



TRABAJO TEORICO EXPERIMENTAL

Desempeño de modelos de pararrayos de óxido metálico frente a impulsos de corriente

Performance of metal oxide surge arrester models for current impulses

Boris Alba Valle¹
Orestes Hernández Areu¹

¹Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba.
E-mail: borisav@electrica.cujae.edu.cu

Recibido: mayo del 2017 Aprobado: septiembre del 2017

Licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional.



RESUMEN /ABSTRACT

Los pararrayos de óxido de zinc (MOSA) son dispositivos utilizados en la protección contra sobretensiones. Actualmente se han desarrollado modelos matemáticos como herramientas de simulación para un mejor análisis del comportamiento de los MOSA en estudios de coordinación de aislamiento. La literatura especializada reporta problemas de exactitud en las respuestas de estos modelos ante determinadas condiciones de operación. En este trabajo se realizó la evaluación del desempeño de los modelos de Karbalaye y Valsalal frente a diferentes impulsos de corriente. El análisis se hizo mediante la comparación de los valores de parámetros obtenidos con dichos modelos ante un estímulo determinado, con relación a valores reales de los mismos parámetros obtenidos mediante mediciones de laboratorio. Como resultado se identificó como la forma de onda de tensión residual, los valores de energía absorbida y la razón de inclinación inicial de tensión, se desvían de los resultados obtenidos experimentalmente para estos modelos actuales.

Palabras clave: modelos de pararrayo de óxido de zinc, impulsos de corriente.

The metal oxide surge arresters (MOSA) are dispositive used in the protection against surges. Mathematical models like tools of simulation for a better analysis of the behavior of the MOSA in insulation coordination studies have been developed at present. The specialized literature reports some problems of accuracy in the answers of these models for given operating conditions. In this work an evaluation of the performance of Karbalaye and Valsalal models against different current impulses was developed. The analysis was done by comparing the values of the parameters obtained with those models with a given excitation, respect to real values of the same parameters obtained by means of measurements of laboratory. As a result it was noted whose the residual voltage waveform, values of absorbed energy and initial voltage slope rate, stray from the results obtained experimentally for these actual models.

Key words: models of lightning arresters of zinc oxide, current impulses.

INTRODUCCION

Los pararrayos son equipamientos utilizados en la protección de sistemas eléctricos contra descargas atmosféricas o sobretensiones de maniobra. Ellos limitan el nivel de tensión que alcanzan equipamientos importantes, como los transformadores de potencia, evitando que estos se dañen.

Los pararrayos de óxido de zinc (ZnO) están formados por una o dos columnas de varistores. Este componente es el que impone las principales características eléctricas de los mismos. Los varistores se caracterizan por tener una característica de tensión-corriente (V-I) extremadamente no lineal y una alta capacidad de absorción de energía. También presentan una fuerte dependencia con la temperatura para bajos valores de corrientes y una característica dinámica (dependiente de la frecuencia) ante impulsos de corriente atmosféricos u otros con frentes de ondas rápidos. Muchos autores hacen referencia a la característica dinámica de los pararrayos. Se plantea que la tensión entre los terminales del pararrayo (tensión residual) para una determinada amplitud de corriente de descarga se incrementa de 6 a 12 % a medida que el tiempo de cresta de la corriente que circula a través de él disminuye de 8 μ s a 1.3 μ s y el pico de la tensión ocurre antes que el pico de corriente [1].

En la literatura se han reportado algunos problemas como la complejidad en la determinación de determinados parámetros [2-4], así como en la estabilidad numérica en las simulaciones [5-7], la exactitud en los valores de la tensión residual [8-10], y la desviación en la forma de onda de tensión residual obtenida con estos modelos [11-13]. Otros modelos, por ser novedosos, carecen de la validación de otros autores [14-16].

En este trabajo se realiza el análisis del desempeño de algunos modelos de pararrayos de ZnO frente a dos tipos de impulsos de corriente. Se utilizan programas reconocidos como ATP y Matlab® para desarrollar el trabajo. Cada modelo se evalúa comparando los valores simulados y medidos de tensión residual, razón de inclinación inicial de tensión y la energía absorbida por el pararrayos durante la aplicación de impulsos de corriente atmosféricos (forma de onda 8/20 μ s) e impulsos rápidos (tiempo de frente en torno a 1.5 μ s).

MATERIALES Y MÉTODOS

Modelos de pararrayos de óxido de zinc

Modelo convencional

El modelo convencional [7], está formado por una resistencia no lineal (figura 1).



Fig.1. Modelo convencional.

En este modelo no se incorpora la característica dinámica del pararrayo y la de V-I se representa por un número arbitrario de segmentos exponenciales que están sujetos a la ecuación (1).

$$i = p \left(\frac{v}{V_{ref}} \right)^q \quad (1)$$

Donde:

i es la corriente del pararrayos.

V es la tensión del pararrayos.

p, q son constantes del dispositivo.

V_{ref} es la tensión arbitraria que normaliza la ecuación e impide un excedente numérico durante la exponenciación.

Este modelo es sencillo de aplicar, tiene buena exactitud en los valores de tensión residual para impulsos de corriente con tiempos de frentes de 8 μ s pero tiene malos resultados para impulsos de corriente con tiempos de frente rápidos.

Modelo propuesto por la IEEE W. G.

El modelo propuesto por la IEEE Working Group 3.4.11 [1], es dependiente de la frecuencia. En la figura 2, se muestra este.

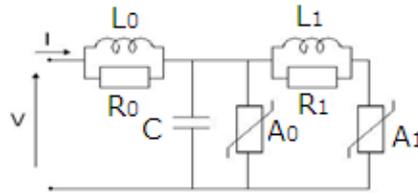
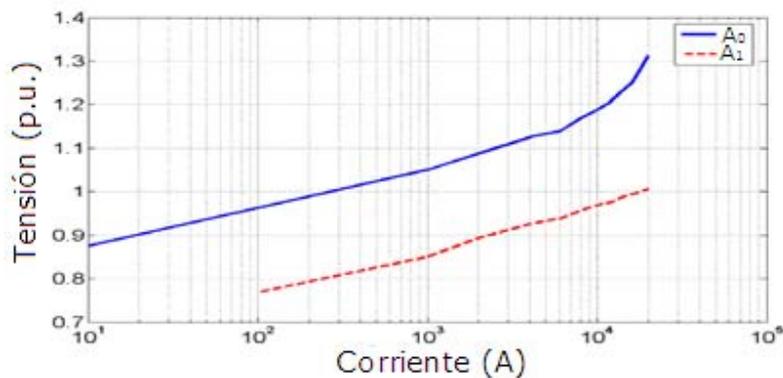


Fig. 2. Modelo propuesto por la IEEE Working Group 3.4.11.

La característica V-I no lineal del pararrayo es representada por dos resistencias no lineales (A_0 y A_1) separadas por un filtro R-L (R_1 y L_1). Los valores de A_0 y A_1 son definidos en las curvas de la figura 3, referidos a una tensión residual para un impulso de corriente de 8/20 μ s y 10 kA. Para sobretensiones lentas, el filtro R-L posee una impedancia pequeña, dejando A_0 y A_1 en paralelo. Para sobretensiones rápidas, la impedancia del filtro R-L se eleva y la corriente por A_0 aumenta al igual que la tensión. De esta forma se representa la característica dinámica del pararrayo.

Fig. 3. Curvas características de las resistencias no lineales denominadas A_0 y A_1 .

El modelo posee también una inductancia L_0 que es asociada al campo magnético existente en la vecindad del pararrayos, un resistor R_0 que sirve para evitar problemas con la integración numérica utilizada en simulaciones digitales y un capacitor C que representa la capacitancia entre los terminales del pararrayo. Una estimación inicial de todos estos parámetros puede ser obtenida a partir de las ecuaciones (2 a la 6).

$$L_0 = 0,2 \frac{d}{n} \quad (2)$$

$$R_0 = 100 \frac{d}{n} \quad (3)$$

$$R_1 = 65 \frac{d}{n} \quad (4)$$

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} \quad (5)$$

$$C = 100 \frac{n}{d} \quad (6)$$

Donde:

d es la altura estimada del pararrayo (m).

n es el número de columnas en paralelo del pararrayos.

Después de obtener los valores iniciales, se debe seguir el siguiente procedimiento para el ajuste manual de los parámetros:

- Ajustar L_1 , a través de un proceso iterativo, para obtener un valor de tensión residual próximo al encontrado en el catálogo del fabricante, para un impulso de corriente atmosférico.
- Ajustar los valores en por unidad de las tensiones de las curvas características de A_0 y A_1 , de forma tal que se obtenga una buena concordancia con los valores de tensión residual para la sobretensión de maniobra informada por el fabricante.

Este modelo presenta buena exactitud en los valores de tensión residual para impulsos de corriente con tiempos de frente comprendidos entre $0,5 \mu\text{s}$ y $45 \mu\text{s}$. No obstante, requiere de cálculos iterativos para ajustar sus parámetros lo que complejiza el trabajo con el modelo y presenta desviaciones en las formas de ondas de tensión obtenidas experimentalmente y simuladas [1].

Modelo propuesto por Karbalaye et al.

El modelo dependiente de la frecuencia propuesto por Karbalaye y otros [14], es una simplificación del modelo IEEE. Al igual que el modelo de Fernández & Díaz [17], este descarta los parámetros R_0 y L_0 del modelo IEEE. La característica V-I no lineal del pararrayo se representa utilizando las dos resistencias no lineales A_0 y A_1 recomendadas en el modelo propuesto por la IEEE como se puede observar en la figura 4.

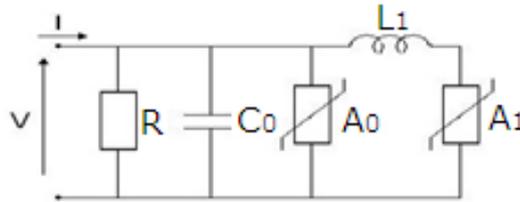


Fig. 4. Modelo propuesto por Karbalaye et al.

El circuito está constituido además por una resistencia R ($1 \text{ M}\Omega$) para evitar problemas con la integración numérica utilizada en simulaciones digitales, un capacitor C_0 que representa la capacitancia entre los terminales del pararrayo, y una inductancia L_1 que separa las dos resistencias no lineales y define el comportamiento dinámico del modelo.

La forma de obtener los elementos L_1 y C_0 constituye el aspecto principal que lo diferencia del modelo de Fernández & Díaz. Estos son determinados por las ecuaciones (7 y 8):

$$L_1 = \frac{1}{5} \frac{V_{r\frac{8}{20}} e^n}{V_{r\frac{8}{20}}} V_{ss} \quad (7)$$

$$C = \frac{1}{55} \frac{V_{r\frac{8}{20}} e^n}{V_{r\frac{8}{20}}} V_n \quad (8)$$

Donde:

V_n es la tensión nominal del pararrayo.

$V_{r\frac{8}{20}}$ es la tensión residual debido a un impulso de corriente de $8/20 \mu\text{s}$ y 10 kA .

V_{ss} es la tensión residual debido a un impulso de corriente de $60/2000 \mu\text{s}$ y 500 A .

Los autores afirman que este nuevo modelo presenta un buen desempeño en general pero carece de validaciones de otros autores por lo que se incluye en este trabajo. También es importante resaltar que algunos parámetros como el de tensión residual debido a un impulso de corriente de $60/2000 \mu\text{s}$ y 500 A no siempre es dado por el fabricante y por tanto complejiza el desarrollo de este.

Modelo propuesto por Valsalal *et al.*

Experimentos desarrollados por Valsalal y otros [15], ratifican que para impulsos de corriente con tiempos de frente mayores de $1 \mu\text{s}$, el pico de tensión residual ocurre antes que el de corriente.

Adicionalmente los autores de este modelo plantean que para impulsos de corriente con tiempos de frente inferiores a $1 \mu\text{s}$, el pico de tensión residual ocurre después que el de corriente. Comprobó que este atraso en el pico de tensión residual aumenta a medida que disminuye el tiempo de frente del impulso de corriente. Este fenómeno fue atribuido a las capacitancias parásitas presentes en los varistores del pararrayos.

También plantean que el conocido modelo de Magro y otros [18], no representa con exactitud el comportamiento de la tensión residual en el pararrayos para impulsos de corriente inferiores a $1 \mu\text{s}$. Por tal motivo se crea un nuevo modelo dinámico a partir del propio modelo de Magro et al que incorporan el efecto de las capacitancias parásitas (figura 5).

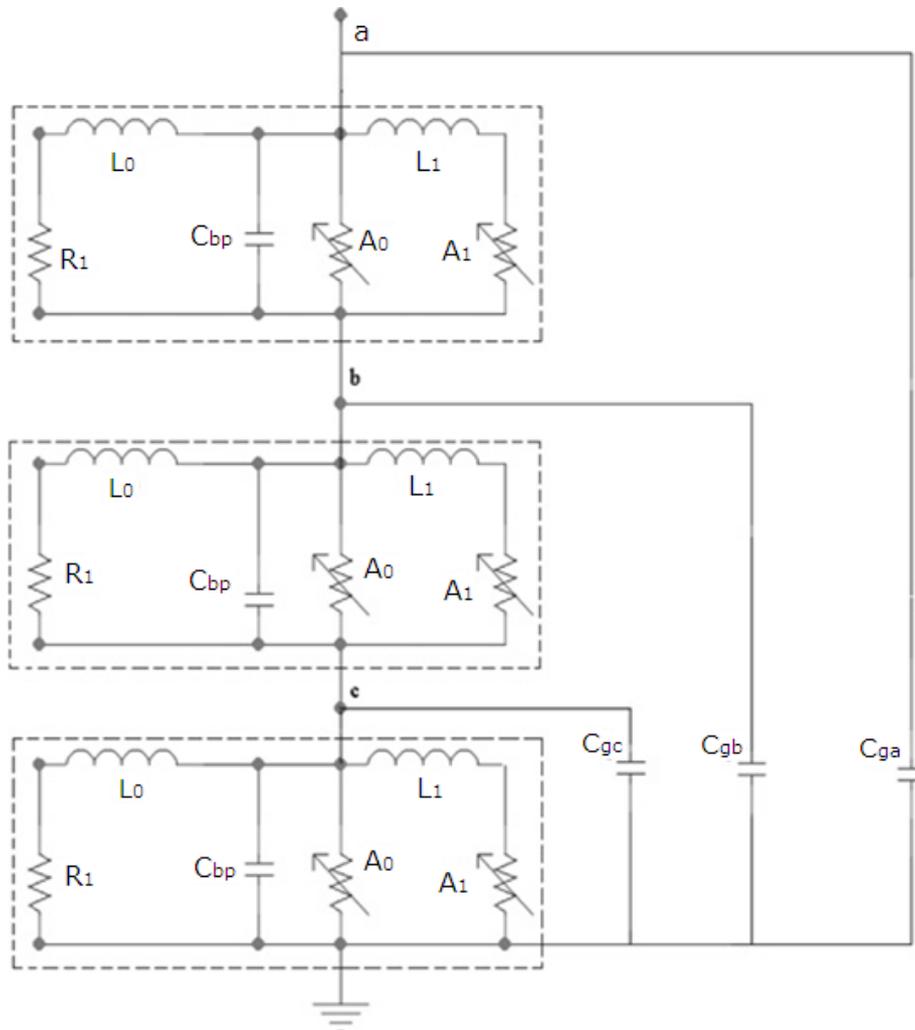


Fig. 5. Modelo propuesto por Valsalal et al. [15].

Los parámetros del modelo A_0 , A_1 se determinan igual que en el modelo de la IEEE W. G. A R_1 se le asigna un valor de $1 \text{ M}\Omega$ para evitar problemas con la integración numérica utilizada en simulaciones digitales. L_0 y L_1 son calculados como lo propone Magro y otros, para cada uno de los pararrayos (figura 6).

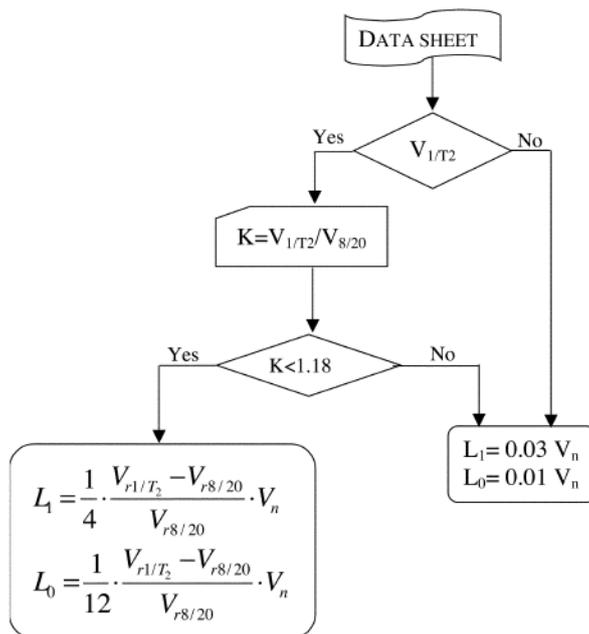


Fig. 6. Diagrama de flujo para calcular los elementos L_0 y L_1 [18].

Las capacitancias parásitas son calculadas utilizando el método de elementos finitos. Los autores plantean que con este modelo se obtiene buena exactitud en los valores de tensión residual y representa adecuadamente el atraso en la tensión para impulsos de corriente con tiempo de frente mayores y menores a $1 \mu s$. No obstante, requiere de cálculos por elementos finitos para calcular uno de sus parámetros lo que complejiza el trabajo con el modelo además de que requiere de la validación de otros autores.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Ensayos de laboratorio.

Se realizaron ensayos de impulso de corriente en tres tipos de varistores de óxido de zinc con características físicas y eléctricas diferentes. En la tabla 1, son mostrados los datos técnicos de los varistores, suministrados por los fabricantes.

Tabla 1. Datos técnicos de los varistores de óxido de zinc I, II y III.			
Datos técnicos	Varistor		
	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Fabricante	A		B
Altura (m)	0.022	0.022	0,028
Diámetro (m)	0.064	0.048	0.041
Corriente nominal de descarga (kA)	10	10	10
Tensión nominal efectiva U_r (kV)	2	2	4
Tensión de operación continua efectiva U_c (MCOV) (kV)	1,5	1,5	3,4
Tensión residual máxima para impulso atmosférico de 10 kA (kV)	-	-	13,2

Los ensayos fueron realizados con un generador de impulso de corriente. En la figura 7, se presenta el esquema experimental utilizado en este ensayo.

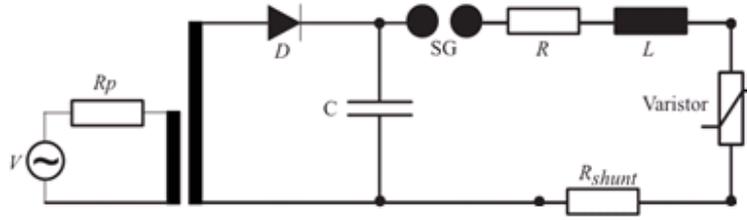


Fig. 7. Esquema de ensayo utilizado.

Ajustando los elementos R, L y C del generador de impulso es posible obtener impulsos de corriente de diferentes formas de onda y amplitudes. En este trabajo fueron realizados ensayos con impulsos de corriente rápidos (forma de onda 1,5/6 μs) e impulsos de corriente atmosféricos (forma de onda 8/20 μs). Las señales de tensión y corriente fueron obtenidos a partir de una punta de prueba de alta tensión y una resistencia “shunt” (R_{shunt}) respectivamente, en conjunto con un sistema de adquisición de datos formado por un osciloscopio digital y una rutina de adquisición de datos desarrollada en el programa Matlab®. Una vez filtradas las señales de tensión y corriente se determinan los valores de tensión residual, la razón de inclinación inicial de la tensión ($\text{kV}/\mu\text{s}$) y la energía absorbida para cada varistor.

Simulaciones digitales.

Las simulaciones digitales fueron realizadas en ATP [7]. Se utilizó una fuente de corriente con los valores de impulso de corriente obtenidos en laboratorio. El resistor no-lineal Tipo 92 del ATP se utilizó para representar las resistencias no lineales presentes en los modelos analizados. En todas las simulaciones se utilizó un tiempo de simulación de 45 μs y un paso de tiempo de 10,4 ns. A partir de las simulaciones digitales se obtuvieron los valores de tensión residual, razón de inclinación inicial de tensión ($\text{kV}/\mu\text{s}$) y la energía absorbida por cada varistor.

Los valores picos de las tensiones residuales medidas (Urdat) y simuladas (Ursim) fueron obtenidos a partir de las formas de onda de la tensión aplicada sobre el pararrayos. El error relativo (ε_r) se calcula de acuerdo a la ecuación (9), [7]:

$$\varepsilon_r (\%) = \frac{U_{r\text{sim}} - U_{r\text{dat}}}{U_{r\text{dat}}} * 100 \quad (9)$$

La razón de inclinación inicial de las tensiones residuales medidas y simuladas, fueron obtenidas a partir de la ecuación (10), [7]:

$$T_i = \left(\frac{V_{90\%} - V_{30\%}}{t_{90\%} - t_{30\%}} \right) \quad (\text{kV} / \mu\text{s}) \quad (10)$$

Donde:

$V_{90\%}$ es el valor del 90 % del pico de tensión residual (kV).

$t_{90\%}$ es el instante de tiempo en el cual la tensión residual está al 90% de su valor pico (μs).

$V_{30\%}$ es el valor del 30 % del pico de tensión residual (kV).

$t_{30\%}$ es el instante de tiempo en el cual la tensión residual está al 30% de su valor pico (μs).

La energía absorbida E (J) [7], por el varistor en cada caso analizado es calculada a través de la ecuación (11).

$$E = \int_0^{t_f} v(t) i(t) dt = \sum_{j=1}^{n-1} \left[0.5h (V_j I_j + V_{j+1} I_{j+1}) \right] \quad (11)$$

Donde:

$V(t)$ e $i(t)$ son los valores instantáneos de tensión y corriente sobre el varistor respectivamente.

V_j e I_j son los valores de tensión y corriente obtenidos en las mediciones y las simulaciones.

n es el número de muestras.

h es el paso de cálculo.

La concordancia entre las curvas de tensión residual medidas y simuladas es determinada a través del método estadístico de R^2 . Este es definido a partir de las ecuaciones (12, 13 y 14), [7]. Cuanto más próximos a uno este el valor de R^2 , más se aproximará el resultado de la simulación al de la medición.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (12)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (Vm_j - Vs_j)^2 \quad (13)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (Vm_j - \overline{Vm})^2 \quad (14)$$

Donde:

Vm_j y Vs_j son los valores de tensión medidos y simulados respectivamente.

N es el número de muestras.

Vm es el valor medio de la tensión medida.

SSE es la suma cuadrática de los errores entre señales de tensión medidos y simulados.

SST suma de los errores cuadráticos con relación a la media de la señal de tensión medida.

En la tabla 2, 3 y 4, se presentan los resultados del valor pico de tensión residual (V_{rp}), razón de inclinación inicial de tensión (T_i), energía absorbida (E) y R^2 para los varistores 1, 2 y 3.

Tabla 2. Resultados obtenidos para el varistor de óxido de zinc I.					
Mediciones / Modelos	V_{rp} (V)	ϵ_r (%)	T_i (kV/ μ s)	E (J)	R^2
Impulso de corriente 8/20 μ s, 10 kA					
Medición	7643,42	x	29,40	2304,96	X
Modelo Convencional	7643,42	4,09E-06	64,70	2145,36	0,58
Modelo IEEE W. G.	7644,50	0,01	50,51	2213,28	0,92
Modelo Karbalaye et al.	7465,68	2,33	39,50	2254,57	0,93
Modelo Valsalal et al.	7390,3	3,31	35,00	2274,08	0,93
Impulso de corriente 1,5/6 μ s, 10 kA					
Medición	8440,01	x	60,87	1551,36	x
Modelo Convencional	7609,28	-9,84	109,50	1219,75	0,57
Modelo IEEE W. G.	8437,00	-0,04	73,38	1320,75	0,73
Modelo Karbalaye et al.	8070,00	4,38	72,04	1363,81	0,71
Modelo Valsalal et al.	8136	3,60	65,00	1393,19	0,69

Tabla 3. Resultados obtenidos para el varistor de óxido de zinc II.					
Mediciones / Modelos	V _{rp} (V)	ϵ_r	Ti (kV/ μ s)	E (J)	R ²
Impulso de corriente 8/20 μ s, 10 kA					
Medición	7760,02	-	29,85	2280,33	-
Modelo Convencional	7760,02	9,23E-06	31,17	2039,88	0,60
Modelo IEEE W. G.	7756,83	-0,04	12,48	2391,84	0,94
Modelo Karbalaye et al.	7600,03	2,06	13,04	2400,75	0,91
Modelo Valsalal et al.	7493,70	3,43	13,75	2407,18	0,90
Impulso de corriente 1,5/6 μ s, 10 kA					
Medición	8481,64	-	97,87	1555,78	-
Modelo Convencional	7768,67	-8,41	164,03	1278,08	0,59
Modelo IEEE W. G.	8556,68	0,88	135,03	1374,46	0,87
Modelo Karbalaye et al.	8085,00	4,68	140,54	1384,37	0,85
Modelo Valsalal et al.	8108,6	4,40	146,83	1414,77	0,84

Tabla 4. Resultados obtenidos para el varistor de óxido de zinc III.					
Mediciones / Modelos	V _{rp} (V)	ϵ_r	Ti (kV/ μ s)	E (J)	R ²
Impulso de corriente 8/20 μ s, 10 kA					
Medición	12724,29	-	19,32	3960,69	-
Modelo Convencional	12724,29	-3,5E-05	29,09	3811,45	0,76
Modelo IEEE W. G.	12725,86	0,01	4,37	4135,46	0,93
Modelo Karbalaye et al.	12344,00	2,99	5,11	4121,14	0,93
Modelo Valsalal et al.	12286,00	3,44	8,13	4100,24	0,94
Impulso de corriente 1,5/6 μ s, 10 kA					
Medición	13598,37	-	52,30	2281,68	-
Modelo Convencional	12707,25	-6,55	92,36	1912,42	0,82
Modelo IEEE W. G.	13179,69	-3,08	35,30	2475,65	0,53
Modelo Karbalaye et al.	13051,00	4,03	31,36	2459,13	0,60
Modelo Valsalal et al.	13243,00	2,61	27,18	2441,38	0,66

Los resultados mostrados en las tablas 2, 3 y 4, muestran como estos modelos analizados presentan un bajo error relativo entre los valores picos de tensión residual medidos y simulados para impulsos de corriente de 8/20 μ s y 10 kA.

Para impulsos de corriente de 1,5/6 μ s y 10 kA el modelo convencional presenta un alto error relativo debido a que no representa la característica dinámica del pararrayo mientras que los demás modelos se comportan de forma estable para las dos formas de ondas analizadas. Estos resultados ratifican las afirmaciones de los autores de los modelos.

La energía absorbida por los varistores presenta diferencias significativas superiores a un 5% o más para formas de ondas de 1,5/6 μ s y 10 kA. Los resultados obtenidos para la razón de inclinación inicial de tensión residual muestran mucha oscilación en sus valores y por tanto poca exactitud en general para las dos formas de ondas analizadas.

Con la aplicación del método estadístico de R^2 se observan ajustes superiores al 90 % para impulsos de corriente de 8/20 μ s y 10 kA excepto en el modelo Convencional. Sin embargo, se observan problemas de desviación en las forma de ondas de tensión residual para impulsos de corriente de 1,5/6 μ s y 10 kA donde son inferiores al 90 % en todos los casos.

CONCLUSIONES

En este trabajo se pudo constatar cómo los modelos analizados presentan buena exactitud en el valor pico de la tensión residual para impulsos de corriente de 8/20 μ s y 1,5/6 μ s en 10 kA excepto el modelo Convencional que para esta última variante presenta un error relativo mayor.

Se observó que los modelos propuestos por Karbalaye *et al.* y Valsalal *et al.* presentan grandes errores de exactitud en los resultados obtenidos en la razón de inclinación inicial de tensión, la energía absorbida por los varistores y la desviación de la forma de onda de tensión residual para impulsos de corriente de 1,5/6 μ s.

Partiendo de estos resultados se considera que los modelos de la IEEE W. G. y Valsalal *et al.*, a pesar de tener problemas para determinar algunos de sus parámetros, son los de mejor comportamiento de forma general y por tanto son los recomendados por el autor de este trabajo para realizar estudios frente a sobretensiones atmosféricas y de frente rápido.

REFERENCIAS

- [1] IEEE W. G. 3.4.11, "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, n. 1, p. 302–309, ISSN: 0885-8977, DOI: 10.1109/61.108922, January 1992, [consulta 02/05/2017], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/108922/>.
- [2] Piotr Oramus, Marekflorkowski, "Comparison of surge arresters models to overvoltages studies in electrical networks", XXIII Seminarium Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki, n. 36, ISSN: 2353-1290, 2013, [consulta 2017/04/25], Disponible en: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element/baztech-e1e35890-959c-41d7-a08e-72855d688e08>.
- [3] G. V. N. Bezerra, *et al.*, "Evaluation of Surge Arrester Models for Overvoltage Studies", International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Poznan, Poland, DOI: 10.1109/ICHVE.2014.7035382, September 2014, [consulta 02/05/2017], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7035382/>
- [4] José Fidelis S. Júnior, *et al.*, "Avaliação de Modelos Elétricos para Simulação de Para-raios de ZnO com Diferentes Tensões Nominiais", V Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Foz do Iguaçu – PR, Brasil, ISSN: 2177-6164, DOI: 10.13140/2.1.2935.1683, December 2014, [consulta 02/05/2017], Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/266616944_Avaliacao_de_Modelos_Eletricos_Para_Simulacao_de_Pa-ra-raios_de_ZnO_com_Diferentes_Tensoes_Nominiais
- [5] D. Lovrić, *et al.*, "Comparison of Different Metal Oxide Surge Arrester Models", International Journal of Emerg. Science, vol. 1, n. 4, p. 545-554, ISSN: 2222-4254, December 2011, [consulta 02/05/2017], Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/236882656_Comparison_of_different_metal_oxide_surge_arrester_models
- [6] Valle, Boris Alba; *et al.*, "Behavior of metal oxide surge arrester for fast surges", 18th International Symposium of High Voltage Engineering, Seoul, Korea, 2013, [consulta 02/05/2017], Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/283505125_BEHAVIOR_OF_METAL_OXIDE_SURGE_ARRESTER_FOR_FAST_SURGES.
- [7] Gilberto Alonso Quintana, *et al.*, "Evaluation of metal oxide surge arrester models based on laboratory experiments", International Journal of Mechanical And Production Engineering (IJMPE), vol. 5, n. 1, p. 32-37, ISSN (print): 2320-2092, ISSN (on-line): 2321-2071, Jan 2017, [consulta 02/05/2017], Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/321255035_EVALUATION_OF_METAL_OXIDE_SURGE_ARRESTER_MODELS_BASED_ON_LABORATORY_EXPERIMENTS
- [8] Pramuk Unahalekhaka. "Simplified Modeling of Metal Oxide Surge Arresters", Energy Procedia, n. 56, p. 92–101, ISSN: 1876-6102, DOI: 10.1016/j.egypro.2014.07.136, 2014, [fecha de consulta: 02/05/2017], Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214009989>
- [9] Mehdi Nafar, *et al.*, "Comparison of IEEE and Pinceti Models of Surge Arresters", Research Journal of Engineering Sciences, vol. 3, n. 5, p. 32–34, ISSN: 2278-9472, May 2014, [consulta 02/05/2017], Disponible en: <http://www.isca.in/IJES/Archive/v3/i5/4.ISCA-RJEngS-2014-18.pdf>

- [10] N. Triruttanapiruk, *et al.*, “A Simple Surge Arrester Model Extracted from Experimental Results”, International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, DOI: 10.1109/ICLP.2014.6973388, oct.2014, [consulta 02/05/2017], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6973388/>
- [11] Kaveri Bhuyan, Saibal Chatterjee, “Simulations of lightning impulse residual voltage test of surge arresters in matlab-simulink”, 1st Conference on Power, Dielectric and Energy Management at NERIST (ICPDEN), Itanagar, India, DOI: 978-1-4799-6459-8, 2015, [consulta 02/05/2017], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7084494/>
- [12] Hizal Bin Abu Bakar. “Fast transient simulation of IEEE recommended surge arrester model on a transmission line using alternative transient program (ATP)”, Faculty of Electrical & Electronic Engineering, Universiti Tun Hussein Onn, Malaysia, jan2015. Disponible en: <http://eprints.uthm.edu.my/7717/>
- [13] Vishal R. Rakholiya, Dr. H. R. Sudarshana Reddy, “Analysis of MOV Surge Arrester Models by using Alternative Transient Program ATP/EMTP”, International Journal of Science Technology & Engineering (IJSTE), vol. 3, n. 2, p. 149-155, ISSN: 2349-784X, August 2016, [consulta 02/05/2017], Disponible en: <https://ijste.org/Article.php?manuscript=IJSTEV3I2059>.
- [14] M. K. Zadeh, *et al.*, “The modeling of metal-oxide surge arrester applied to improve surge protection”, 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS), Shenzhen, China, vol. 1, p. 238–243, DOI: 10.1109/PEITS.2009.5407027, 2009, [consulta 02/05/2017], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5407027/>
- [15] P. Valsalal, *et al.*, “Modelling of metal oxide arrester for very fast transients”, Iet Science Measurement & Technology, vol. 5, n. 4, p. 140-146, ISSN: 1751-8822, DOI: 10.1049/iet-smt.2010.0129, jul2011, [consulta 02/05/2017], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5960739/>
- [16] Lin Xin, *et al.*, “High frequency model of metal-oxide surge arrester for researching on VFTO”, 1st International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), Xi'an, China, p. 577 – 581, DOI: 10.1109/ICEPE-ST.2011.6123057, 2011, [consulta 02/05/2017], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6123057/>
- [17] F. Fernandez, R. Diaz, “Metal Oxide Surge Arrester Model for Fast Transient Simulations”, International Conference on Power Systems Transients (IPST), Rio de Janeiro, Brazil, 2001, [consulta 02/05/2017], Disponible en: http://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2001/01IPST056.pdf
- [18] M. C. Magro, M. Giannettoni, *et al.*, "Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, n. 4, p. 1692-1695, ISSN: 0885-8977, DOI: 10.1109/Tpwr.2004.832354, oct2004, [consulta 02/05/2017], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1339334/>