

Modelo Dinámico del Comportamiento de Electro-Térmico de Apartarrayos de Óxido de Zinc (ZnO)

A Dynamic Electro-Thermal Model for Zinc Oxide (ZnO) Surge Arresters

J. Leonardo Guardado Zavala, Marcelino Valladares García y Claudio R. Fuerte Esquivel

Instituto Tecnológico de Morelia, Programa de Graduados e Investigación en Ingeniería Eléctrica
Av. Tecnológico 1500 Col. Lomas de Santiaguito CP. 58120
Morelia, Mich. México
E-mail: lguarda@prodigy.net.mx

Artículo recibido en Junio 21, 2001; aceptado en Febrero 19, 2002

Resumen

Se presenta un modelo dinámico para el análisis del comportamiento electro-térmico de los apartarrayos de óxido de Zinc (ZnO). El modelo considera la dependencia de las resistencias eléctricas y capacitancias térmicas con la temperatura y el voltaje. La dinámica del modelo se basa en resolver el circuito térmico a partir de la potencia disipada en el circuito eléctrico. La metodología desarrollada es útil para propósitos de coordinación de aislamiento en sistemas de potencia y distribución, donde se requiere determinar los esfuerzos eléctricos y térmicos en los apartarrayos de ZnO durante la ocurrencia de sobretensiones de larga duración. Las temperaturas obtenidas en los elementos no-lineales y en la cubierta del apartarrayos se compararon con mediciones, obteniéndose resultados satisfactorios.

Palabras Clave: Apartarrayos de ZnO, Sobretensiones Temporales, Modelo Electro-térmico, Parámetros Eléctricos de Apartarrayos de ZnO, Técnicas de Modelado.

Abstract

This paper presents a dynamic model for the analysis of the electro-thermal performance of Zinc Oxide arresters (ZnO).

The model takes into account the dependence of the electrical resistance and thermal capacitance with voltage and temperature. The solution technique is based on solving a thermal circuit by considering the dissipated power in the electric circuit. The modeling techniques developed in the paper are useful for insulation coordination on power and distribution systems, where electrical and thermal stresses are required during temporary overvoltages. Calculated temperatures for the varistors and porcelain housing are compared with measurements, good agreement is obtained.

Keywords: Zinc Oxide arresters (ZnO), Temporary overvoltages, electro-thermal model, electrical parameters for ZnO arrester, modeling techniques.

1 Introducción

Los apartarrayos de ZnO son dispositivos de protección utilizados en sistemas eléctricos de potencia y distribución.

Su función es limitar las sobretensiones a valores que no pongan en peligro el aislamiento de equipos costosos como transformadores de potencia, generadores, etc. Durante la presencia de sobretensiones en el sistema, el apartarrayos se encuentra sujeto a severos esfuerzos eléctricos y térmicos.

Esto se debe a que el dispositivo drena corriente, la cual disipa energía en los varistores conectados en cascada. La severidad de los esfuerzos electro-térmicos depende de factores como la magnitud y duración de la sobretensión, las características de diseño y construcción del apartarrayos, así como de las condiciones de operación del dispositivo al momento de la sobretensión.

La energía disipada en la columna de varistores incrementa la temperatura interna del apartarrayos. Si la energía disipada es mayor que la liberada al exterior, se presenta un incremento constante de temperatura el cual conduce al colapso térmico del dispositivo (Mizuno *et al.* 1981). Al fallar el apartarrayos se deja desprotegido equipo eléctrico costoso ante posteriores sobretensiones.

El colapso térmico en los apartarrayos de ZnO se puede presentar durante condiciones adiabáticas causadas por sobretensiones de corta duración, descargas atmosféricas por ejemplo, o bien durante condiciones no-adiabáticas originadas por sobretensiones temporales. En este último caso suele suceder que una sobretensión de poca magnitud, pero de larga duración, conduzca a la falla del dispositivo (St. Jean *et al.* 1990). Los casos típicos de sobretensiones de larga duración en los sistemas eléctricos de potencia y distribución son ferresonancia, acoplamiento entre líneas paralelas, energización de transformadores e inicio y eliminación de fallas. Los dos primeros casos pueden ser de carácter permanente en el sistema eléctrico (Gert *et al.* 1972, Clerici *et al.* 1990). En la Figura 1 se presenta el sobrevoltaje originado durante una condición de

ferroresonancia. En la Figura 1 se observa también la distorsión armónica de la forma de onda.

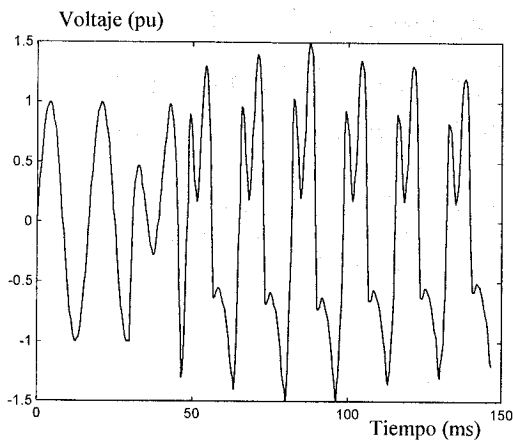


Figura 1. Sobretensión originada por ferroresonancia

Para estudiar el comportamiento del apartarrayos durante sobretensiones de larga duración se requiere contar con un modelo electro-térmico del dispositivo. Este modelo se conceptualiza como una interrelación dinámica entre las variables eléctricas y térmicas. La parte eléctrica del modelo determina la potencia disipada en los varistores durante la sobretensión. Por otro lado, la componente térmica del modelo determina la temperatura en el apartarrayos a partir de la potencia disipada en el circuito eléctrico. Así, la interacción armónica de ambos modelos permite calcular los esfuerzos térmicos al interior apartarrayos, a partir de fenómenos eléctricos presentes en el sistema de potencia.

A la fecha, se han propuesto varios modelos (Lat 1985, Hinrichsen 1987, Petit *et al* 1991) para estudiar el comportamiento electro-térmico de los apartarrayos de ZnO. Sin embargo, estos modelos no consideran la variación continua de los parámetros térmicos de los varistores en función de la temperatura. Además, se desarrollaron para voltajes sinusoidales, típicos de pruebas de laboratorio, los cuales no se presentan normalmente en los sistemas eléctricos de potencia durante condiciones transitorias, ver Figura 1.

En este trabajo se pretende desarrollar un modelo electro-térmico del apartarrayos sin las limitantes mencionadas líneas arriba. Se decidió utilizar técnicas de análisis en el dominio del tiempo debido a las facilidades que presentan para incorporar elementos no lineales. Se considera también que esto facilita el estudio del comportamiento del dispositivo con relación a la dinámica existente en el sistema eléctrico de potencia, lo cual es útil para trabajos futuros.

2 Modelo Eléctrico

El modelo eléctrico de un varistor de apartarrayos de ZnO está integrado por una resistencia y una capacitancia, Figura

2. En el caso de varios varistores conectados en serie, se obtiene una red en cascada. Tanto la resistencia como la capacitancia son dependientes del voltaje y la temperatura. Para determinar su valor en un instante determinado se requiere efectuar mediciones (Hinrichsen 1987), o bien utilizar las curvas voltaje-corriente del varistor.

2.1 Curvas V-I

Las curvas V-I determinan la relación entre el voltaje y la corriente en terminales del varistor. En la Figura 3 se presenta la curva V-I medida en un varistor. La curva se divide en las regiones de baja, media y alta corriente, identificadas con los números I, II y III respectivamente.

El voltaje en la región de baja corriente corresponde a valores típicos de sobretensiones de larga duración presentes en los sistemas eléctricos (1.4-1.8 p.u). Por otro lado, se observa en la Figura 3 que la curva V-I en esta región es fuertemente dependiente de la temperatura.

Cuanto mayor sea la temperatura del varistor, mayor será la corriente circulando y la potencia disipada en el dispositivo. La región de baja corriente se describe adecuadamente mediante cinco curvas V-I obtenidas a diferentes temperaturas. Las curvas se obtienen, para una temperatura dada, aplicando un voltaje al varistor y midiendo su corriente.

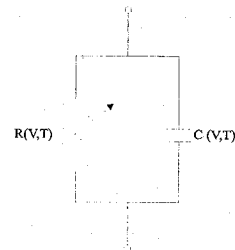


Figura 2. Modelo eléctrico del varistor de ZnO

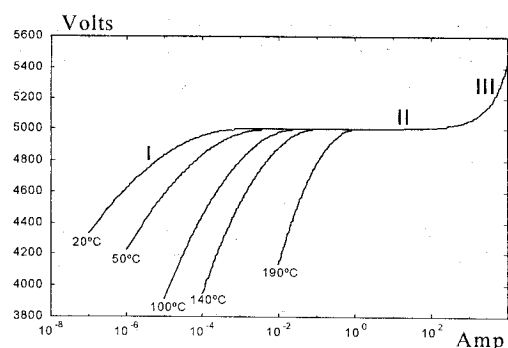


Figura 3. Característica voltaje-corriente de un varistor de ZnO

2.2 Parámetros Eléctricos

Para propósitos de modelado se requiere conocer el comportamiento dinámico de la resistencia no-lineal de la Figura 2. Dado que las curvas V-I se obtuvieron a partir de mediciones discretas a diferentes temperaturas, su manejo computacional se simplifica aproximándolas, en la región

de baja corriente ($10^{-8} - 10^0$ A) por un polinomio de la forma (Nishiwaki *et al.* 1984):

$$V = A (\ln(i) + BT + C)^2 + D \quad (1)$$

La expresión (1) describe la relación no-lineal existente entre el voltaje y la corriente en el varistor. Para incluir su dependencia con la temperatura se utilizaron cinco curvas representativas en el rango de 20-190 °C. Los parámetros de los polinomios representativos de cada curva se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1.- Coeficientes del polinomio (1) a varias temperaturas

T	A	B	C	D
20 °C	-6500	-0.0048	7.139	271000
70 °C	-5000	-0.0112	7.139	272500
110 °C	-3150	-0.0237	9.739	180000
150 °C	-2000	-0.0315	9.739	180000
190 °C	-1500	-0.0396	9.739	180000

En la Figura 4 se presenta la resistencia medida (V/I) a tensiones discretas y la calculada con el procedimiento descrito líneas arriba. En general, se observa que a bajos voltajes la resistencia del varistor se incrementa, y viceversa, a tensiones elevadas la resistencia disminuye. La comparación entre resultados medidos y calculados se considera aceptable. En la Figura 5 se presenta la dependencia de la resistencia con la temperatura. A mayores temperaturas la resistencia del varistor disminuye significativamente. Por otro lado, en la Figura 6 se presenta el comportamiento de la capacitancia en función del voltaje aplicado. Se observa que la capacitancia se mantiene más o menos constante en el rango del voltaje de interés (Hinrichsen 1987). Su magnitud es del orden de 1 nF, el cual se utilizó en las simulaciones de este trabajo.

2.3 Interpolación

Durante el proceso de cálculo se requiere conocer la resistencia y la corriente circulando por el varistor a un voltaje dado y una temperatura intermedia entre dos curvas.

De las características de la curva V-I, se ha encontrado experimentalmente que la potencia disipada a una temperatura determinada es de la forma (Lat 1985):

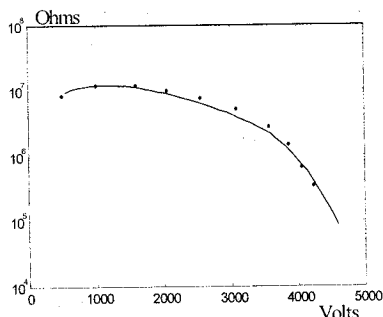


Figura 4.- Resistencia medida y calculada a 20 °C

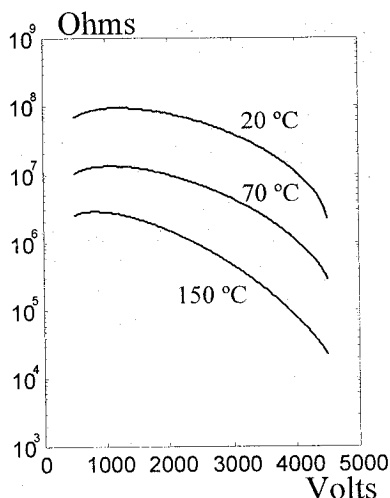


Figura 5. Dependencia de la resistencia con la temperatura

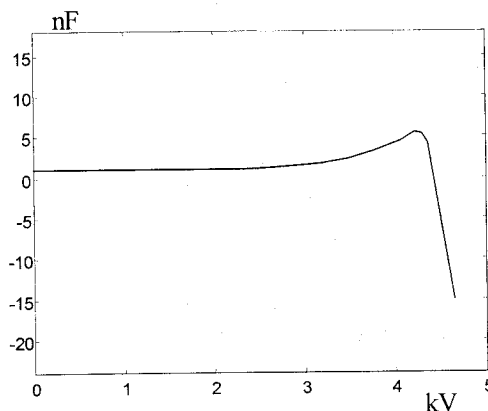


Figura 6. Capacitancia en función del voltaje

$$P = \beta e^{\gamma V} \quad (2)$$

donde :

P.- Potencia disipada en el varistor (V-I)

V .- Voltaje aplicado

β, γ .- Constantes obtenidas a partir de los puntos que se interpolan.

Por otro lado, si se desea determinar la corriente a una temperatura intermedia entre dos curvas V-I, se requiere efectuar una interpolación entre las dos curvas a diferentes temperaturas. Esto se lleva a cabo con la expresión:

$$P = \phi e^{\lambda T} \quad (3)$$

donde:

P .- Potencia disipada en el varistor (V-I)

T .- Temperatura del varistor

ϕ, λ .-Constantes obtenidas a partir de las curvas que se interpolan.

La Figura 7 muestra gráficamente la utilización de las ecuaciones (2) y (3) para el cálculo de corriente, la resistencia y la potencia disipada a una temperatura intermedia. Los puntos "a" y "b" representan dos puntos conocidos a una temperatura T1. Los puntos "c" y "d" son también conocidos, pero a la temperatura T2. Los cuatro puntos se obtienen del polinomio correspondiente a cada temperatura.

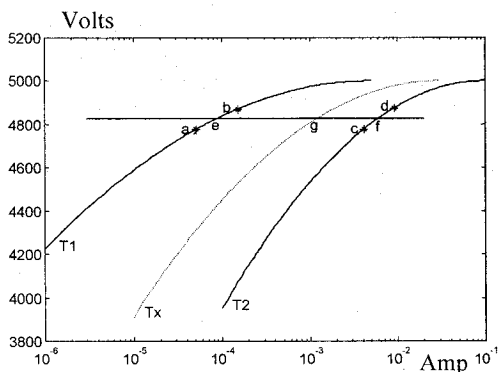


Figura 7. Interpolación de las curvas V-I para el cálculo de corrientes a temperaturas intermedias

Aplicando la ecuación (2), se calcula la corriente para cualquier voltaje comprendido entre los puntos "a" y "b". El procedimiento se repite para calcular la corriente a cualquier voltaje comprendido entre los puntos "c" y "d", pero ahora a la temperatura T2. Los valores de β y γ se obtienen resolviendo un par de ecuaciones simultáneas con los datos de voltaje y corriente conocidos en los puntos "a" y "b".

El procedimiento descrito permite determinar la corriente y la potencia en los puntos "e" y "f". Una vez conocidas las potencias en los puntos "e" y "f", se aplica la ecuación (3) para conocer la corriente en el punto "g" a una temperatura desconocida Tx, comprendida entre las temperaturas T1 y T2. Los valores de los parámetros ϕ y λ se calculan siguiendo un procedimiento similar al utilizado para determinar β y γ . El procedimiento descrito se efectúa para cada cambio de voltaje, es decir en cada Δt del circuito eléctrico. Una vez conocidas las corrientes, se calcula la potencia disipada y la resistencia.

3 Modelo Térmico

Si se considera que la dirección del flujo de calor en el apartarrayos es radial (Lat 1983), entonces la temperatura en el elemento y la cubierta se calculan por medio del

circuito de la Figura 8. Este circuito modela el proceso físico de disipación de calor en el apartarrayos, siendo válido tanto para condiciones de estado estable como transitorias.

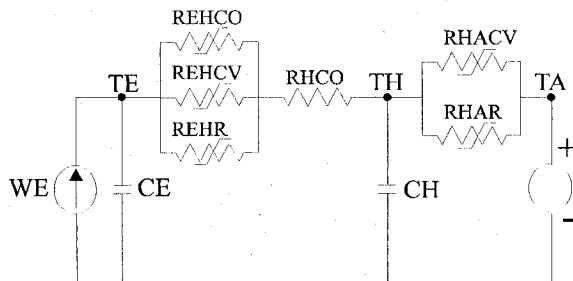


Figura 8. Modelo térmico del apartarrayos considerando un flujo de calor en la dirección radial

En la Figura 8, CE y CH representan la capacitancia térmica del varistor y la cubierta respectivamente. REHCO, REHCV y REHR representan las resistencias de conducción, convección y radiación entre el varistor y la cubierta. RHCO representa la resistencia térmica de la cubierta externa del apartarrayos. RHAR y RHACV son las resistencias térmicas por radiación y convección entre la cubierta y el medio ambiente. TA, TE y TH representan las temperaturas del ambiente, el varistor y la cubierta respectivamente. WE representa la potencia aplicada al modelo térmico, la cual se obtiene del circuito eléctrico. La analogía del voltaje y la corriente con la temperatura y el flujo de calor es evidente. Por consiguiente, las unidades de la resistencia térmica están en $^{\circ}\text{C}/\text{watt}$ y las capacitancias térmicas en $\text{joule}/^{\circ}\text{C}$.

3.1 Parámetros Térmicos

Los valores de las resistencias térmicas dependen de la trayectoria seguida por el flujo de calor y los materiales involucrados. En el aire, la transferencia de calor se realiza por radiación, conducción y convección. En materiales sólidos como la porcelana de la cubierta, el calor se transfiere por conducción.

La transferencia de calor por radiación utiliza la ecuación de Stefan-Boltzman, con la constante $K=5.72 \times 10^{12}$ y emisividades del varistor y la cubierta de 0.9 y 0.95 respectivamente. Así, las resistencias térmicas están dadas por (Lat 1983):

$$R_{EHR} = \frac{T_E - T_{HI}}{\epsilon_{EH} K (T_E^4 - T_{HI}^4) \pi D_E h} \quad (4)$$

$$R_{HAR} = \frac{T_H - T_A}{\epsilon_H K (T_H^4 - T_A^4) D_{\max} h \pi} \quad (5)$$

ϵ_{EH} es la emisividad equivalente entre el varistor y la cubierta (0.859296).

La transferencia de calor por conducción se obtiene a partir de las expresiones para transmisión de calor en secciones transversales uniformes y no uniformes. Las expresiones correspondientes son:

$$R_{EHCO} = \frac{D_{HIN} - D_E}{\lambda_A \pi (D_{HIN} + D_E) h} \quad (6)$$

$$R_{HCO} = \frac{\ln\left(\frac{D_{HOA}}{D_{HIN}}\right)}{2 \lambda_H \pi h} \quad (7)$$

donde λ_A es la conductividad térmica del aire (0.00026) y λ_H es la conductividad térmica de la cubierta (0.01).

La transferencia de calor por convección natural es un fenómeno complejo que depende de los parámetros físicos del medio de transferencia, en este caso el aire. Las expresiones correspondientes son:

$$R_{EHCV} = \frac{1}{2.3 \times 10^{-4} (T_E - T_H)^{0.25} \pi D_E h} \quad (8)$$

$$R_{HACV} = \frac{1}{2.3 \times 10^{-4} (T_H - T_A)^{0.25} \pi D_{HOA} h \phi} \quad (9)$$

Los datos geométricos para las ecuaciones (4) - (9) se tiene:

- h .- Altura del varistor.
- D_E .- Diámetro del varistor.
- D_{HIN} .- Diámetro medio interior de la cubierta.
- D_{HOA} .- Diámetro medio exterior de la cubierta.
- R_E .- Número de Reynolds.
- C, P .- Constantes empíricas
- VA .- Velocidad del aire en km/hr.

para $100 < R_E < 5000$ $P = 0.485$, $C = 0.55$
 para $5000 < R_E < 50000$ $P = 0.65$, $C = 0$.

Para modelar el comportamiento transitorio del apartarrayos se requiere considerar las capacitancias térmicas. Estas representan la cantidad de energía almacenada en el varistor y la cubierta. La capacitancia térmica es una propiedad física del material y depende de la masa total y la temperatura. La capacidad calorífica (C_c) se determina por:

$$C_c = V_c \cdot (C_0 + \alpha_c T) \quad J/^\circ C \quad (10)$$

Donde V_c es el volumen del dispositivo, T es la temperatura, C_0 el calor específico y α_c es el coeficiente de temperatura del calor específico. Los valores recomendados en la literatura (Lat 1983) para los diferentes componentes de son:

$$C_0 = 2.59 \quad J / (^\circ C - cm^3) \quad \text{para el varistor}$$

$$C_0 = 1.58 \quad J / (^\circ C - cm^3) \quad \text{para la cubierta}$$

$$\alpha_c = 0.0044 \quad J / (^\circ C^2 - cm^3) \quad \text{para el varistor}$$

$$\alpha_c = 0.0027 \quad J / (^\circ C^2 - cm^3) \quad \text{para la cubierta}$$

4 Modelo Dinámico Electro-Térmico

Los modelos eléctrico y térmico se complementan a fin de determinar los esfuerzos electro-térmicos en el apartarrayos. El algoritmo utilizado se presenta gráficamente en a Figura 9, y se desarrolló utilizando el lenguaje de programación MODELS del paquete ATP (Alternative Transient Program). El algoritmo se describe a continuación:

Con la temperatura inicial se determinan los valores de las resistencias y capacitancias térmicas y eléctricas. Para una excitación dada, una sobretensión temporal por ejemplo, se resuelve el circuito eléctrico representado por el circuito equivalente de los varistores, Figura 2. Las variables a determinar son los voltajes, corrientes y potencias disipadas en cada uno de los varistores.

La potencia disipada en el circuito eléctrico se aplica al circuito térmico. Para determinar las temperaturas en el elemento no-lineal y la cubierta, se resuelve un sistema de dos ecuaciones diferenciales.

Con la nueva temperatura del elemento, se utilizan las curvas V-I para obtener los nuevos valores de las resistencias eléctricas no-lineales. En esta parte del proceso normalmente se requiere efectuar una interpolación entre dos curvas de temperatura. También se determinan los nuevos valores de las resistencias térmicas. Finalmente, si la temperatura es mayor de $180^\circ C$ el proceso de cálculo finaliza. En su defecto, el tiempo de simulación se incrementa en Δt , lo cual implica que el nuevo voltaje de excitación se modifica.

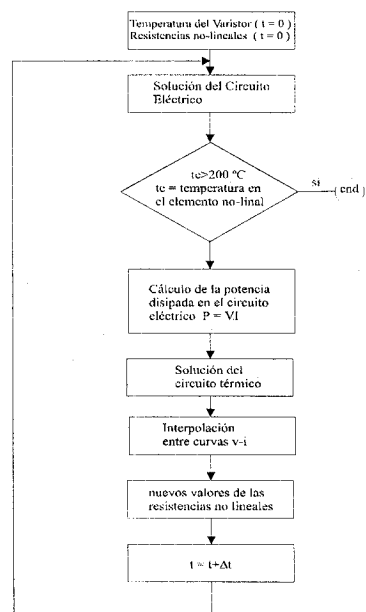


Figura 9. Algoritmo de cálculo del modelo electro-térmico del apartarrayos de ZnO

Para validar el modelo se efectuó una comparación entre resultados publicados en la literatura y los calculados para un apartarrayos de distribución típico (Lat 1983), al cual se le aplicó una tensión por varistor de 4250 V. durante 12,000 seg. En la Figura 10 se presenta los resultados medidos para la temperatura en el elemento. Por otro lado, en la Figura 11 se presentan los resultados obtenidos para la parte externa de la cubierta de porcelana. De los resultados presentados en ambas figuras se observa que la metodología propuesta predice de manera aceptable el calentamiento del apartarrayos.

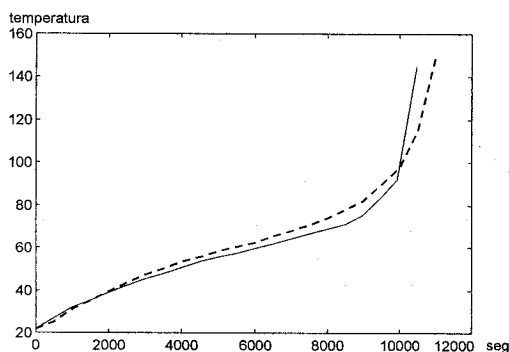


Figura 10. Variación de la temperatura en el varistor.
----- medida _____ calculada

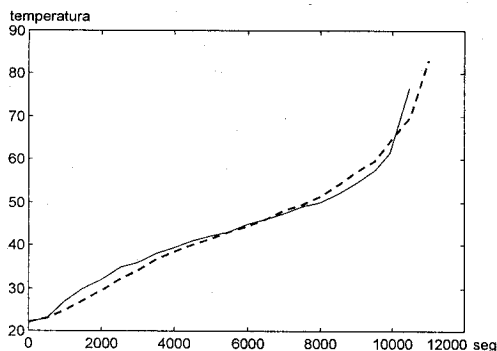


Figura 11. Variación de la temperatura en la cubierta.
----- medida _____ calculada

5 Conclusiones y Trabajos Futuros

Se ha presentado un modelo dinámico para determinar el comportamiento electro-térmico de apartarrayos de ZnO. El modelo está integrado por un circuito eléctrico acoplado a uno térmico. La solución de ambos circuitos permite evaluar los esfuerzos eléctricos y térmicos a que se encuentra sometido el apartarrayos bajo condiciones de operación normal y transitoria.

El análisis presentado toma en consideración la dependencia de los parámetros del varistor con la temperatura y el voltaje, curvas V-I. Las resistencias no-lineales y las capacitancias del modelo térmico también se

consideran dependientes de la temperatura de manera continua. El modelo se utilizó para determinar la temperatura tanto en los varistores como en la cubierta de un apartarrayos de distribución. Los resultados obtenidos muestran una aproximación aceptable.

Una ventaja de la técnica propuesta reside en que se puede aplicar a formas de onda con elevado contenido armónico, típicas de sobretensiones temporales de larga duración en sistemas eléctricos como ferresonancia, acoplamiento entre líneas paralelas, energización de transformadores e inicio y eliminación de fallas. En el futuro se contempla efectuar este tipo de estudios y extender los modelos desarrollados a apartarrayos de nivel transmisión. Para ello se requiere considerar las capacitancias parásitas a tierra, a fin de calcular la distribución de tensiones en la columna de varistores. Esto implica una distribución no uniforme de la potencia disipada en la columna. También se pretende efectuar un análisis de sensibilidad sobre los parámetros determinantes en la magnitud y severidad de las sobretensiones temporales y su impacto en el apartarrayos.

6 Reconocimientos

Los autores desean reconocer el apoyo económico del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) a través del proyecto 28610-A "Análisis de Sobretensiones Temporales en Sistemas Eléctricos de Potencia y su Impacto en Apartarrayos de ZnO".

7 Referencias

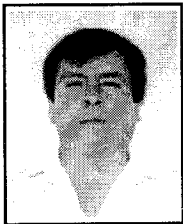
- Clerici A., "Temporary Overvoltages: Causes, Effects and Evaluation", Working Group 33.10, CIGRE 1990 33-210 Report, pp. 1-15.
- Gert R., Glavitsch H., Tikhodeev N. N., Shur S. S., Thoren B. "Temporary Overvoltages Their Classification, Magnitude, Duration, Shape And Frequency of Occurrence", CIGRE 1972, Report 33-12.
- Hinrichsen V., Peiser R., "Simulation of the AC-Performance of Gapless ZnO-Arresters", Fifth International Symposium on High Voltage Engineering, Braunschweig 24-28 August, 1987, Republic of Germany, paper 82.09.
- Lat M. V., "Thermal Properties of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. Pas-102, No. 7, July 1983, pp. 2194-2202.
- Lat M.V., "Analytical Method for Performance Prediction of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 10, October 1985, pp. 2665-2674.
- Mizuno M., Hayashi M., Mitani K., "Thermal Stability and Life of the Gapless Surge Arrester", IEEE,

Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.5, May 1981.

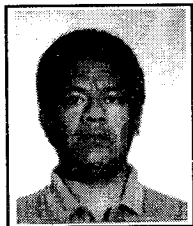
Nishiwaki S., Kimura H., Satoh T., Mizoguchi H., Yanabu S., " Study of Thermal Runaway/Equivalent Prorated Model of a ZnO Surge Arrester ", IEEE, Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-103, No.2, February 1984.

St-Jean G., Petit A., "Metal-Oxide Surge Arrester Operating Limits Defined by a Temperature-Margin Concept", IEEE, Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990, pp 627-633.

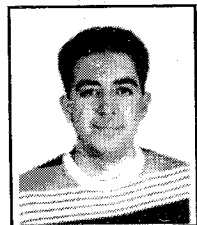
Petit A., Dai Do X., St-Jean G., "An Experimental Method to Determine the Electro-Thermal Model Parameters of Metal Oxide Surge Arresters ", IEEE, Transactions on Power Delivery, Vol.6. No. 2, April 1991, pp. 715- 721.



José Leonardo Guardado Zavala, se graduó de Ingeniero Electricista en la Universidad Michoacana en 1982. Ingresó al Instituto de Investigaciones Eléctricas en 1983, trabajando en líneas de transmisión, equipo eléctrico y transitorios electromagnéticos. Realizó estudios de maestría (1986) y Doctorado (1990) en UMIST Inglaterra. Desde 1993 es profesor-investigador en el Instituto Tecnológico de Morelia.



Marcelino Valladares García, se graduó de Ingeniero Electromecánico en el Instituto Tecnológico de Acapulco en 1983. Realizó estudios de Maestría en el ITESM (1984). Ingresó como docente en el Instituto Tecnológico de Acapulco (1985). Actualmente realiza estudios de Doctorado en el Instituto Tecnológico de Morelia.



Claudio Rubén Fuerte Esquivel, recibió su título de Ingeniero Industrial Electricista del Instituto Tecnológico de Morelia, México, en 1990, su grado de Maestría (Summa Cum Laude) del Instituto Politécnico Nacional, México, in 1993, su grado de doctorado de la University of Glasgow, Scotland, UK en 1997. Desde 1993 es profesor-investigador en el Instituto Tecnológico de Morelia.

