

Análisis de la respuesta transitoria de una jabalina de puesta a tierra frente a descargas atmosféricas

Corina Feltan ^a, Roberto Cabral ^a, Paolo Quintana ^a, Dario Yucheche ^a, Aldo Caballero ^a

^a *Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.*

e-mails: feltan@fio.unam.edu.ar, robert_rjc@hotmail.com, quintanaangelpaolo@gmail.com, darioyucheche@gmail.com, aldoluiscaballero@fio.unam.edu.ar

Resumen

Este trabajo se inscribe en el marco general del proyecto Caracterización de las puestas a tierra y las protecciones contra descargas atmosféricas. Particularmente aquí se aborda el caso específico del comportamiento de las puestas a tierra con un solo electrodo tipo jabalina frente a corrientes impulsivas. Para esta configuración se formula un modelo de parámetros concentrados y, a partir del mismo, se plantea el sistema de ecuaciones diferenciales correspondientes. Esto conduce a la evaluación de la impedancia transitoria como herramienta de caracterización de la respuesta dinámica frente a la dispersión de corrientes originadas por descargas atmosféricas. Por último, se muestra que la utilización de la impedancia de cresta como indicador de las características dinámicas es interesante porque permite salvar el inconveniente que representa la variación en el tiempo de la impedancia transitoria, pudiendo aproximarse sencillamente y con excelente ajuste mediante una función lineal de la resistividad aparente del suelo.

Palabras Clave – *Puestas a tierra, Jabalinas, Impedancia transitoria, Transitorios electromagnéticos, Técnicas de integración numérica.*

1. Introducción

Las puestas a tierra desempeñan un rol fundamental en la protección de sistemas e instalaciones eléctricas, pues su función es dispersar corrientes de falla y asegurar que el potencial de los elementos conectados a ellas no supere ciertos valores admisibles.

En cuanto a las sollicitaciones frente a las cuales las puestas a tierra deben comportarse satisfactoriamente es muy importante distinguir las que involucran corrientes y tensiones de frecuencia industrial de las asociadas a perturbaciones de alta frecuencia y, muy especialmente, las de naturaleza impulsiva, tales como las producidas por las descargas atmosféricas.

En términos generales, es bien conocido que el análisis del comportamiento de las puestas a tierra a frecuencias industriales no ofrece mayores dificultades, es suficiente con considerar la resistencia que ofrecen a la dispersión de corrientes senoidales de baja frecuencia. Sin embargo, cuando se trata de perturbaciones debidas a descargas atmosféricas, no pueden obviarse los efectos de la variación en el tiempo de la intensidad de corriente.

Téngase presente que la corriente de un rayo varía en magnitudes del orden de decenas de kA en menos de un microsegundo, por lo tanto, los efectos dependientes de la rapidez de esa variación no pueden despreciarse. En otros términos, el análisis de la respuesta transitoria demanda necesariamente la consideración de los efectos de las variaciones de los campos asociados a la corriente dispersada por la puesta a tierra. Naturalmente, esto constituye un asunto más sensible cuando mayores son los niveles cerámicos correspondientes a la zona de emplazamiento de la instalación [1]-[3].

De acuerdo con la configuración de la puesta a tierra el análisis de su respuesta transitoria puede tratarse de diferentes maneras. Cuando se trata de electrodos de dimensiones relativamente pequeñas, tal el caso de las jabalinas, es aplicable un enfoque basado en la modelización mediante parámetros concentrados y la evaluación de la impedancia de impulso [4]-[5].

2. Formulación del modelo

Como se señaló en el epígrafe precedente, la evaluación de la impedancia de impulso es una manera de caracterizar el comportamiento dinámico de una puesta a tierra frente a corrientes impulsivas, tales como las originadas por descargas atmosféricas.

Una puesta a tierra de electrodo simple tipo jabalina, tal como se esquematiza en la figura 1.a) puede modelizarse mediante una representación de parámetros concentrados como muestra la parte b) de la misma figura [6]-[7], del cual surge el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} - L \cdot \frac{d^2i}{dt^2} - \frac{i_c}{C} - \frac{di}{dt} \cdot r = 0 \\ R \cdot \frac{di_R}{dt} - \frac{i_c}{C} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

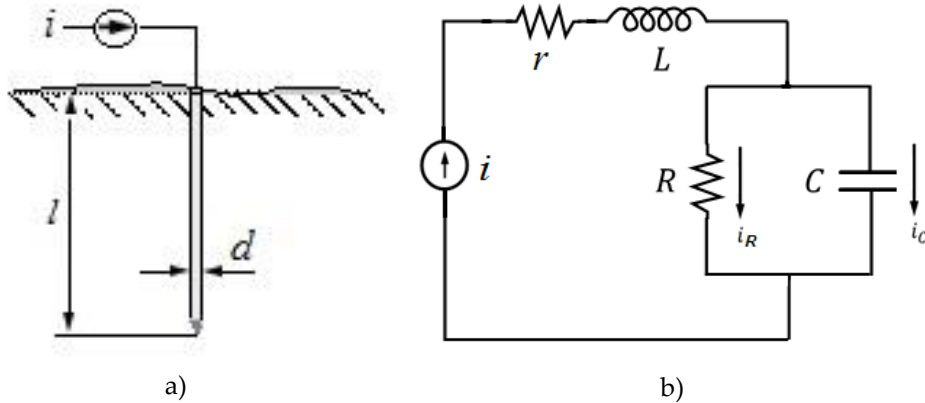


Fig. 1. a) Electrodo tipo jabalina

b) Modelo de parámetros concentrados

Con i se denota la corriente impulsiva dispersada por la puesta a tierra, mientras que v es la elevación del potencial causada por ese impulso de corriente. R es la resistencia de dispersión del electrodo, L la inductancia total de la puesta a tierra (suma de la del electrodo L_j y la del conductor de tierra), r es la resistencia del conductor de tierra y C la capacitancia del electrodo.

Los parámetros pasivos del modelo se calculan según las expresiones que se dan a continuación [8]-[9].

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot l \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot l}{d}\right) \quad (2)$$

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln\left[\sqrt{1 + \left(\frac{2 \cdot l}{d}\right)^2} + \frac{2 \cdot l}{d}\right] \quad (3)$$

$$r = \frac{\rho_c \cdot l_c}{\pi \cdot \frac{d_c^2}{4}} \quad (4)$$

$$C = \frac{\varepsilon \cdot \rho}{R} \quad (5)$$

En las expresiones anteriores l es la longitud del electrodo y d su diámetro, ρ es la resistividad aparente del suelo y ε su permitividad dieléctrica; mientras que ρ_c es la resistividad del conductor de tierra y l_c su longitud.

La impedancia transitoria Z_t se define como la relación entre el voltaje v originado por la corriente impulsiva i [9]:

$$Z_t = \frac{v}{i} \quad (6)$$

La representación convencional del impulso de corriente empleada responde a la formulación doble exponencial de la expresión (7), normalmente adoptada para el análisis de la respuesta transitoria frente a descargas atmosféricas [10]-[12]

$$i = I_o \cdot (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (7)$$

3. Análisis

Se estudió el comportamiento de la impedancia de impulso con una corriente impulsiva con valor de 30 kA en la cresta y $\alpha = 1,084 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$; $\beta = 5,04 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$.

El enfoque se centró principalmente en el análisis de sensibilidad de variación de la impedancia de impulso cuando se emplean electrodos de distintas dimensiones, así como también para diferentes resistividades de suelo.

Para llevar a cabo las simulaciones necesarias se implementó un código específico, sobre la base de la aplicación de la formulación numérica de Runge-Kutta para la integración del sistemas de ecuaciones diferenciales (1).

La figura 3 muestra la evolución en el tiempo de Z_t considerando tres diámetros de electrodo y dos valores de longitud. Mientras que la figura 4 ilustra los coresultados correspondientes.

La figura 4 pone en evidencia la influencia de la longitud de la jabalina en su respuesta impulsiva.

En la Figura 5 se observa cómo la impedancia transitoria es afectada por la resistividad aparente del suelo.

Puede notarse que ante la dispersión de corrientes originadas por descargas atmosféricas, la impedancia transitoria es dependiente del tiempo. Por ello resulta útil considerar también el parámetro Z de cresta, definido por la relación entre el valor máximo del voltaje originado por el impulso de corriente su valor de cresta (8). La dependencia de este parámetro respecto de la resistividad aparente del suelo se aproxima linealmente con excelente ajuste, como lo evidencia la figura 6.

$$Z = \frac{\hat{v}}{\hat{i}} \quad (8)$$

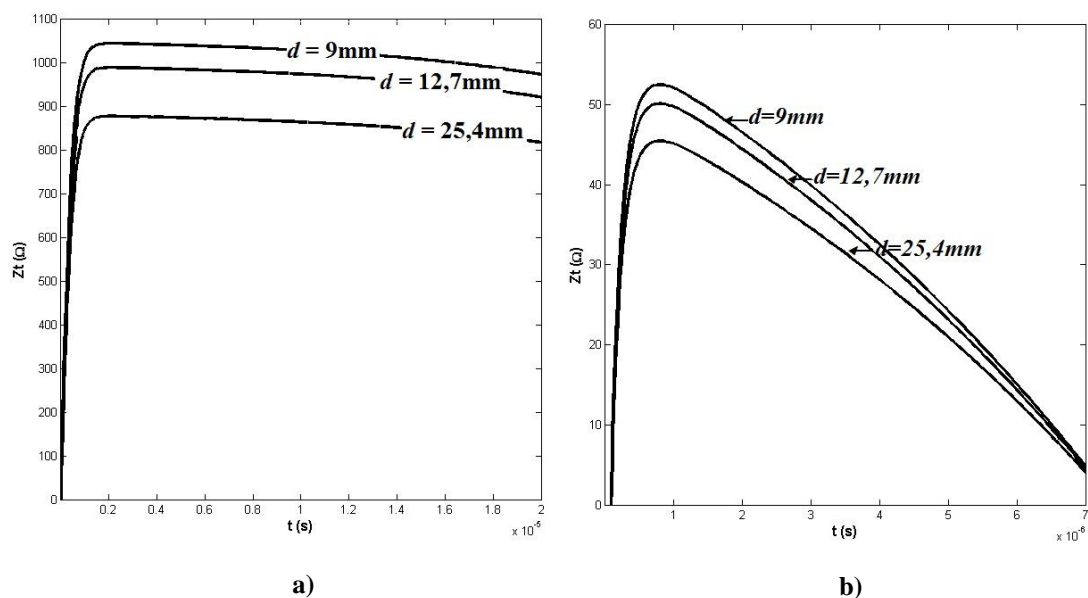


Fig. 3. Variación de la impedancia transitoria para diferentes diámetros de la jabolina
a) $l = 1,5\text{m}$ b) $l = 6\text{m}$

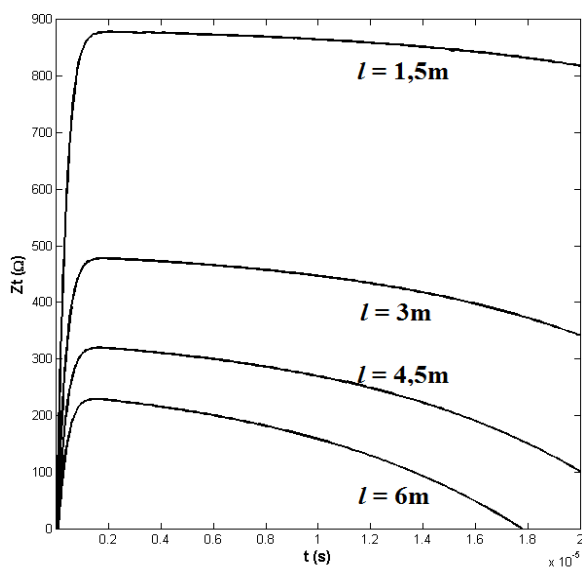


Fig 4. Variación de la impedancia transitoria para diferentes longitudes de jabolina

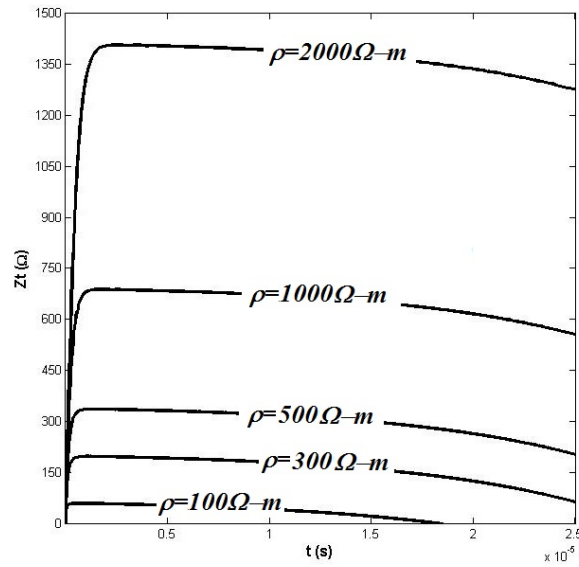


Fig 5. Variación de la impedancia transitoria para distintos valores de resistividad del terreno

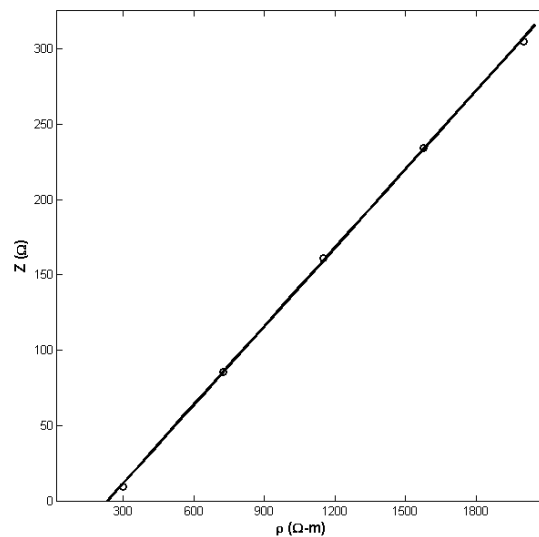


Fig 6. Variación de la impedancia de cresta en función de la resistividad del terreno

4. Conclusiones

Partiendo de una representación típica de parámetros concentrados, se presentó el concepto de impedancia transitoria como magnitud representativa de la respuesta transitoria de una jabalina de puesta a tierra.

La solución numérica del sistema de ecuaciones diferenciales que modelizan la respuesta del sistema analizado, pone de manifiesto que la impedancia transitoria varía en el tiempo conforme evoluciona el proceso de dispersión a tierra de corrientes impulsivas. Esto indica que la representación tradicional, basada en la sola consideración de la resistencia de puesta a tierra es insuficiente para analizar la respuesta frente a perturbaciones originadas por descargas atmosféricas.

Para salvar la dificultad técnica que implica caracterizar el comportamiento transitorio de una puesta a tierra a partir de la impedancia transitoria, porque la misma varía según transcurre el proceso, es posible recurrir al parámetro Z de cresta, cuyo valor responde ajustadamente a una aproximación lineal respecto de la resistividad del suelo.

5. Referencias

- [1] Protección contra rayos Parte 11: Guía para la elección de la protección contra rayos (SPCR) para usar en la República Argentina. Norma IRAM 2184-11. Segunda Edición 2016.
- [2] M. G. Nicora. Actividad eléctrica atmosférica en Sudamérica. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de La Plata. 2014.
- [3] C. Feltan, et al. Estudio de la variación estacional de la resistencia de las puestas a tierra utilizando inteligencia artificial. Unijui. Ijuí, Brasil. 2017.
- [4] M. A. Salam, et al. High-Voltage Engineering, Theory and Practice. 2000.
- [5] M. Ramamoorthy, et al. Transient performance of grounding grids. *IEEE Power Engineering Review*, 1989, vol. 9, N°10, p. 48-48.
- [6] C. Mazzetti, G. Veca. Impulse behavior of ground electrodes. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983, N°9, p. 3148-3156.
- [7] I. Gonos; F. Topalis.; I. Stathopoulos,.Transient impedance of grounding rods. En *High Voltage Engineering Symposium*. 1999. p. 272-275.
- [8] A. Caballero. Las puestas a tierra en los Sistemas Eléctricos. Editorial Universitaria. Colección Cátedra, 1998.
- [9] R. Verma, D. Mukhedkar. Fundamental Considerations and Impulse Impedance of Grounding Grids. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981, N°3, p. 1023-1030.
- [10] V. Rakov, et al. CIGRE technical brochure on lightning parameters for engineering applications. En *2013 International Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA)*. IEEE, 2013. p. 373-377.
- [11] V. Cooray, Return stroke models for engineering applications, in *Lightning Protection* (V. Cooray, Ed.), Institute of Engineering and Technology, London, UK, 2010.
- [12] N. Plooster. Numerical model of the return stroke of the lightning discharge. *The Physics of Fluids*, 1971, vol. 14, N°10, p. 2124-2133.