

Análisis de sobretensiones en líneas de transmisión de un sistema de dos segmentos. Caso de estudio: onda viajera por línea larga con conexión a cable aislado.

Analysis of overvoltages in transmission lines of a two-segment system. Case study: long line traveling wave with insulated cable connection.

Iván Pazmiño Ordóñez¹, Edwin Bernardo Ponce Minaya¹, Hugo Adrián Pico Mera¹

¹ULEAM, ²CNEL

¹ivan.pazmino@uleam.edu.ec, ²bernardo.ponce@uleam.edu.ec, ³hugo.pico@cnel.gob.ec

Recibido: 02/03/2020

Aceptado: 21/04/2020

Resumen- El presente artículo muestra un desarrollo metodológico analítico para el cálculo de sobretensiones, aplicable en circunstancias análogas al caso de estudio planteado. Éste permite obtener de una manera simplificada los resultados alcanzados en una simulación realizada a través de una herramienta computacional.

El objetivo radica en alcanzar un alto grado de proximidad en los resultados prescindiendo de la herramienta informática necesaria para este efecto cuando la complejidad del caso de estudio así lo permita, y de esta manera comprender la dinámica asociada a los parámetros que pueden tener una influencia decisiva en muchas de las sobretensiones presentes en un sistema eléctrico de potencia, lo que se perfila como una herramienta de gran utilidad para los operadores de la red en cuanto a la comprensión de la interrelación de las variables involucradas en el fenómeno de sobretensiones se refiere.

Para evidenciar la efectividad de la metodología planteada se someten los resultados del cálculo analítico a un proceso de contraste con los obtenidos utilizando una herramienta computacional de amplia trayectoria en el estudio de sobretensiones eléctricas (ATPDraw®). Como resultado de dicha comparación se evidenciará un error menor al uno por ciento, lo que en términos prácticos puede considerarse como nulo, con lo cual queda validada el desarrollo metodológico analítico planteado.

Palabras clave: Protección Contra Sobretensiones, Computación en Ingeniería Eléctrica, Fallas en líneas eléctricas.

Abstract- This study presents the analytical and detailed methodological development for the calculation of surges applicable in circumstances analogous to the case study. This allows to obtain a simplified way of the results obtained in a simulation carried out through a computational tool.

The comet is based on achieving a high degree of proximity in the results without the necessary computer tool for this

purpose when the complexity of the case study allows it, and thus understand the dynamics associated with the parameters that can have a decisive influence in many of the overvoltages present in an electrical power system, which is emerging as a very useful tool for network operators in terms of understanding the interrelation of the variables involved in the overvoltage phenomenon.

To demonstrate the effectiveness of the proposed methodology, the results of the analytical calculation are sometimes obtained in a process of contrast with the data using a computational tool with extensive experience in the study of electrical surges (ATPDraw®). As a result of this comparison, the null error will be evidenced in practical terms, which validates the said analytical methodological development.

Keywords: Surge protection, Power engineering computing, power system faults.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis de las sobretensiones en una red eléctrica es un paso fundamental en varios campos asociados a la ingeniería eléctrica, en múltiples segmentos de un sistema eléctrico de potencia, desde sistemas de distribución de energía [1], hasta sistemas de transmisión [2], donde dentro de sus usos figura el estudio de coordinación de aislamiento, por ejemplo. Pese a que las redes funcionan en régimen permanente la mayor parte del tiempo, son los requerimientos producidos por transitorios los que servirán para seleccionar el nivel de aislamiento normalizado de los equipos [3].

En este sentido, resulta claro advertir que las sobretensiones son normalmente originadas mediante un proceso transitorio, asociadas usualmente a una maniobra, una falta o una descarga atmosférica [4], a las cuales habría que añadir las tensiones permanentes a frecuencia industrial en condiciones normales, cuya amplitud puede cambiar de un punto a otro de la red.

Dada la complejidad inherente que supone el estudio riguroso de sobretensiones (en sistemas eléctricos de potencia de múltiples barras), este cálculo se realiza actualmente mediante ordenador digital, empleando herramientas de simulación con un alto grado de sofisticación. Sin embargo, continúa siendo importante conocer las causas y las características con las que se pueden presentar las sobretensiones.

En este sentido un estudio teórico basado en un modelo simplificado es de gran utilidad para comprender la dinámica de las variables involucradas y consecuentemente los resultados obtenidos luego de la respectiva simulación.

El análisis al detalle presentado en el presente estudio permite estimar de una manera simplificada los resultados obtenidos en una simulación con un alto grado de proximidad prescindiendo de la herramienta computacional cuando la complejidad del caso de análisis lo permita, y de esta manera comprender los parámetros que pueden tener una influencia decisiva en las principales características de la mayoría de sobre tensiones presentes en un sistema eléctrico de potencia.

De este manera, resulta menester evidenciar que el enfoque que aquí se aborda, conjuntamente con todos los principios asociados pueden eventualmente emplearse en análisis más complejos como los presentados en [5] y [6], por mencionar algunos.

II. FUNDAMENTOS

En términos generales se pueden considerar cuatro tipos de sobretensiones en que se suelen clasificar las solicitaciones a las que puede ser sometido el aislamiento de los equipos e instalaciones eléctricas; esto pueden ser temporales, de frente lento, de frente rápido, y de frente muy rápido.

Para comprender al detalle la dinámica del fenómeno de sobretensiones que abarca el caso de estudio, conviene remitirse brevemente a algunas definiciones, entre ellas una de las de mayor importancia es la onda viajera y todo su marco conceptual asociado.

En este sentido resulta de interés recordar que en estado estacionario la longitud de onda de la tensión senoidal es considerablemente grande en comparación con las dimensiones físicas de la red. Sin embargo, para el análisis transitorio, el tiempo de viaje de la onda debe ser tomado en consideración.

Es por ese motivo que, por ejemplo, una representación de parámetros concentrados de una línea de transmisión aérea por medio de secciones pi no tiene en cuenta el tiempo de viaje de las ondas electromagnéticas por lo que no resulta útil para el estudio de sobretensiones [7] debido a que sólo cuando las dimensiones físicas de cierta parte del sistema son pequeñas comparadas con la longitud de onda de los transitorios, el tiempo de viaje de la onda electromagnética puede ser despreciada.

Dicho de otra manera, cuando trabajamos en elementos distribuidos, debemos considerar que las tensiones y corriente, por ejemplo, en una línea no necesariamente tienen el mismo valor sobre todos los puntos de la línea en el mismo instante de tiempo.

De la mano de lo explicado previamente, es menester recordar lo asociado a la velocidad de la onda viajera y la característica de impedancia de la línea. Así, la velocidad de la onda queda expresada como:

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1)$$

Adicionalmente la impedancia característica (Z_c) de la línea de transmisión queda definida como:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

Vale recordar que en una línea de transmisión de energía tipo aérea las ondas electromagnéticas se propagan cerca de la velocidad de la luz, sin embargo, cuando se trata de un cable aislado la velocidad es considerablemente menor. Y es precisamente por el hecho que la velocidad de propagación de la onda electromagnética difiere entre una línea aérea desnuda y una subterránea con aislamiento por lo que se produce el fenómeno de reflexión y refracción de las ondas viajeras.

Dicho de otro modo, cuando una onda electromagnética se propaga a lo largo de una línea de transmisión con ciertas características de impedancia, hay una relación fija entre las ondas de tensión y corriente; pero cuando se encuentra con un cambio de impedancia, como el paso de línea aérea a conductor aislado o a un transformador, un punto abierto en el circuito o un corto circuito, en la discontinuidad parte de la energía atraviesa la transición del medio conductor y otra es reflejada y viaja de regreso. Este caso tipo es ilustrado en la Figura 1.

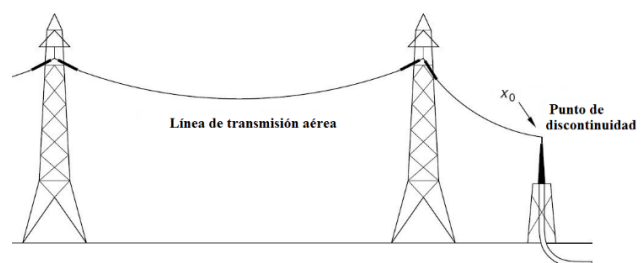


Figura 1. Caso práctico de un sistema de dos segmentos línea aérea desnuda-línea subterránea aislada. Adaptación de la Fuente: [7]

Para simplificar el análisis se considera ambos segmentos sin pérdidas. La onda viajera que va de la línea aérea al cable es denominada onda incidente y se une con el punto de discontinuidad X_0 , donde la onda incidente alcanza la discontinuidad al tiempo t_0 . Bajo estas consideraciones el coeficiente de refracción queda definido como:

$$r_1 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3)$$

Y el coeficiente de reflexión queda como se indica en la ecuación (4), donde en general esta es una cantidad con una magnitud menor a la unidad.

$$\rho_2 = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (4)$$

A partir de estos valores parciales es posible construir una gráfica que permita representar los valores de tensión en cada uno de los puntos de interés en los diferentes instantes de tiempo; dicha representación es denominada diagrama de Lattice. Para facilitar la dinámica de su construcción se empleará el caso de estudio detallado en la sección siguiente. Si el lector desea profundizar en el estudio y el desarrollo metodológico subyacente a los diagramas de Lattice se recomienda revisar fuentes como [8] [9] donde se explicitan los detalles metodológicos asociados a este tema.

III. METODOLOGÍA

cómo ésta fue realizada se partirá de un caso práctico tipo. Para éste considérese que un cable se conecta a una línea larga según se indica en la figura. Si la línea se alimenta con una fuente de tensión ideal de 10 kV, será necesario determinar la tensión en ambos extremos del cable A y B; y en su punto medio M, con la finalidad de cuantificar el nivel de sobretensión en cada uno de esos puntos. Para este caso se considerará el análisis 38 μs después de la llegada de la onda de tensión al cable. En donde los segmentos constitutivos ilustrados en la Figura 2 son: C1= 33.4pF/m; L1 = 0,978 μH/m. Cable: C2 = 136 pF/m; L2 = 0, 75 μH/m; l2 = 1km



Figura 2. Representación esquemática del caso de estudio. Fuente: Autores

Para el análisis respectivo se procederá como se detalla en el proceso a continuación presentado.

Se realiza el cálculo de las impedancias características, para la línea y el cable.

$$Z_{cable} = Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} = \sqrt{\frac{0.75E - 6}{136E - 12}} = 74.26 \quad (5)$$

$$Z_{línea} = Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \sqrt{\frac{0.978E - 6}{33.4E - 12}} = 171.118 \quad (6)$$

Se calculan los coeficientes de reflexión y de refracción de las ondas. Para este caso se considera que el cable en el punto B se encuentra abierto.

- Ondas refractadas que viajan de A hacia B

$$r_1 = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{2 * 74.26}{74.26 + 171.118} = 0.60527 \quad (7)$$

- Onda reflejada de B a A, donde como se considera que el cable en el punto B se encuentra abierto.

$Z_3 = impedancia\ infinita\ en\ B$

$$\rho_1 = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_3 + Z_2} = 1 \quad (8)$$

- Onda reflejada de A a B

$$\rho_2 = \frac{Z_1 - Z_2}{Z_2 + Z_1} = \frac{171.118 - 74.26}{74.26 + 171.118} = 0.40288 \quad (9)$$

Se calcula la velocidad de la onda en el tramo A-B (cable)

$$v = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \frac{1}{\sqrt{0.75E - 6 * 136E - 12}} = 99014754.3 \text{ m/s} \quad (10)$$

Calculo los tiempos de recorrido de la onda de ida y vuelta

$$\tau = \frac{l_2}{v_2} = \frac{1000}{99014754.3} = 10.099ms \quad (11)$$

Por lo tanto,

$$2\tau = 20.199 \text{ us} \quad (12)$$

$$3\tau = 30.3 \text{ us} \quad (13)$$

$$4\tau = 40.4 \text{ us} \quad (14)$$

De donde se obtiene el diagrama reticular mostrado en la figura 3:

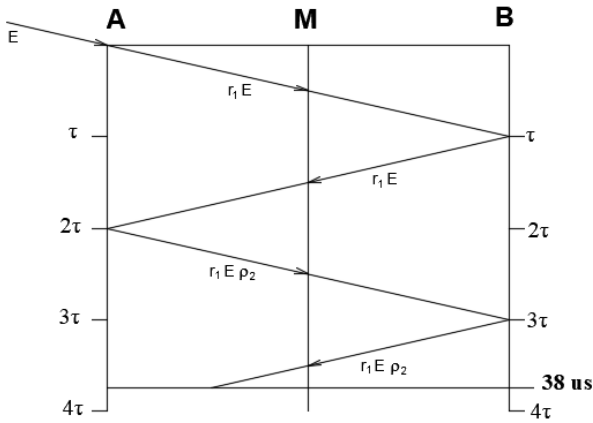


Figura 3. Diagrama de reflexiones calculado.
Fuente: Autores

A partir del diagrama anterior se obtienen los perfiles de tensión, como se indica a continuación.

- Perfil de tensión para el punto A

Intervalo de 0τ a 2τ

$$r_1 E = 5.962k \quad (15)$$

Intervalo de 2τ a 4τ

$$2(r_1 E) + \rho_2 r_1 E = 2(5.962) + (0.4028 * 5.962) = 14.3325kV \quad (16)$$

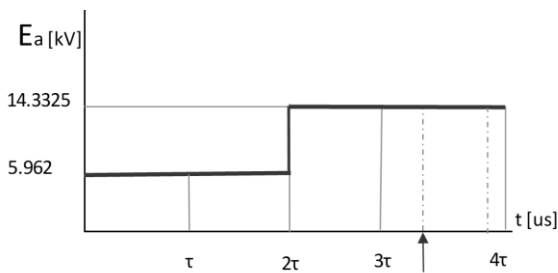


Figura 4. Perfil de tensiones en punto A calculado.
Fuente: Autores

Perfil de tensión para el punto B

Intervalo de τ a 3τ

$$2(r_1 E) = 2(5.962) = 11.924kV \quad (17)$$

Intervalo de 3τ a 4τ

$$2(r_1 E) + 2(\rho_2 r_1 E) = 11.924 + 2 * (0.40288 * 5.962) = 16.73kV \quad (18)$$

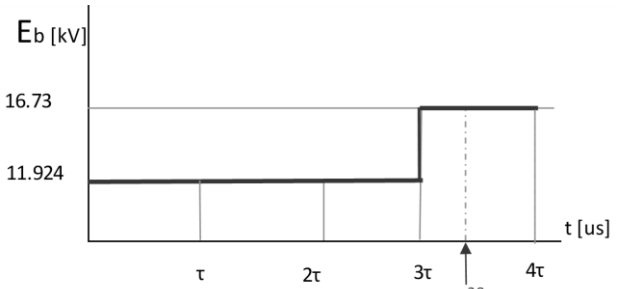


Figura 5. Perfil de tensiones punto B calculado.
Fuente: Autores

Consecuentemente, en el punto M sería

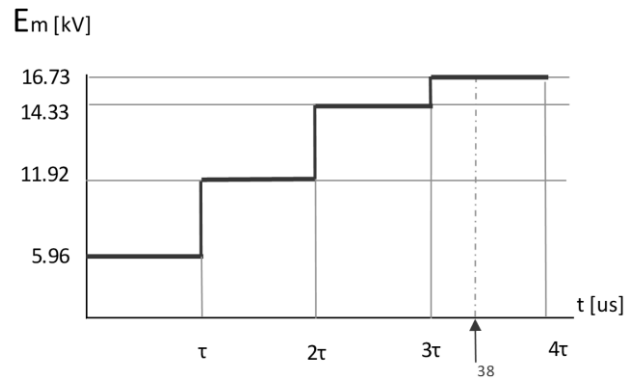


Figura 6. Perfil de tensiones punto M calculado.
Fuente: Autores

Con la finalidad de validar los resultados obtenidos como resultado del estudio analítico se realiza la simulación respectiva (A los 38 us) empleando la herramienta ATPDraw® [10] con lo cual se obtiene un resultado como el mostrado en la Figura 8.

Si el lector desea profundizar en el uso de la herramienta informática empleada se recomienda remitirse a fuentes como [11], donde se detalla como representar los diferentes elementos de un sistema eléctrico en ATPDraw®, lo cual no comprende al alcance del presente trabajo.

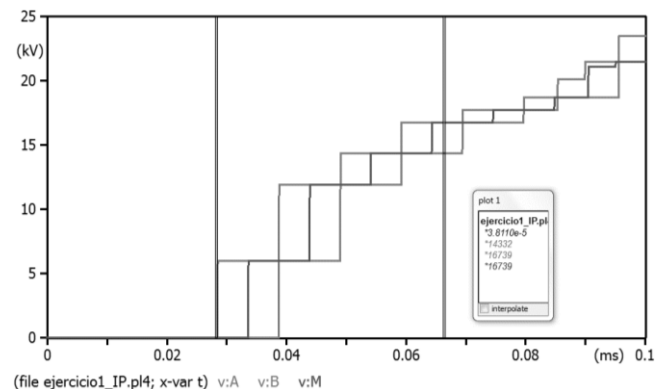


Figura 8. Perfil de voltajes puntos A, B y M obtenidos en ATPDraw.
Fuente: Autores

IV. DISCUSIÓN

A partir de los resultados obtenidos en el apartado anterior es posible realizar la comparación de los mismos, es decir de los obtenidos luego del desarrollo analítico y los arrojados por la herramienta informática; en función de ello se determina el porcentaje de error, el cual como se evidencia en la Tabla 1 es inferior al 0.1%. A partir de ello se pueden inferir las conclusiones indicadas en el apartado siguiente.

Tabla 1. Porcentaje de error de los resultados calculados versus los obtenidos en la simulación

Punto de la red bajo análisis	Error (%)
A	0.069
M	0.015
B	0.021

Fuente: Autores

V. CONCLUSIONES

En el presente artículo se ha mostrado un desarrollo metodológico analítico para el cálculo de sobretensiones, aplicable en circunstancias análogas al caso de estudio planteado, es decir, en una transición de una línea de transmisión aérea desnuda a aislada (normalmente subterránea). Éste permite obtener de una manera simplificada los resultados alcanzados en una simulación realizada a través de la herramienta computacional ATPDraw®.

Se ha alcanzado un alto grado de proximidad en los resultados prescindiendo de la herramienta informática necesaria para este efecto cuando la complejidad del caso de estudio analizado, lo que nos permite inferir que sucederá lo mismo para sus análogos, y de esta manera ha sido posible comprender la dinámica asociada a los parámetros que pueden tener una influencia decisiva en muchas de las sobretensiones presentes en un sistema eléctrico de potencia, lo que se perfila como una herramienta de gran utilidad para los operadores de la red en cuanto a la comprensión de la interrelación de las variables involucradas en el fenómeno de sobretensiones se refiere.

Para evidenciar la efectividad de la metodología planteada los resultados del cálculo analítico han sido sometidos a un proceso de contraste con los obtenidos utilizando una herramienta computacional de amplia trayectoria en el estudio de sobretensiones eléctricas (ATPDraw®). Como resultado de dicha comparación se evidenciará un error menor al uno por ciento, lo que en términos prácticos puede considerarse como nulo, con lo cual queda validada el desarrollo metodológico analítico planteado.

AGRADECIMIENTOS

El autor Iván Pazmiño Ordóñez expresa su agradecimiento a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) de la República del Ecuador, cuya financiación (Contrato N°: CZ02-000683-2018) ha hecho posible el su formación de postgrado, cuyos resultados parciales se documentan en el presente trabajo.

El autor Hugo Pico Mera expresa su agradecimiento a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT) de la República del Ecuador, cuya financiación (Contrato N°: CZ04-000673-2018) ha hecho posible su formación de postgrado, cuyos resultados parciales se documentan en el presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] H. Liu, X. Zeng, Y. Wang, and F. Peng, "Research on travelling wave transmission characteristics in distribution network," *China Int. Conf. Electr. Distrib. CIED*, no. Ciced, pp. 1–5, 2012, doi: 10.1109/CIED.2012.6508489.
- [2] V. F. Couto, S. H. L. Cabral, T. I. A. H. Mustafa, and L. H. B. Puchale, "Study of occurrence of overvoltage along power transmission lines with acceptable end voltage," *33rd Electr. Insul. Conf. EIC 2015*, no. June, pp. 29–32, 2014, doi: 10.1109/ICACACT.2014.7223503.
- [3] J. Martínez, *Coordinación de Aislamiento en Redes Eléctricas de Alta Tensión*. 2007.
- [4] S. Wang, Y. Fan, J. Wang, Z. Kong, L. Cai, and D. Lu, "Waveform analysis of lightning induced overvoltages on 10 kv distribution lines," *2019 11th Asia-Pacific Int. Conf. Light. APL 2019*, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/APL.2019.8816027.
- [5] L. He, Z. Wang, H. Liu, and T. Chen, "A double terminal traveling wave ranging method of overhead line - Submarine cable hybrid line," *Proc. IECON 2017 - 43rd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 2017-Janua, pp. 16–20, 2017, doi: 10.1109/IECON.2017.8216007.
- [6] F. Deng, X. Li, and X. Zeng, "Single-ended travelling wave protection algorithm based on full waveform in the time and frequency domains," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 15, pp. 3680–3691, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1730.
- [7] L. van der Sluis, *Transients in power systems*, vol. 252, no. 5. 2001.
- [8] B. Datta and S. Chatterjee, "Simulation of Bewley's lattice diagram using MATLAB," *2013 IEEE 1st Int. Conf. Cond. Assess. Tech. Electr. Syst. IEEE CATCON 2013 - Proc.*, pp. 11–16, 2013, doi: 10.1109/CATCON.2013.6737466.
- [9] L. Yu, "Quick Evaluation of Voltage Surge in Electrical Power Systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 2, pp. 379–383, 1995, doi: 10.1109/28.370288.
- [10] E. Haginomori, T. Koshiduka, J. Arai, and H. Ikeda, *Power System Transient Analysis*. Southern Gate,; Wiley, 2016.
- [11] E. Haginomori, T. Koshiduka, J. Arai, and H. Ikeda, *Power System Transient Analysis*. Southern Gate: Wiley, 2016.



Iván Patricio Pazmiño Ordóñez, Ingeniero Eléctrico, Escuela Politécnica Nacional, 2015. M.Sc. Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Madrid, 2019. Actualmente se desempeña como Docente en la Carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad

Laica Eloy Alfaro de Manabí.



Edwin Bernardo Ponce Minaya, Ingeniero Eléctrico, Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM), 1993. M.Sc. Gestión Ambiental, ULEAM, 2014, Master en Administración de Empresas MBA, ULEAM, 1999. Actualmente se

desempeña como Director y Docente de la Carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Ecuador.



Hugo Adrián Pico Mera, Ingeniero Eléctrico, Universidad Técnica de Manabí, 2013. Master Universitario en Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Madrid, 2019.

En la actualidad se desempeña como Líder de Planificación Subrogante en la Corporación Nacional de Electricidad Empresa Pública (CNEL EP) Unidad de Negocios Manabí.