

Desarrollo de un modelo electro-térmico para apartarrayos de ZnO bajo contaminación

Development of an Electro-Thermal Model for ZnO Surge Arrester Under Contamination

J.L. Guardado-Zavala
*Posgrado en Ingeniería Eléctrica,
Instituto Tecnológico de Morelia, México.
E-mail: lguarda@prodigy.net.mx*

M. Moreno-Barraza †
*Posgrado en Ingeniería Eléctrica,
Instituto Tecnológico de Morelia, México.
E-mail: mmoreno_mx@yahoo.com*

H. Zazueta-Peña
*Posgrado en Ingeniería Eléctrica,
Instituto Tecnológico de Morelia, México
E-mail: hzazuetapea@yahoo.com*

V. Venegas-Rebollar
*Posgrado en Ingeniería Eléctrica,
Instituto Tecnológico de Morelia, México .
E-mail: vvenegas@yahoo.com*

E. Melgoza-Vázquez
*Posgrado en Ingeniería Eléctrica,
Instituto Tecnológico de Morelia, México
E-mail: emelgoza@iimorelia.edu.mx*

(Recibido: febrero de 2008; aceptado: octubre de 2008)

Resumen

Se presenta el modelo electro-térmico para un apartarrayos de Óxido de Zinc (ZnO) durante pruebas de contaminación. El modelo está compuesto de tres sub-modelos: eléctrico, térmico y de contaminación, los cuales interactúan armónicamente para obtener el comportamiento del apartarrayos durante pruebas de contaminación. El modelo eléctrico se obtiene de mediciones y está compuesto de una capacitancia y una resistencia no-lineal. El modelo térmico considera el calor generado y disipado en la columna de varistores y su entorno. La contaminación se representa como una impedancia dinámica, cuyos valores se obtienen de mediciones en la columna del apartarrayos durante pruebas de contaminación. El modelo se valida determinando el incremento de temperatura durante pruebas de contaminación en un apartarrayos de ZnO de dos unidades clase 190 kV. Finalmente, se presentan los resultados del impacto de diversos parámetros de diseño y construcción en la

distribución de voltaje y temperatura en el apartarrayos durante pruebas de contaminación.

Descriptores: modelo electro-térmico, apartarrayos de ZnO, contaminación, pruebas de contaminación, impedancia dinámica.

Abstract

An electro-thermal model for a Zinc Oxide (ZnO) surge arrester under contamination tests is presented. The model is based in three sub-models: electrical, thermal and contamination, which interact in order to obtain the surge arrester performance under contamination tests. The electrical model is obtained from measurements and is based on a capacitance and a non-linear resistor. The thermal model takes into account the heat generated and dissipated by the column of varistors and its surroundings. The contamination is represented by a dynamic impedance obtained from measurements in the arrester column during contamination tests. The full model is validated by calculating the temperature increase during contamination tests carried out in a two units ZnO surge arrester, class 190 kV. Finally, the results of the effect of several design and construction parameters in the voltage and temperature distribution in the arrester columns during contamination tests are presented.

Keywords: *Electro-thermal model, ZnO surge arrester, contamination, contamination test, dynamic impedance.*

Introducción

Los apartarrayos de ZnO se utilizan ampliamente en las redes de transmisión y distribución de energía para limitar las sobretensiones eléctricas. Bajo condiciones de contaminación en su cubierta de porcelana, los varistores presentan un calentamiento adicional que bajo ciertas condiciones puede conducir a inestabilidad térmica y su destrucción.

Para investigar este comportamiento se desarrolló un nuevo modelo electro-térmico del apartarrayos, el cual incluye los efectos de la contaminación.

El desarrollo de modelos electro-térmicos para apartarrayos ha sido un tópico de interés para la industria eléctrica. En 1988, Lat (1988) presentó un modelo electro-térmico para apartarrayos tipo distribución y sin contaminación. El modelo térmico estuvo compuesto por una fuente de corriente, capacitancias y resistencia térmicas. Por otro lado, el modelo eléctrico estuvo representado por las curvas experimentales de los varistores a varias temperaturas. La interacción de los modelos eléctrico y térmico constituyen el modelo electro-térmico del apartarrayos.

Posteriormente, Hinrichsen *et al.* (1987) presentaron un modelo electro-térmico para apartarrayos de transmisión. Su modelo consiste de un modelo eléctrico formado por un arreglo paralelo de capacitancias y resistencias no lineales para una sección dada del apartarrayos. Para el modelo completo se tiene una red en

escalera en paralelo con otra red en escalera representativa del modelo térmico, similar al de Lat.

Hasta aquí no se ha tratado el efecto de la contaminación. Vitet *et al.* (1992) realiza una investigación experimental en campo y presenta un modelo electro-térmico similar al de Lat, modificándolo en tres aspectos. La capacidad térmica de la cubierta de porcelana se dividió en dos ramas, se incorporó la capacidad térmica de las placas metálicas en la columna de varistores y el calor específico del material de ZnO se consideró dependiente de la temperatura. Vitet encuentra que la temperatura de un varistor durante una prueba de contaminación puede ser estimada si la carga interna es conocida en función del tiempo. El modelo electro-térmico propuesto considera dos fuentes, una debida a la disipación de potencia en los varistores y otra debida a la contaminación. Bargigia *et al.* (1998) desarrollan un modelo electro-térmico similar, considerando el efecto de la contaminación como una fuente de corriente adicional en el modelo eléctrico. En ambos casos, la contaminación se considera constante.

Posteriormente, Feser *et al.* (1991), presentan un modelo electro-térmico para una sola unidad de apartarrayos y lo considera como una doble red de capacitancia en paralelo con una resistencia no lineal. Así, la contaminación se modela como una resistencia superficial y una capacitancia en paralelo.

Siguiendo el desarrollo de los modelos, Naito *et al.* (1997), modifican la característica estática de la capa de

contaminación y propone un modelo para describir la variación con el tiempo de la misma, es decir, considera una impedancia dinámica. Es importante mencionar que este trabajo no fue validado experimentalmente.

Los autores realizaron una investigación experimental sobre el comportamiento de la contaminación superficial siguiendo el método del contaminante húmedo del IEEE (1993). De esta manera, el modelo propuesto para la impedancia dinámica de Naito se validó experimentalmente en pruebas y mediciones realizadas. Posteriormente, el modelo dinámico de la contaminación se incorporó a un modelo electro-térmico del apartarrayos utilizando el Alternative Transient Program (ATP). Una vez integrados los tres modelos: eléctrico, térmico y de contaminación, se validó el modelo de apartarrayos y se efectuaron diversos estudios de sensibilidad a fin de evaluar el comportamiento de las diferentes variables eléctricas y térmicas en el modelo de apartarrayos durante pruebas de contaminación. Se tomó como referencia un apartarrayos de dos unidades, clase 190 kV y un MCOV de 210 kV.

En la figura 1 se presenta el apartarrayos de dos unidades considerado, así como sus partes constitutivas más importantes.

Modelo del apartarrayos bajo pruebas de contaminación

El modelo completo del apartarrayos está integrado por tres sub-modelos que son el eléctrico, el de contaminación y el térmico, que al interactuar armónicamente

permiten obtener el comportamiento del apartarrayos durante pruebas de contaminación.

Para propósitos de modelado, el apartarrayos se dividió en ocho secciones (S1-S8) y dos redes en escalera unidas por las capacitancias de acoplamiento, C_{ai} , como se observa en la figura 2. En esta figura, la red en escalera de lado izquierdo representa el comportamiento de los elementos no lineales del apartarrayos (varistores). Por otro lado, la red del lado derecho representa el comportamiento de la capa de contaminación en la superficie externa de la porcelana.

Además, existen las capacitancias parásitas a tierra, C_p . A continuación, se describen cada uno de los tres sub-modelos.

A. Sub-Modelo eléctrico

El modelo eléctrico de los varistores del apartarrayos está integrado por la resistencia y capacitancia en paralelo del lado izquierdo de la red en escalera de la figura 2. Mientras que la capacitancia es prácticamente constante (Hinrichen *et al.*, 1987), la resistencia del varistor es no-lineal y dependiente del voltaje y la temperatura, $R(v, T)$.

Para obtener los valores específicos de resistencia, se obtuvieron de manera experimental las curvas $V-I$ de los varistores a temperaturas y voltajes discretos.

Así, para valores intermedios de corriente y/o voltaje requeridos durante las simulaciones se efectuaron interpolaciones entre los resultados medidos a fin de obtener $R(v, T)$.

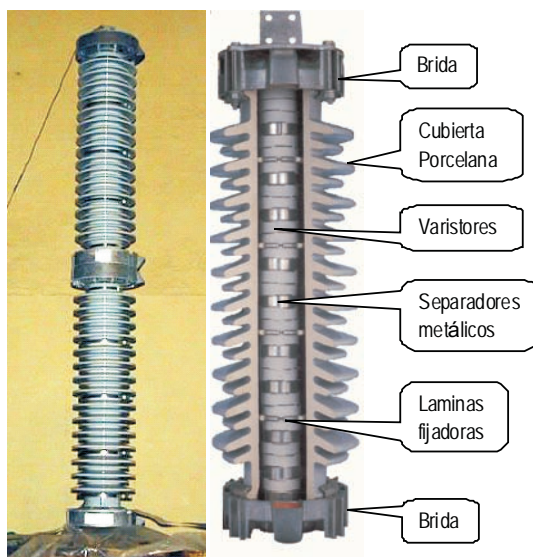


Figura 1. Apartarrayos de dos unidades bajo estudio y sus partes constitutivas

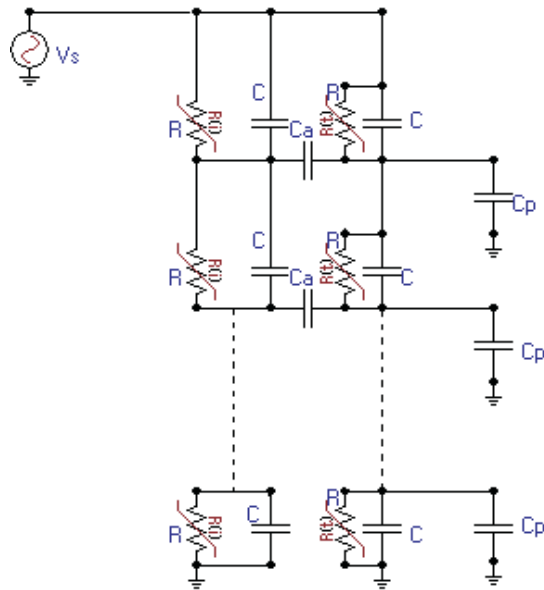


Figura 2. Modelo electro-térmico del apartarrayos bajo pruebas de contaminación artificial

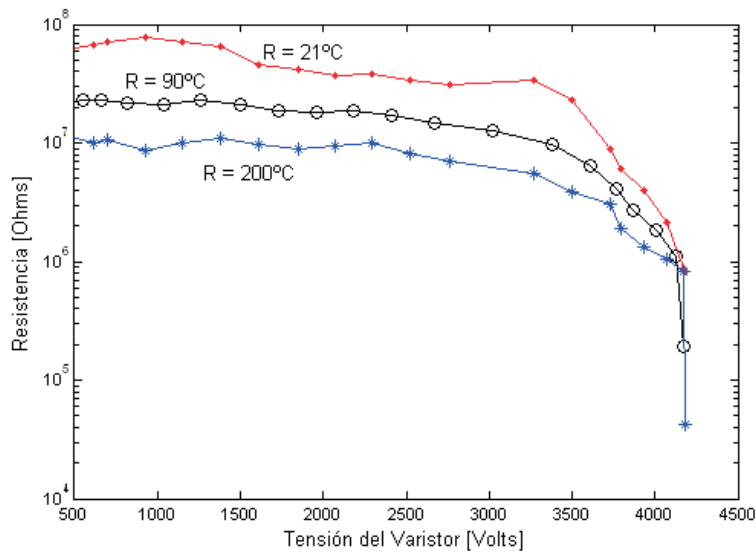


Figura 3. Resistencia del varistor para diferentes temperaturas y voltajes

Por otro lado, las capacitancias parásitas, C_p , se obtuvieron experimentalmente midiendo la corriente axial en la columna de varistores, de acuerdo con (Hinrichen *et al.*, 1987).

La capacitancia de acoplamiento, C_a , se presenta entre la columna de varistores y la superficie externa de la porcelana. Esta capacitancia es el equivalente de dos capacitancias en serie. La primera es la capacitancia debida al espacio de aire y la segunda debida al espesor de la

porcelana. Sus valores se calcularon utilizando un modelo de cilindros concéntricos, así como las dimensiones y características de los materiales involucrados.

En la figura 3 se presentan los valores de resistencia del varistor para varias temperaturas y voltajes discretos.

Obsérvese que a tensiones elevadas la resistencia del varistor disminuye significativamente, debido a que el dispositivo entra en su zona de conducción.

B. Sub-modelo térmico

El modelo térmico desarrollado, debe considerar el calor generado y disipado entre la columna de varistores y su entorno. En dirección axial, la disipación de calor se realiza mediante conducción entre los varistores y las bridas localizadas en los extremos de la columna. En dirección radial, el calor se transmite de la columna de varistores al medio externo por conducción, q_c , convección, q_{conv} , y radiación q_r .

El flujo de calor en dirección axial es pequeño y normalmente no se considera en el análisis (Lat, 1985) y (Swalin *et al.*, 1972). Por tanto, es posible establecer la ecuación de equilibrio térmico para el flujo de calor radial en los varistores, la cual establece que el flujo de calor que entra es igual al flujo de calor que sale, como se muestra en la expresión (1). La fuente de calor es la potencia disipada en las resistencias no lineales. La ecuación de balance térmico es:

$$Q = \frac{V^2}{R_i} = q_c + q_{conv} + q_r. \quad (1)$$

Se considera que el equilibrio térmico se alcanza cuando el calor generado, menos el calor almacenado en los varistores, es igual al calor disipado por conducción, convección y radiación, con lo cual se obtiene:

$$\frac{V^2}{R_i} - C \frac{dT}{dt} = hS(T - T_0) + S\varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4). \quad (2)$$

En (2), el primer término del lado izquierdo es el calor generado por los varistores, debido al voltaje aplicado durante la prueba. El segundo término es el calor almacenado en los varistores por la capacitancia térmica del varistor, C_i , la cual se define como la capacidad que tienen los cuerpos sólidos de almacenar calor o energía térmica (Swalin *et al.*, 1972).

Por otro lado, el primer término del lado derecho involucra al calor disipado por conducción y convección, la constante h combina los coeficientes de conducción y convección para el Óxido de Zinc y S es la superficie lateral del varistor. Aquí se considera un valor para h de 8λ , siendo λ la conductividad del material (Swalin *et al.*, 1972) y (Moreno, 2003). Asimismo, considerando que:

$$S = 2 \pi r l,$$

donde r es el radio de una sección de varistores y l su altura; por consiguiente, se obtiene un coeficiente de

conducción y convección para un varistor de Óxido de Zinc (Moreno, 2003):

$$D_c = h S = 8\lambda(2 \pi r l). \quad (3)$$

El segundo término del lado derecho en (2) es el calor disipado por radiación e involucra la emisividad del material ε y la constante de Stefan-Boltzmann σ (Swalin *et al.*, 1972) y (Moreno, 2003). Al sustituir (3) en (2), la ecuación de equilibrio térmico resultante es:

$$C_i \frac{dT}{dt} + D_c(T - T_0) + S\varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) = \frac{V^2}{R_i}.$$

La temperatura de la sección de varistores se determina resolviendo la ecuación diferencial (4) mediante un método numérico adecuado, tomando en cuenta que ésta es una ecuación diferencial no-lineal. El método de integración empleado fue el de Euler, el cual se describe en (Chapra *et al.*, 1999) y consiste en obtener la derivada dT/dt y aplicar las condiciones iniciales (Moreno, 2003).

C. Sub-modelo de contaminación

La capa contaminante en el apartarrayos se puede modelar como un circuito RC paralelo, rama derecha de la figura 2. La R representa la resistencia superficial del contaminante de cada sección y C es la capacitancia de cada sección contaminada. También existe un acoplamiento capacitivo, C_a , entre la columna de varistores y la capa contaminante.

El modelo para representar la capa contaminante en el apartarrayos se basa en considerar a ésta como una impedancia que varía con el tiempo. La figura 4 presenta el comportamiento de la resistencia superficial medida en la sección 6 (S6) del apartarrayos bajo estudio, durante una prueba de contaminación artificial realizada en el laboratorio de Pruebas Eléctricas de la Comisión Federal de Electricidad (LAPEM-CFE) (Moreno, 2003). Para efectuar las mediciones se construyó un brazo especial, el cual permite efectuar ocho mediciones de resistencia superficial en secciones predefinidas del apartarrayos.

Los resultados medidos se pueden representar computacionalmente mediante una curva sigmoide con cuatro parámetros de ajuste (Naito *et al.*, 1997), (Moreno, 2003) y (Transforms and Regressions for Windows, 1997).

La expresión matemática que describe la curva sigmoide es:

$$y = y_0 + \frac{a}{1 + e^{-\left(\frac{x-x_0}{b}\right)}} \quad (5)$$

Al modificar la expresión (5) para el caso de la parte real e imaginaria de la impedancia capacitiva de la capa contaminante se tiene:

$$R(t) = R_0 + \frac{R}{1 + e^{a(-t+T(t))}} \quad (6)$$

$$X(t) = X_0 + \frac{X}{1 + \exp\{a(-t+T(t))\}} \quad (7)$$

$$T(t) = mi + (mi - \beta V(t)), \quad (8)$$

donde:

- R_0 : Valor inicial de la resistencia húmeda.
- R : Valor de la resistencia seca.
- X_0 : Valor inicial de la reactancia húmeda.
- X : Valor de la reactancia seca.
- t : Variable de tiempo.
- mi, a, α, β : Constantes.
- V : Voltaje aplicado.

En la expresión (8) se han incluido los términos α, β y $V(t)$, a fin de considerar un efecto observado experimentalmente, consistente en que a mayor voltaje aplicado el secado, es más rápido, o bien, el tiempo de humectación se reduce.

Se desarrollaron programas de cómputo para ajustar matemáticamente el comportamiento experimental de

la resistencia y la reactancia medida en cada una de las secciones del apartarrayos durante pruebas de contaminación. En la figura 5 se presenta el comportamiento de la resistencia superficial de las diferentes secciones del apartarrayos (S1-S8) durante una prueba de contaminación. Obsérvese que la contaminación no es uniforme en las diferentes secciones durante la prueba.

D. Procedimiento de solución

Para resolver las diferentes ecuaciones del modelo de apartarrayos propuesto, se utilizó el paquete computacional ATP y su sección de MODELS. Así, en cada instante de tiempo Δt se estimaron los voltajes en los nodos y las corrientes circulando por las ramas. Posteriormente, en MODELS se estimaron los nuevos valores de las resistencias no-lineales representativas del varistor y la capa de contaminación, las cuales son dependientes del voltaje, temperatura y tiempo.

Asimismo, en MODELS se resolvió el circuito térmico, cuyas entradas son las potencias disipadas en los varistores. Una vez calculadas las nuevas temperaturas en las diferentes secciones del apartarrayos se determinaron los valores de $R(v,T)$, válidos para la siguiente iteración.

De esta manera, los resultados del modelo eléctrico sirven de entrada al modelo térmico, y en el siguiente instante de tiempo, los resultados del modelo térmico se utilizan en el modelo eléctrico y así sucesivamente. Este proceso dinámico de cálculo y actualización se muestra en el diagrama de la figura 6.

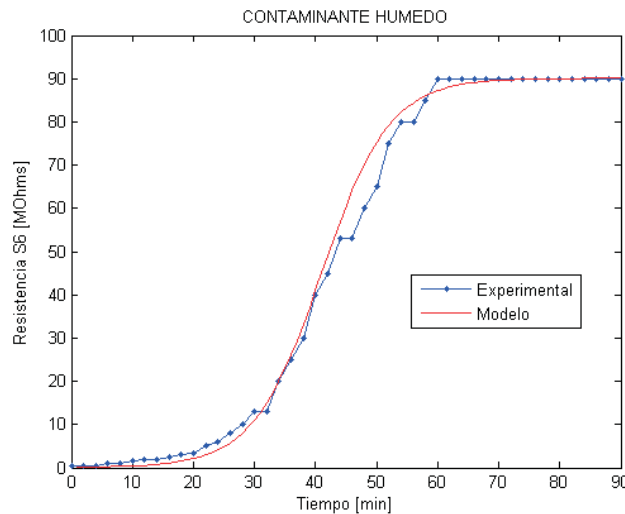


Figura 4. Resistencia superficial medida durante una prueba de contaminación y ajustada

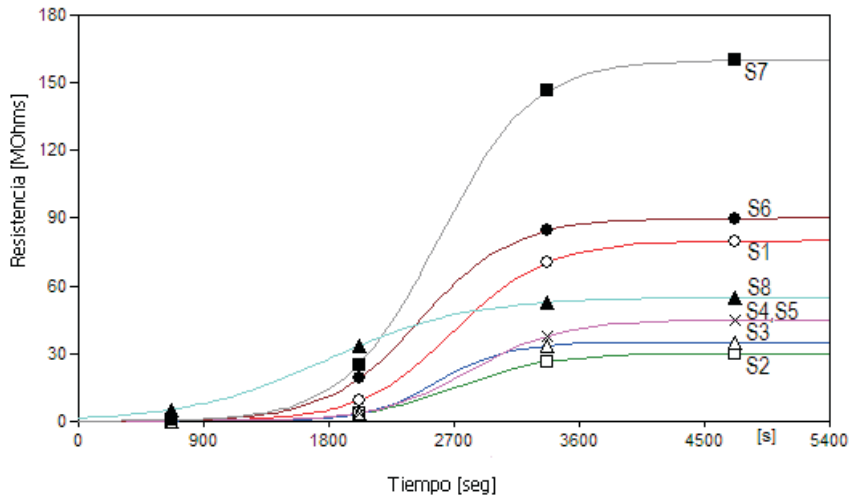


Figura 5. Resistencia superficial en diferentes secciones del apartarrayos durante una prueba de contaminación

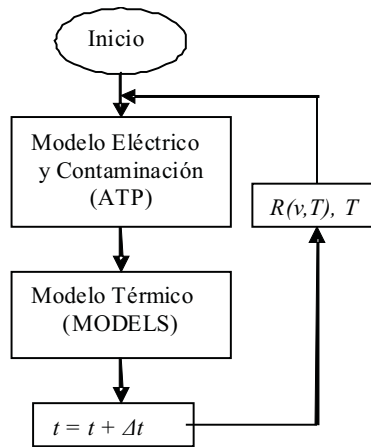


Figura 6. Diagrama flujo del modelo electro-térmico

Resultados obtenidos

A. Pruebas de laboratorio

Para validar el modelo desarrollado se efectuó una prueba de contaminación artificial bajo condiciones controladas y los resultados de temperatura medidos se compararon con las temperaturas calculadas. En este caso, se contaminó solamente la unidad inferior del apartarrayos, dejándose la parte superior sin contaminación, lo cual representa las condiciones más críticas para el apartarrayos.

En la figura 7 se presenta el comportamiento considerado para la resistencia superficial de la capa de contaminación en las diferentes secciones del apartarrayos.

Por otro lado, en la tabla 1 se presentan las temperaturas máximas obtenidas durante la prueba. Las mediciones se efectuaron utilizando bandas térmicas colocadas directamente sobre los varistores, por lo que solamente se registraron las temperaturas máximas en tres secciones de la unidad superior.

De la tabla 1 se observa que el modelo es capaz de predecir la temperatura máxima en los varistores durante la prueba de contaminación. Las temperaturas en la unidad inferior oscilan alrededor de 46 °C. El margen de error estimado es de 5-6%. Obsérvese que las temperaturas más elevadas se localizan en las secciones de varistores que están directamente sobre la banda seca, en este caso, la unidad superior. Las temperaturas calculadas en las diferentes secciones de la unidad superior son

las mismas porque se considera la misma variación de la resistencia superficial en la columna de apartarrayos, (figura 7).

B. Reproducción de pruebas de laboratorio

En esta sección se presenta la simulación de una prueba de contaminación utilizando el modelo de apartarrayos completo y una impedancia dinámica para simular la resistencia superficial debida a la contaminación. En la figura 5 se presentaron las curvas de resistencia superficial de las diferentes secciones del apartarrayos ajustadas computacionalmente, por medio de la función sigmoide, las cuales se utilizaron para simular la prueba. En general, se observa que durante la prueba, la resistencia superficial de las secciones se comporta de manera diferente en cada sección. Con base a este comportamiento de la resistencia superficial, se estimaron voltajes, corrientes y temperaturas en las diferentes secciones en las que se dividió el apartarrayos, los cuales se presentan a continuación.

En la figura 8 se presentan las tensiones estimadas en la porcelana. Obsérvese que en la parte externa de la sección 8 se presenta prácticamente la mayor parte de la tensión aplicada al apartarrayos, y en el resto de las secciones la magnitud de tensión es más pequeña. Esto se explica por el hecho de que la sección 8 presenta una banda seca prácticamente desde el inicio de la prueba (figura 5).

En la figura 9 se presentan las tensiones internas entre las secciones de varistores. En este caso, la sección 8 alcanza una tensión máxima de 44 kV, mientras que en las secciones inferiores la diferencia de potencial a través de los varistores es más pequeña.

Se efectuaron varios estudios modificando los diferentes parámetros de diseño y construcción del apartarrayos, a fin de evaluar su impacto en el incremento de temperatura del mismo durante una prueba de contaminación. A continuación se presentan los resultados más importantes.

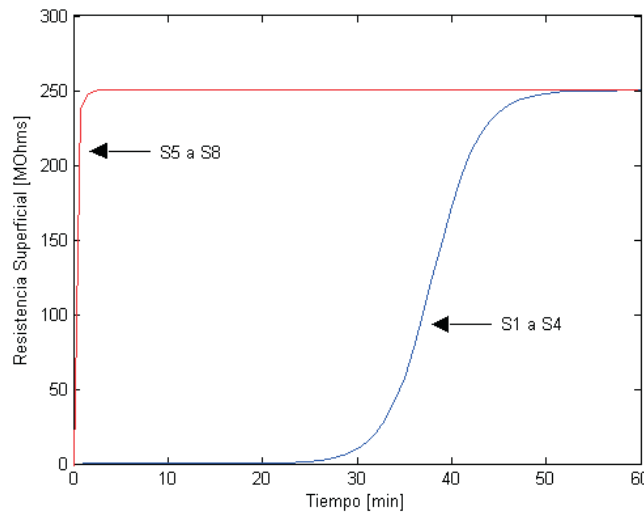


Figura 7. Comportamiento de la resistencia superficial

Tabla 1. Temperaturas máximas medidas y calculadas

| Sección | Temperatura (medida) | Temperatura (calculada) | ΔT | % Error |
|---------|----------------------|-------------------------|------------|---------|
| 8 | 132 °C | 124.19 °C | 7.81 | 5.9 |
| 7 | 127 °C | 124.19 °C | 2.81 | 2.2 |
| 6 | 121 °C | 124.19 °C | -3.1 | 2.5 |

En la figura 10 se presentan las corrientes internas de las secciones de varistores 8 y 3. Se observa que en la sección 8 se presenta la corriente máxima de 28 mA. Después de los 10 minutos, esta corriente disminuye y se estabiliza. La corriente máxima de la sección 3 es de 1 mA. Como se puede observar, gran parte de la corriente circula por la unidad superior, teniendo por consecuencia que los varistores de esta zona incrementen su temperatura, mientras que en la unidad inferior las corrientes son más pequeñas y las secciones de varistores casi no presentan cambio de temperaturas.

Finalmente, en la figura 11 se muestran las temperaturas de las diferentes secciones del apartarrayos durante la prueba de contaminación.

De la figura se observa que las temperaturas alcanzadas en las secciones superiores es del orden de $T = 46\text{ }^{\circ}\text{C}$. Esto se explica por el hecho de que los varistores de la unidad superior se encuentran frente a las bandas secas y experimentan una diferencia de potencial mayor que aquellos que se encuentran frente al contaminante húmedo.

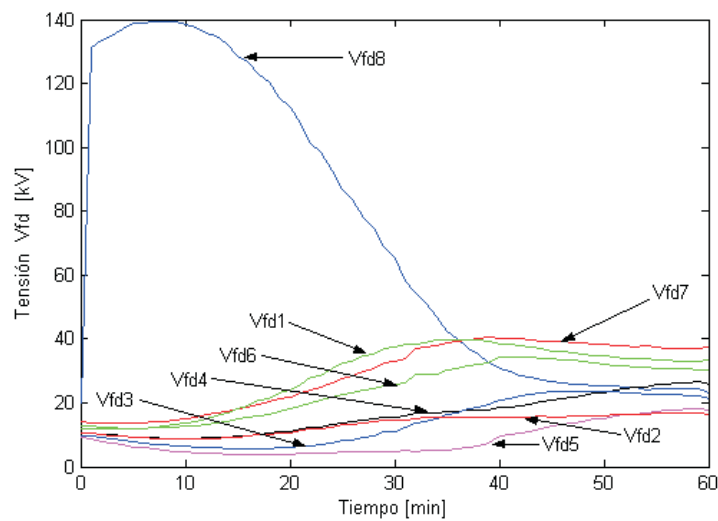


Figura 8. Distribución de tensión en la porcelana del apartarrayos

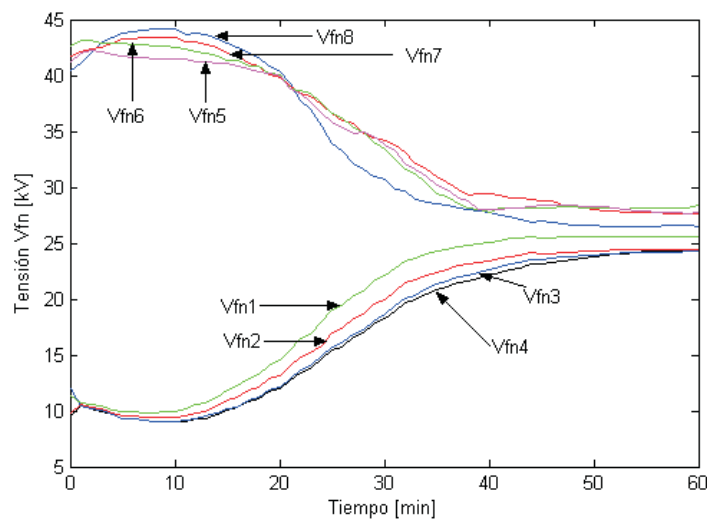


Figura 9. Distribución de tensión en las secciones de varistores del apartarrayos

C. Análisis de sensibilidad

Se analizó primeramente el efecto de la capacitancia de acoplamiento entre las dos redes en escalera. El intervalo de variación de la capacitancia de acoplamiento fue de 50-130 pF. Este es el intervalo en el que puede variar la capacitancia, considerando el espacio entre la columna de varistores y la pared interna de la porcelana. El análisis del comportamiento se realizó considerando varios parámetros de crecimiento de la resistencia superficial y asumiendo que la parte externa de la sección 1

(S1) se seca primero que las demás secciones. En la figura 12 se presentan los resultados de estas simulaciones y en general, se puede establecer que al aumentar la capacitancia de acoplamiento se incrementa la temperatura.

Con propósitos ilustrativos, se efectuaron simulaciones considerando una variación en la magnitud de la conductividad térmica λ . Las conductividades térmicas empleadas fueron $\lambda = 1.16$ y 0.6 . Con el cambio de este parámetro se modifican los parámetros del circuito térmico del apartarrayos. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 13. Como fue de esperarse, se

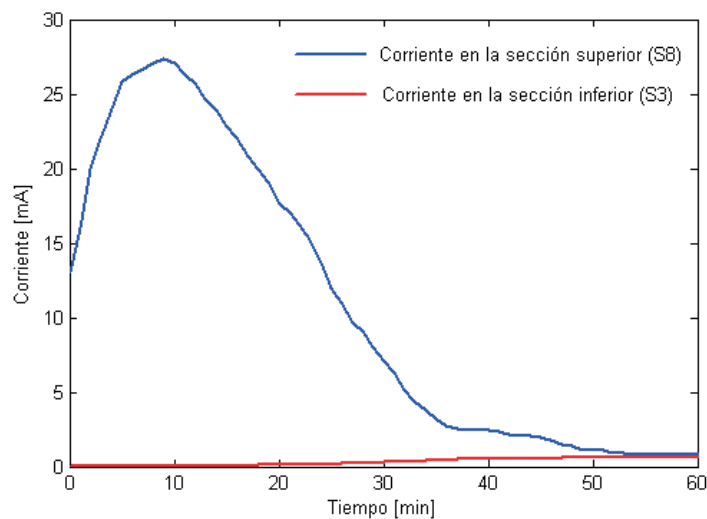


Figura 10. Distribución de corrientes en las secciones 3 y 8 del apartarrayos

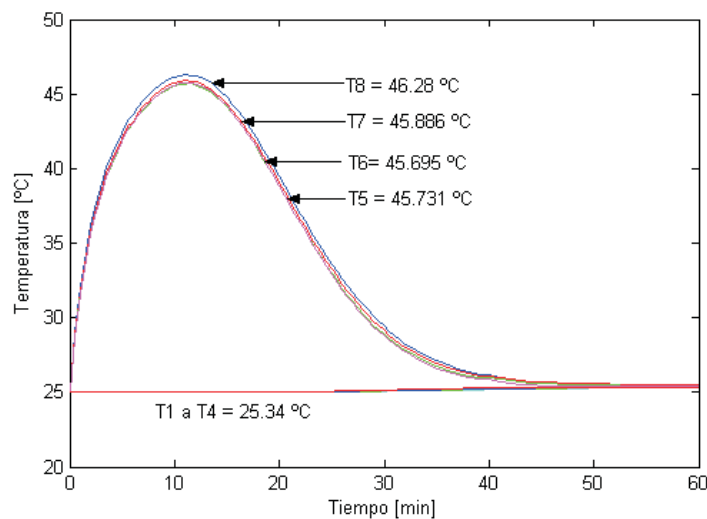


Figura 11. Temperaturas en las diferentes secciones

observa una fuerte influencia de la conductividad térmica del varistor en la temperatura del apartarrayos, aunque también cabe mencionar que el cambio en la conductividad térmica es significativo.

Se evaluó también el impacto de considerar una tensión mayor durante la prueba de contaminación. Para efectuar este estudio se consideraron varios valores de sobretensión aplicada (p.u.). Los resultados obtenidos se presentan en la figura 14. Como es de esperarse, también se observa un incremento de temperatura en los varistores para mayores tensiones de prueba.

Conclusiones

Se ha presentado un modelo computacional para el apartarrayos de ZnO durante pruebas de contaminación en laboratorio. El modelo está integrado por tres sub-modelos que al interactuar armónicamente permiten obtener las temperaturas en los varistores durante la prueba, así como diversas variables eléctricas en función del tiempo. El modelo se validó con una prueba de contaminación controlada, obteniéndose un margen de error en la estimación de la temperatura del 5-6 %, el

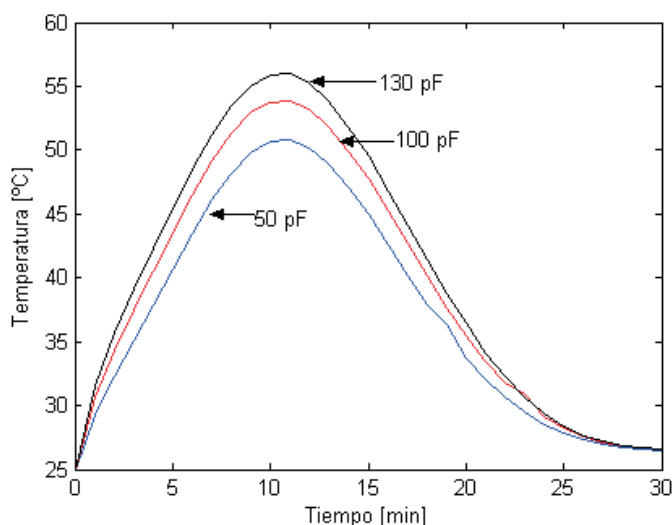


Figura 12. Variación de temperaturas para diferentes capacitancias de acoplamiento

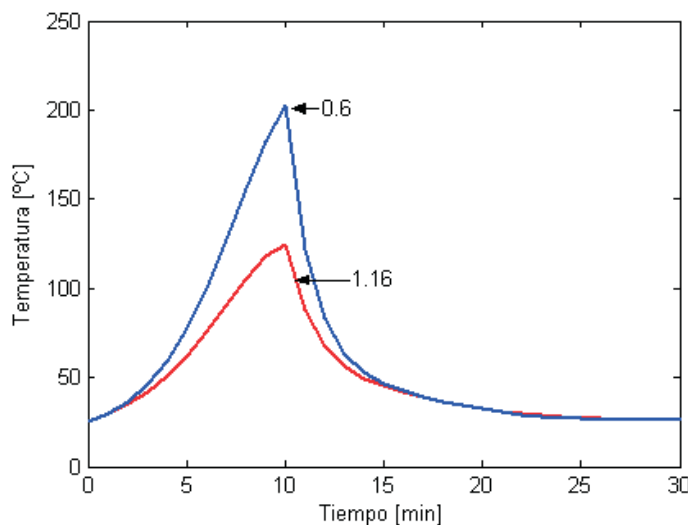


Figura 13. Comparación de temperaturas resultantes de modificar la conductividad térmica

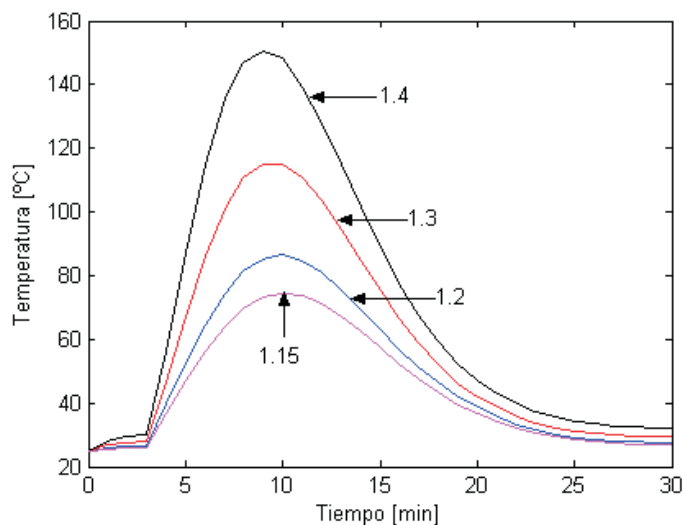


Figura 14. Comparación de las curvas de temperaturas para cada sobretensión simulada

cual se considera aceptable. Con base al modelo desarrollado se efectuaron diversos estudios para estimar qué parámetros tienen un impacto importante en la temperatura del apartarrayos durante la prueba de contaminación. Se determinó que la capacitancia de acoplamiento, la conductividad térmica de los varistores y la tensión de prueba influyen de manera importante en las temperaturas finales.

Agradecimientos

Los autores expresan su reconocimiento a la Dirección General de Educación Superior Tecnológica (DGEST) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado para la realización de estos estudios.

Referencias

- Bargigia A., Mazza G., Le Roy G., Rousseau A. y Sparrow L. Behaviour of Metal Oxide Surge Arrester Under Different Environmental Conditions. En: CIGRE Session, Paris France, 1998, Paper 33-14.
- Chapra S.C., Canales R.P. *Métodos numéricos para ingenieros*. McGraw-Hill Interamericana. 1999.
- Feser K., Kohler W., Qiu D., Chrzan K. Behaviour of Zinc Oxide Surge Arresters Under Pollution. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 6. April 1991.
- Hinrichsen V., Peiser R. Simulation of the AC Performance of Gapless ZnO Arresters. Proceedings of the 5th International

Symposium on High Voltage Engineering, 1987, Paper 82.09, Braunschweig, Germany. *IEEE Standard for Metal Oxide Surge Arresters for Alternating Current Power Circuits*. ANSI Standard C62.11-1993.

- Lat M.V. Analytical Method for Performance Prediction of Metal Oxide Surge Arresters. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 104(10). 1985.
- Moreno M. Simulación del comportamiento electro-térmico de apartarrayos de ZnO bajo contaminación. Tesis (Doctorado). Instituto Tecnológico de Morelia. Junio 2003.
- Naito K., Mizuno Y., Murasige K. Behavior of Two Units Stacked Arrester Under Contaminated and Wet Conditions. Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering, July 1997, Matsue, Japan.
- Reference Manual 1997. *Transforms & Regressions for Windows*. Chapter 3. Sigma Plot. 1997.
- Swalin V., Richard A. *Thermodynamics of Solids*. New York. John Wiley & Sons. 1972.
- Vitet S., Stenstrom L., Lundquist J. Thermal Stress on ZnO Surge Arresters in Pollution Conditions. Parts I and II. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7(4):432-442 y 443-451. October 1992.

Semblanza de los autores

José Leonardo Guardado-Zavala. Se graduó como ingeniero electricista en la UMSNH en 1982. Ingresó al Instituto de Investigaciones Eléctricas en 1983, trabajando en líneas de transmisión, equipos eléctricos y transitorios electromagnéticos. Realizó estudios de maestría (1986) y doctorado (1990) en UMIST Inglaterra. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI) desde 1990. Senior Member en el IEEE desde 2004. Actualmente es profesor investigador en el Instituto Tecnológico de Morelia.

Marcos Moreno-Barraza †. Ingeniero electricista (1970), estudios de maestría (1977) y doctorado en ingeniería eléctrica (2003) por el Instituto Tecnológico de Morelia. Trabajó durante 30 años en la Comisión Federal de Electricidad (CFE), fue miembro del SC33 Insulation Coordination de la CIGRE. Ha sido profesor de alta tensión en el Instituto Politécnico Nacional (IPN) y la Universidad de Guanajuato, así como del Instituto Tecnológico Superior de Irapuato. Actualmente es profesor de tiempo parcial FIMEE 2007. Sus áreas de interés son la prueba de equipos eléctricos, ingeniería de alta tensión y fenómenos transitorios.

Horacio Zazueta-Peña. Realizó estudios de ingeniería eléctrica en el Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON), graduándose en el 2005. Realizó estudios de maestría en ingeniería eléctrica en el Programa de Graduados e Investigación en Ingeniería Eléctrica del Instituto Tecnológico de Morelia (ITM), obteniendo el grado en el 2007 con la especialidad en sistemas eléctricos de potencia.

Vicente Venegas-Rebollar. Realizó estudios de ingeniería eléctrica en el Instituto Tecnológico de Morelia (ITM), recibiendo su título en 1992. También, obtuvo el grado de maestro en ciencias en 1996, por parte del ITM. Realizó sus estudios de doctorado en la SEPI-ESIME del IPN (2004). Actualmente es profesor-investigador en el programa de graduados e investigación en ingeniería eléctrica del Instituto Tecnológico de Morelia y miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Sus áreas de interés son transitorios electromagnéticos y técnicas de elemento finito aplicadas al análisis de equipo eléctrico.

Enrique Melgoza-Vázquez. Realizó estudios de ingeniería industrial en eléctrica y maestría en ciencias en ingeniería eléctrica (1996), en el Instituto Tecnológico de Morelia, México. Asimismo, obtuvo el doctorado en la Universidad de Bath (2002), Reino Unido. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Sus áreas de interés son el cálculo de campo electromagnético aplicado a máquinas eléctricas y fenómenos transitorios.