante un transformador elevador determina la tensión aplicada al aislador. Para el registro de esta tensión se utiliza un transformador de tensión de medición, mientras que el registro de la corriente de fuga es a través de la tensión que dicha corriente causa en R_d .

3.3 Adquisición de los datos y procesamiento de los mismos.

La adquisición de los datos fue hecha en forma digital con resolución de 10 bit y frecuencia de muestreo de 100 kHz (2000 muestras por ciclo). El resultado de los datos fue procesado numéricamente con una planilla de cálculo, filtrando mediante Fourier, las componentes armónicas de muestreo y los offset de continua.

Con los resultados filtrados y afectados por las escalas de medición de la tensión aplicada y la corriente de fuga, la misma planilla también realiza la derivada numérica de la tensión.

El último paso del procesamiento numérico determina los valores medio de las ordenadas de las dos curvas de Lissajous ya explicadas, con lo se obtienen las tablas de valores de $I_d(U)$ e $I_d(U')$. Estos datos numéricos pueden aproximarse mediante sendos polinomios de grado impar.

4 RESULTADOS

Los siguientes son algunos resultados ilustrativos obtenidos a partir de las condiciones de prueba propuestas en 3.1.

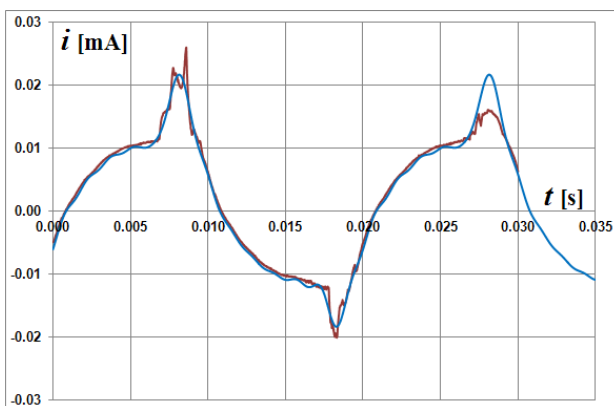


Figura 13.- Corriente de fuga adquirida y filtrada (Condición superficial 4, nivel de tensión 10 kV)

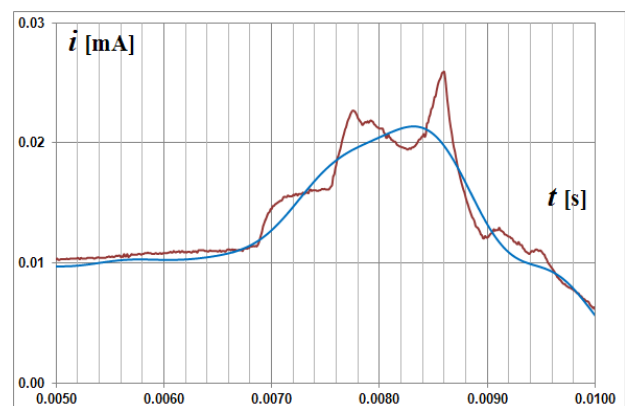


Figura 14.- Detalle de la Figura 13

La Figura 13 muestra el registro de la corriente de fuga adquirida y filtrada para tensión aplicada de 10 kV y la condición superficial 4. En la Figura 14 se amplía una parte de las curvas.

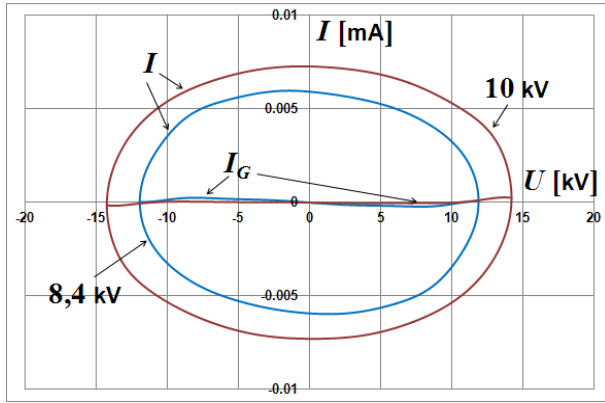


Figura 15.- Corriente vs tensión (Condición superficial 1 y los dos niveles de tensión)

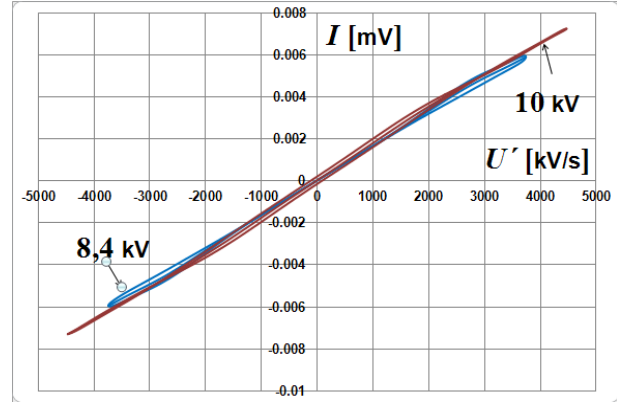


Figura 16.- Corriente vs derivada de la tensión (Condición superficial 1 y los dos niveles de tensión)

La grafica de la Figura 15 corresponde a las curvas de Lissajous para obtener $I_G(U)$ para el caso superficial 1 y los dos niveles de tensión. Del mismo se comprueba que la conductividad superficial puede considerarse nula (curvas de $I_G(U)$ horizontales). En el caso de la Figura 16 se muestran las curvas de Lissajous para conseguir $I_C(U)$. En este caso la curva cerrada y su valor medio prácticamente se confunden en la recta cuya pendiente es la capacitancia del capacitor del modelo que se pretende obtener.

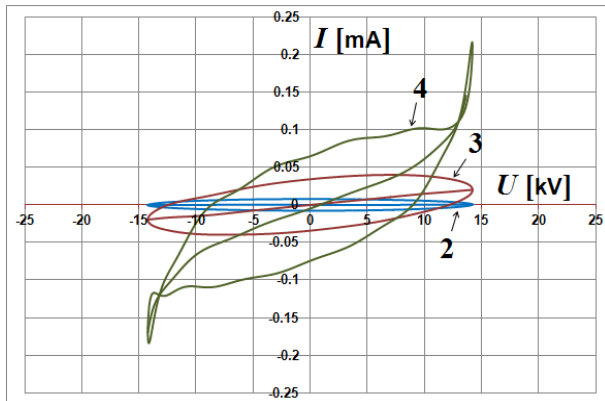


Figura 17.- Corriente vs tensión (Condición superficial 2,3 y 4; nivel de tensión 10 kV)

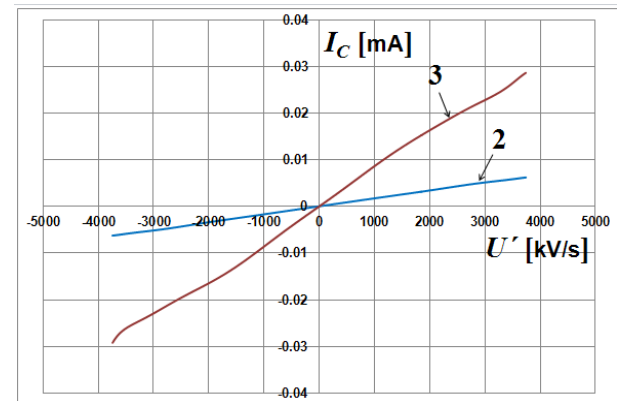


Figura 18.- $I_C(U')$ (Condición superficial 2 y 3; nivel de tensión 8,4 kV)

Para el caso de la Figura 17 se grafican las curvas de Lissajous para obtener $I_G(U)$ para tensión aplicada 10 kV y condiciones superficiales 2, 3 y 4. Se aprecia en el mismo que la pendiente de la curva de transferencia conductiva va en aumento con la conductividad del agua de rocío y para el caso 4 se hace alineal y no tan simétrica impar. En la Figura 18 solo se muestra $I_C(U')$ para 8,4 kV condición superficial 2 y 3. En este caso, en la condición 3, la película de agua aporta un aumento de la constante dieléctrica y consecuentemente la capacitancia superficial.

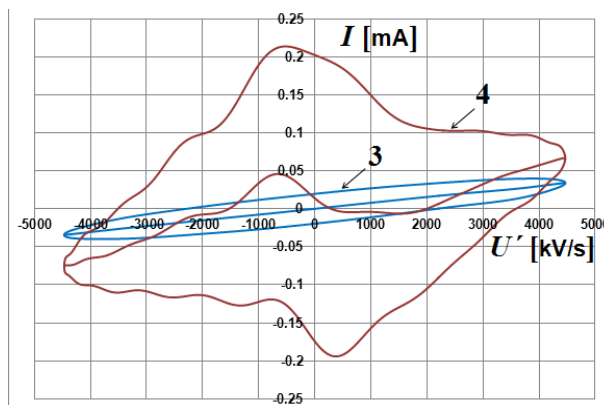


Figura 19.- Corriente vs derivada de la tensión (Condición superficial 3 y 4; nivel de tensión 10 kV)

Un último ejemplo importante es el mostrado en la Figura 19. En la misma se representan las curvas de Lissajous para determinar $I_C(U')$ para nivel de tensión 10 kV y condiciones superficiales 3 y 4. En el caso de rocío de menor conductividad la corriente que está en fase con la tensión mantiene la característica de simetría impar lo que se refleja en ambas curvas 3.

Para el otro caso de contaminación, la corriente conductiva ya no es totalmente simétrica impar, como muestra la curva 4 de la Figura 17, y por lo tanto el método de cálculo de $I_C(U')$ determina también una característica sin simetría impar. Si bien la curva en cuestión tiene pendiente promedio mayor, coherente con los comentarios referentes a la Figura 18, no es fácil determinar la componente capacitiva correspondiente, como se anticipa en 2.3.

5 CONCLUSIÓN

En general ha quedado satisfecho el objetivo propuesto de determinar las transferencias $I_C(U)$ e $I_C(U')$ simétricas para caracterizar el modelo de un aislador.

Los resultados obtenidos son adecuados para simulaciones de funcionamiento mediante enfoques numéricos de la teoría de circuitos.

Estos resultados, aproximados por polinomios, posibilitan estudios analíticos para estimar las consecuencias para causas diferentes (por ejemplo tensiones aplicadas con diferente composición poliarmónica) sin necesidad experimental.

Lo comentado en relación con la Figura 19 indica, que para condiciones de tensión aplicada y contaminación que se manifiestan en descargas en la corriente de fuga, la metodología explicada determina características de transferencia conductiva y capacitiva que deben ser complementadas para tener en cuenta las posibles asimetrías causadas por las mencionadas descargas.

Lo expuesto en el párrafo anterior ya es tema de estudio futuro para los autores.

6 REFERENCIAS

- [1] “Análisis de la forma de onda de la corriente de fuga de aisladores compuestos nuevos y retirados de servicio”, M. Fernando, S. M. Gubanski. UT de Charmers IEEE. 1997
- [2] “Modelación del comportamiento de la superficie de aisladores de goma de silicona de 15 kV a partir de la medición de la corriente de fuga”, J. Zambrano, J. Rodríguez. XIII Encuentro Regional Iberoamericano de la Cigre (ERAC XIII), 24 al 28 de mayo de 2009 en Puerto Iguazú, Argentina.
- [3] “Determinación de los parámetros para un modelo de simulación circuital de la característica magnética real de entrada de un transformador”, M. Deorsola, P. Morcelle del Valle. XV Encuentro Regional Iberoamericano de la Cigre (ERAC XV), 19 al 23 de mayo de 2013 en Foz de Iguazu-PR, Brasil.