



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Perfiles transitorios de tensión en líneas híbridas y cables de potencia de alta tensión de corriente directa

Voltage transient profiles on hybrid lines and high voltage DC power cables

Calderón-Cruz, C.I.¹, Hernández-Flores, V.H.¹, Tejada-Martínez, C.¹, Espino-Cortés, F.P.¹, Nuricumbo-Guillén, R.²

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica SEPI ESIME ZAC. Instituto Politécnico Nacional Ciudad de México, México.

²Departamento de Ciencias de la Escuela de Ingeniería y Ciencias Tecnológico de Monterrey Campus Ciudad de México. Ciudad de México, México.

ccalderon1000@alumno.ipn.mx; huggepro@hotmail.com; ctejadam@ipn.mx; fespinoc@ipn.mx; rodrigo.ng@tec.mx

Innovación tecnológica: Cálculo de perfiles transitorios de tensión en líneas de sistemas HVDC.

Área de aplicación industrial: Análisis de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión

Recibido: 28 marzo 2022

Aceptado: 15 agosto 2022

Abstract

As the demand for electricity grows, transmission lines will have to increase their capacity. One option to meet this need is to transmit with high voltage direct current (HVDC) lines, which in many cases have also proven to be the most suitable transmission option for the integration of renewable energies into the power grid. Although this technology is not new, it can be considered that has not yet been adopted on a large scale, so there are still unexplained phenomena that can be studied to identify the operation of HVDC systems. One of the phenomena that requires further studies is the transient behavior in this type of line. In this work it is proposed to use voltage profiles to determine internal overvoltages that occur in HVDC system lines. By applying the inverse numerical Laplace transform (NLT) in succession the transient voltage over the entire length of direct current transmission systems, including hybrid overhead lines and power cables, is determined. Two transient voltage profiles are modelled a ground fault and an atmospheric discharge. The results show overvoltage conditions that can occur at

intermediate points on the lines, which is not usually investigated in typical simulations using commercial electromagnetic transients analysis packages.

Keywords: Electromagnetic Induction, HVDC, CSC, Hybrid line, Electromagnetic transients, Voltage profiles.

Resumen

Ante el crecimiento de la demanda de energía eléctrica, las líneas de transmisión deberán aumentar su capacidad. Una opción para atender esta necesidad es el transmitir con sistemas de corriente directa en alta tensión (HVDC por sus siglas en inglés), las cuales en muchos casos también han demostrado ser la opción de transmisión más adecuada para la integración de las energías renovables a la red eléctrica. Aunque esta tecnología no es nueva, se puede considerar que su aplicación aún no ha sido adoptada a gran escala, por lo que todavía existen fenómenos que requieren ser estudiados para identificar cómo pueden afectar el funcionamiento de los sistemas HVDC. Uno de los fenómenos que se requiere seguir estudiando es el comportamiento transitorio en este tipo de líneas. En este trabajo, se propone utilizar perfiles de tensión para determinar sobretensiones internas que ocurren en líneas de sistemas HVDC. Aplicando la transformada numérica inversa de Laplace de manera sucesiva se determina la tensión transitoria sobre toda la longitud de sistemas de transmisión de corriente directa, incluyendo líneas aéreas híbridas y cables de potencia. Se modelan dos fenómenos transitorios, una falla a tierra y una descarga atmosférica. Los resultados muestran condiciones de sobretensión que pueden ocurrir en puntos intermedios de la línea, algo que no suele ser investigado en simulaciones típicas con el uso de paquetes comerciales para el análisis de transitorios electromagnéticos.

Palabras Clave: Inducción electromagnética, HVDC, CSC, Línea híbrida, Transitorios electromagnéticos, Perfiles de tensión.

I. INTRODUCCIÓN

Con el continuo crecimiento en el consumo de energía se espera que la demanda de energía eléctrica se duplique para el año 2050 [1]. En consecuencia, los sistemas eléctricos de potencia deberán seguir creciendo para poder cubrir dicha necesidad, además, esto se debe lograr aprovechando de manera más eficiente los recursos y reduciendo el impacto ambiental. Para lograr lo anterior se buscan nuevas técnicas para la generación, transmisión y distribución que permitan suministrar energía eléctrica a un bajo costo y de manera eficiente.

En la parte de transmisión, la solución más evidente es construir más líneas eléctricas, sin embargo, es muy complicado obtener

nuevos derechos de vía, por lo que se buscan otras alternativas que permitan incrementar la capacidad de transmisión de las líneas ya instaladas. En [2] se propone que la forma más eficiente de aprovechar las líneas de transmisión existentes es cambiar los circuitos de corriente alterna (CA) a corriente directa (CD), por lo que varios sistemas eléctricos de potencia están comenzando a adoptar esta técnica [3]. Sin embargo, esta opción es económicamente costosa por lo que, en ocasiones, en sistemas de doble circuito de CA se opta por cambiar solo un circuito de CA a CD. Cuando se hace esto, los circuitos de CD y CA comparten el mismo derecho de vía o incluso la misma torre, de suceder lo último a esta línea de transmisión se le denominaría línea híbrida.

Uno de los problemas al tener una línea de transmisión híbrida es la interferencia electromagnética que ambas líneas pueden provocarse entre sí. Una línea de CD genera un bajo nivel de tensión inducida, sin embargo, en condiciones de falla esta puede superar la tensión inducida provocada por una línea de CA [4], lo que podría provocar niveles de tensión que pueden poner en peligro la integridad del sistema de aislamiento. Adicionalmente, la interferencia electromagnética que genera la línea de CA puede provocar problemas en el sistema HVDC como la saturación de los transformadores de los convertidores [5], [6].

Por otro lado, varios de los nuevos sistemas de HVDC están siendo instalados con cables de potencia, ya sea subterráneos o submarinos. Dependiendo de las características del sistema, se requiere la implementación del convertidor de fuente de corriente (CSC por sus siglas en inglés) o el convertidor de fuente de tensión (VSC), para este artículo se utilizaron los convertidores de tipo CSC. Un problema particular de los cables extruidos es que en caso de ocurrir algún transitorio que pudiera provocar una inversión de la polaridad de la señal de tensión de CD, la posible existencia de carga espacial dentro del aislante del cable puede provocar la ruptura del material [7].

Cuando la polaridad de la tensión aplicada al cable es invertida, el gradiente del campo eléctrico dentro del material dieléctrico del cable también se invierte. La carga espacial acumulada depende de la polaridad y la magnitud de la tensión aplicada, al ocurrir la inversión de polaridad la distribución y

polaridad de la carga espacial afecta directamente a la nueva distribución del campo eléctrico y viceversa. La carga acumulada no puede cambiar instantáneamente la polaridad, por lo tanto, genera su propio campo eléctrico el cual resulta superpuesto al nuevo campo eléctrico generado por la nueva polaridad de la tensión externa. Por consiguiente, el aislante principal está sometido a un alto gradiente de campo eléctrico que podría generar descargas parciales, así como la reducción de la vida útil del cable [8].

En este trabajo se obtienen perfiles de tensión con los cuales es posible observar el comportamiento de la tensión sobre la longitud total de la línea o cable, en caso de ocurrir algún fenómeno transitorio. Lo anterior permite observar sobretensiones o inversiones de polaridad en toda la línea, algo que no es posible obtener con los paquetes especializados para el análisis de transitorios electromagnéticos existentes actualmente. La aplicación de esta metodología en líneas híbridas se vuelve relevante por la necesidad de determinar cuáles son las secciones con máxima interferencia entre circuitos, mientras que en cables de sistemas HVDC es útil para identificar las secciones con posibles inversiones de polaridad.

II. MODELADO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

En seguida, se describe el modelo de línea utilizado en este trabajo para obtener los perfiles. Las ecuaciones del telegrafista para una línea de transmisión se pueden expresar de forma matricial en el dominio espacio-tiempo como:

$$\frac{\partial}{\partial x} \begin{bmatrix} v(x, t) \\ i(x, t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -R \\ -G & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(x, t) \\ i(x, t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -L \\ -C & 0 \end{bmatrix} \frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} v(x, t) \\ i(x, t) \end{bmatrix} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

➤ L es la matriz inductancia serie por unidad de longitud, con dimensión

$n \times n$, donde n es el número de conductores del arreglo.

- C es la matriz de capacitancia en derivación por unidad de longitud, con dimensión $n \times n$.
- R es la matriz de resistencia serie por unidad de longitud, con dimensión $n \times n$.
- G es la matriz de conductancia en derivación por unidad de longitud, con dimensión $n \times n$.

- 0 es una matriz de ceros con dimensión $n \times n$.
- $v(x, t)$ e $i(x, t)$ son vectores columna de dimensión $n \times 1$ que representan la tensión y corriente a lo largo de la línea.

Aplicando la transformada de Laplace a (1) respecto a la variable “ t ” se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{d}{dx} \begin{bmatrix} V(x, s) \\ I(x, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -Z \\ -Y & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(x, s) \\ I(x, s) \end{bmatrix} \quad \text{(Ec. 2)}$$

Que son las ecuaciones del telegrafista en el dominio espacio—frecuencia temporal (x, s) , ahora como un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias de primer orden y donde:

- La impedancia serie Z se define como $Z = R + sL$, y la admitancia en derivación Y como $Y = G + sC$.

Aplicando una segunda transformada de Laplace respecto a la variable “ x ” y por medio de manipulación algebraica es posible obtener un conjunto de ecuaciones algebraicas como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} V(q, s) \\ I(q, s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} qU & Z \\ Y & qU \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_0(s) \\ I_0(s) \end{bmatrix} \quad \text{(Ec. 3)}$$

Donde:

- q es la variable de Laplace correspondiente a la frecuencia espacial.
- U una matriz identidad de dimensión $n \times n$.
- $V_0(s)$ e $I_0(s)$ son vectores columna de dimensión $n \times 1$ y representan las tensiones y corrientes en el dominio de la frecuencia al principio de la línea, respectivamente.

Partiendo de conocer tensión y corriente al principio de la línea ($V_0(s)$ e $I_0(s)$) y utilizando (3) se observa que es posible

calcular estas variables en el dominio q - s ($V(q, s)$ e $I(q, s)$) $V_0(s)$ $I_0(s)$.

$$\begin{bmatrix} V_0(s) \\ V_L(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + Y_S & -B \\ -B & A + Y_L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{0i}(s) \\ I_{Li}(s) \end{bmatrix} \quad \text{(Ec. 4)}$$

Donde:

$$A = Y_0 \coth(\psi l) \quad \text{(Ec. 5)}$$

$$B = Y_0 \operatorname{csch}(\psi l) \quad \text{(Ec. 6)}$$

$$Y_0 = \sqrt{Z^{-1}Y} \quad \text{(Ec. 7)}$$

$$\psi = \sqrt{ZY} \quad \text{(Ec. 8)}$$

Además Y_S , Y_L son las admitancias conectadas al principio y al final de la línea (nodo emisor y nodo receptor), respectivamente, “ l ” representa la longitud total de la línea, mientras que $I_{0i}(s)$ e $I_{Li}(s)$ son las corrientes inyectadas en los nodos emisor y receptor, respectivamente.

Por otro lado, de acuerdo con la representación de una línea de transmisión en un circuito PI podemos para hallar $I_0(s)$ de acuerdo con:

$$I_0(s) = AV_0(s) - BV_L(s) \quad \text{(Ec. 9)}$$

Los perfiles de tensiones y corrientes de la línea en el dominio $q-s$ se obtienen resolviendo (3). Sin embargo, puede ser muy difícil interpretar los resultados obtenidos directamente de (3), por lo que utilizando la transformada numérica de Laplace inversa (TNLI) de manera sucesiva [10], [11], [12], éstos se llevan al dominio del espacio-tiempo, en donde pueden ser analizados con facilidad.

En este trabajo, los parámetros de la línea aérea y del cable son considerados dependientes de la frecuencia, lo anterior es una característica importante del modelo empleado para el cálculo de los perfiles. En el caso de la línea aérea híbrida los parámetros fueron calculados aplicando el método de imágenes complejas para una línea multiconductora [13], y para el cable los parámetros se determinan mediante aproximaciones analíticas que incluyen la dependencia frecuencia (Wedepohl/Wilcox [14], Schelkunoff [15] para obtener las impedancias en los cables coaxiales, y Pollaczek [16] para el cálculo de la impedancia de retorno por tierra).

III. CASOS DE ESTUDIO

A continuación, se presentan diferentes casos de estudio utilizando un modelo con una línea de transmisión híbrida y otro modelo empleando un cable de potencia de HVDC. Para ambos modelos se simularon un caso donde se presenta una falla a tierra y otro caso donde se presenta una descarga atmosférica que impacta a la entrada de la línea.

A. Línea de transmisión híbrida bajo condiciones de falla a tierra en el circuito de CA.

Para el modelo de línea de transmisión híbrida se utilizó un sistema de CA de 320 kV de tensión de línea a línea, mientras que en la línea de CD se empleó un sistema CSC de 500 kV tal como se muestra en la Figura 1, la línea tiene una longitud de 100 km. La configuración de la línea se muestra en la Figura 2 al igual que las dimensiones del arreglo de conductores en la línea de transmisión, todos los conductores del arreglo se consideraron con un radio de 1.595 cm y una resistencia en CD del conductor de 0.035957 ohm/km, la resistividad del terreno se consideró de 100 ohm*m, se consideraron dos conductores por fase y polo con una separación entre éstos de 0.4 m. Utilizando el paquete PSCAD/EMTDC se implementa la línea híbrida con un circuito HVDC con convertidores a base de tiristores, del cual se obtienen las magnitudes de tensión y corriente al principio y final de la línea. En este modelo de línea híbrida en PSCAD/EMTDC se simula una falla sólida a tierra a mitad de la línea de CA en la fase A, las señales en los extremos de la línea son transformadas al dominio de la frecuencia a través de la TNL directa, para después formular y resolver la ecuación (3), al resultado se le aplica la TNLI sucesiva. Por último, se realiza un post-procesamiento para obtener las gráficas que representan los perfiles de tensión.

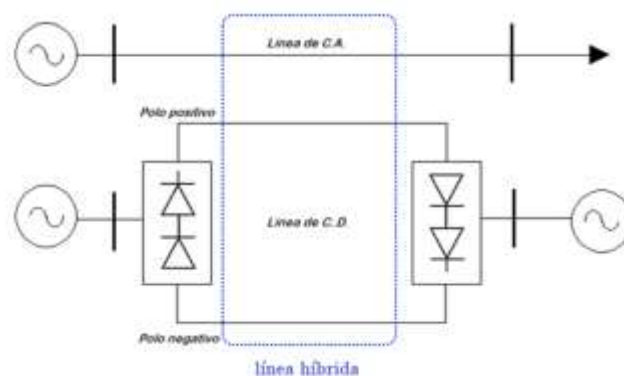


Figura 1. Modelo de la línea híbrida.

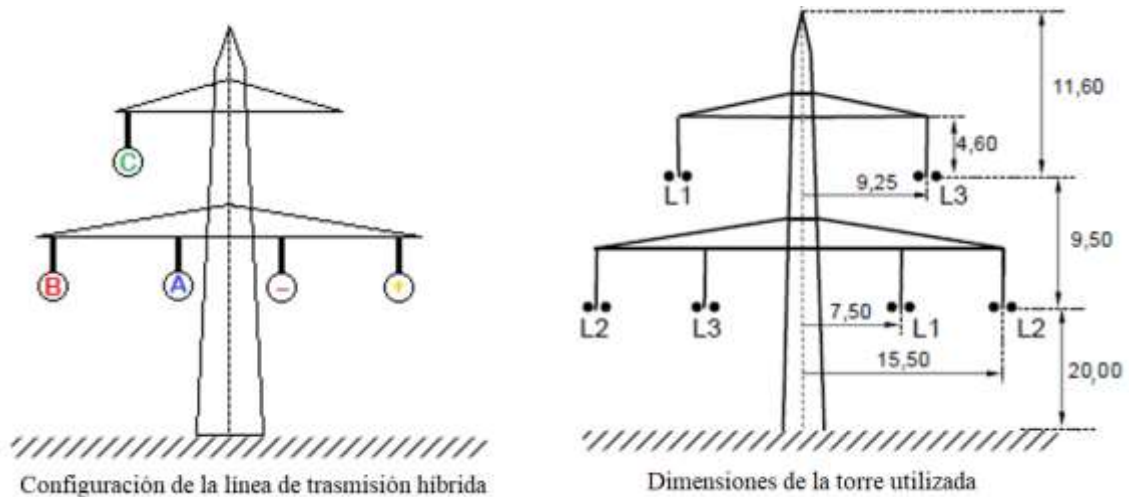


Figura 2. Configuración y dimensiones de la línea de transmisión híbrida (medidas dadas en metros).

Los perfiles de tensión para las fases A, B y C se muestran en las Figuras 3, 4 y 5, respectivamente. El sistema se encuentra bajo una condición estable, luego la falla ocurre en la fase A en 0.02 segundos y en 0.07 segundos se libera la misma, reestableciéndose el flujo de corriente. La Figura 3, para la fase A, permite ver como desde el punto de falla hasta el final de la línea la tensión tiende a cero durante ese intervalo de tiempo. Además, se observa una sobretensión a lo largo de la línea en el momento que se libera la falla, cabe mencionar que el modelo utiliza fuentes ideales en la línea de CA por lo que la tensión no se abate al principio de la línea;

esta tensión ira disminuyendo de valor conforme se avanza hacia el punto de falla, a 50 km del nodo emisor.

Por otro lado, las fases B y C tienen un comportamiento muy similar entre sí, al momento de la falla (0.02 s) aparece una sobretensión en ambas fases, la cual ira incrementando ligeramente hasta el momento de la liberación de la falla, esto se debe a que en el momento de la falla los conductores de la línea de CD generan una interferencia electromagnética que va creciendo con el tiempo hasta el instante en el que la falla se libera.

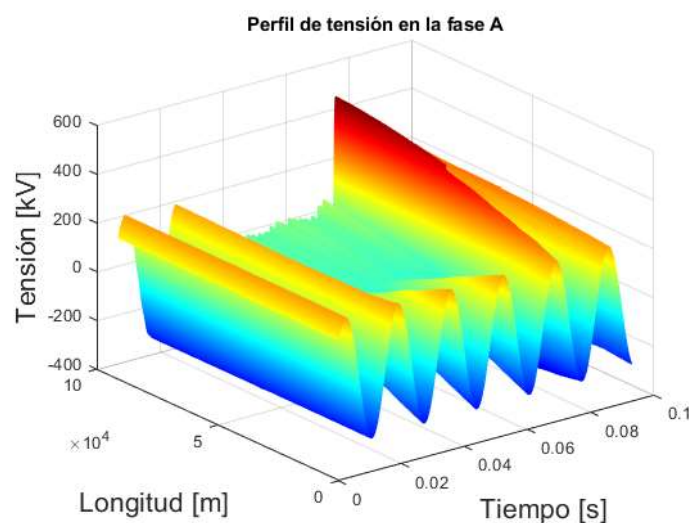


Figura 3. Perfil de tensión en la fase A ante una falla monofásica (en la fase A) en la línea híbrida.

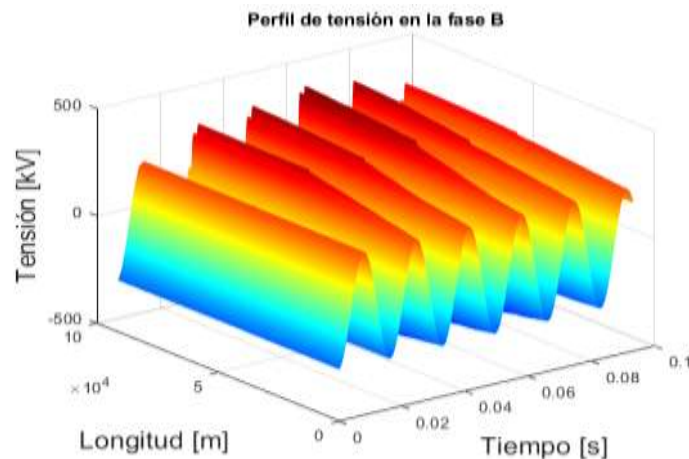


Figura 4. Perfil de tensión en la fase B ante una falla monofásica en la fase A de la línea híbrida.

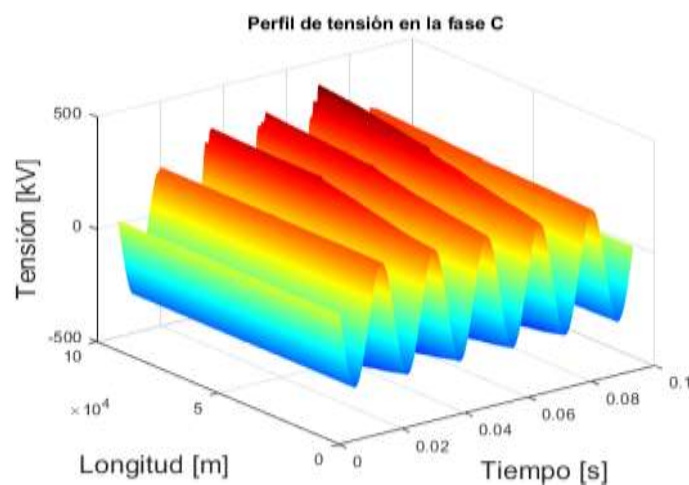


Figura 5. Perfil de tensión en la fase C ante una falla monofásica en la fase A de la línea híbrida.

En la Figura 6 se muestra el perfil de tensión a lo largo del polo positivo de la línea de CD. Se puede observar que la falla en la fase A genera una sobretensión a lo largo de la línea de CD que va incrementando hasta el momento de la liberación de la falla; cabe

señalar que la sobretensión alcanza un valor máximo de aproximadamente 800 kV en el punto de falla ubicado en el centro de la línea. El polo negativo presenta un comportamiento similar (Figura 7).

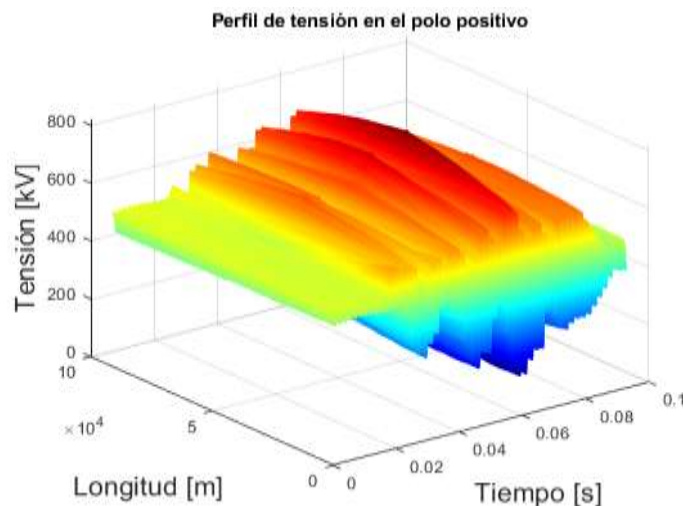


Figura 6. Perfil de tensión en el polo positivo ante una falla monofásica en la fase A de la línea híbrida.

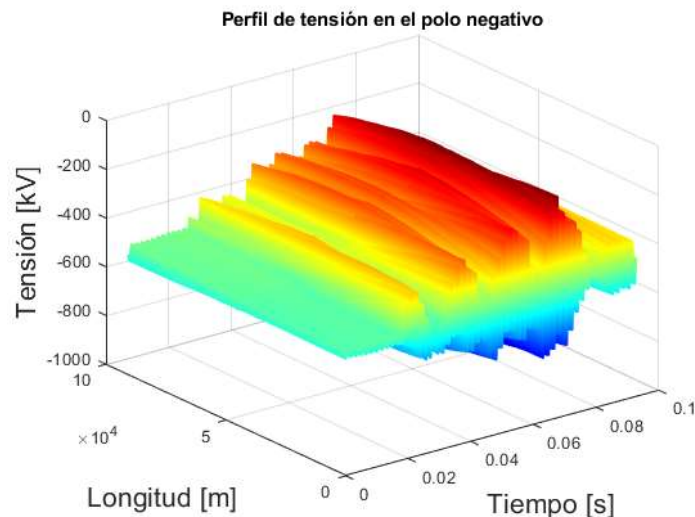


Figura 7. Perfil de tensión en el polo negativo ante una falla monofásica en la fase A de la línea híbrida.

Como método de validación de los perfiles de tensión obtenidos, se realizó una simulación del sistema utilizando el programa PSCAD/EMTDC y se obtuvieron mediciones de tensión en un punto específico de la línea a 37.67 km del nodo

transmisor del polo positivo. La comparación de la respuesta obtenida del perfil de tensión con la respuesta de PSCAD/EMTDC se presenta en la Figura 8, el alto grado de coincidencia entre los dos resultados es claro.

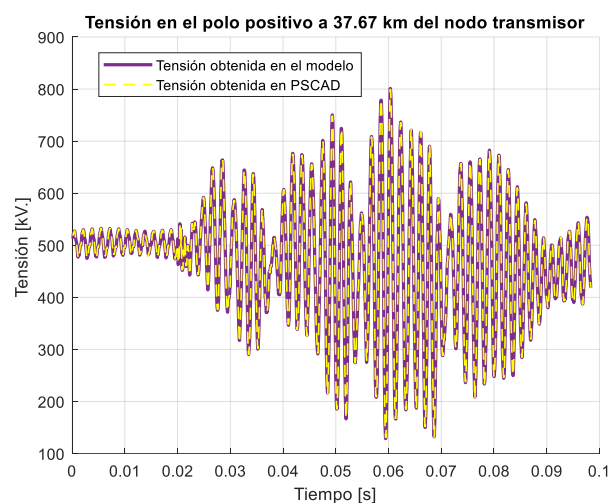


Figura 8. Validación del modelo ante una falla monofásica en la fase A. Tensión en el polo positivo a 37.67 km. del nodo transmisor.

B. Línea de transmisión híbrida bajo condiciones de falla a tierra en el circuito de CD.

En este caso se simula una falla a tierra a los 0.02 segundos a 50 km del nodo emisor en el polo negativo de la línea de CD, la cual nuevamente se libera a los 0.07 segundos. En las Figuras 9, 10 y 11 se presentan los perfiles de tensión obtenidos para las fases

A, B y C respectivamente. Se puede observar que las tres fases presentan un comportamiento similar entre sí; al momento de la falla se presenta una sobretensión en las tres fases debido a la tensión inducida que genera la línea de CD la cual ira disminuyendo con el tiempo, sin embargo, la sobretensión en la fase A es mayor que el resto de fases alcanzando los

450 kV, esto se debe a que la inducción más grande que provoca la línea de CD ocurre en

el instante de la falla y la tensión en la fase A pasa cerca de su valor máximo.

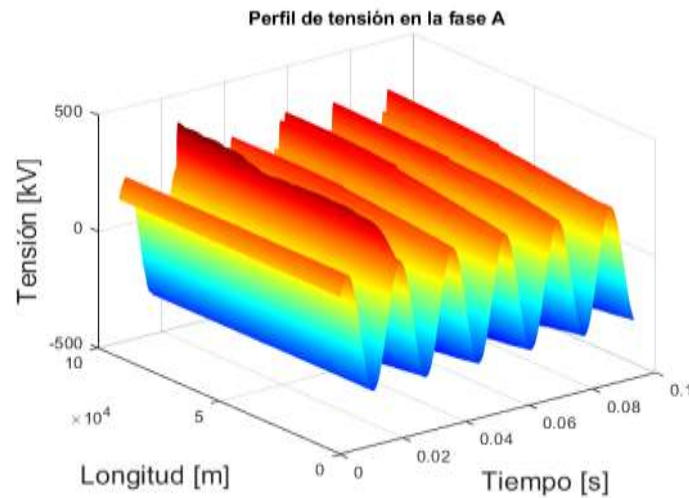


Figura 9. Perfil de tensión en la fase A ante una falla en el polo negativo de la línea híbrida.

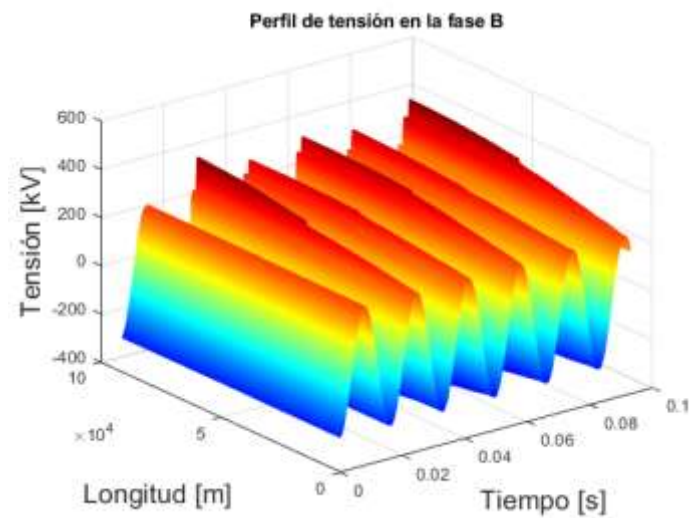


Figura 10. Perfil de tensión en la fase B ante una falla en el polo negativo de la línea híbrida.

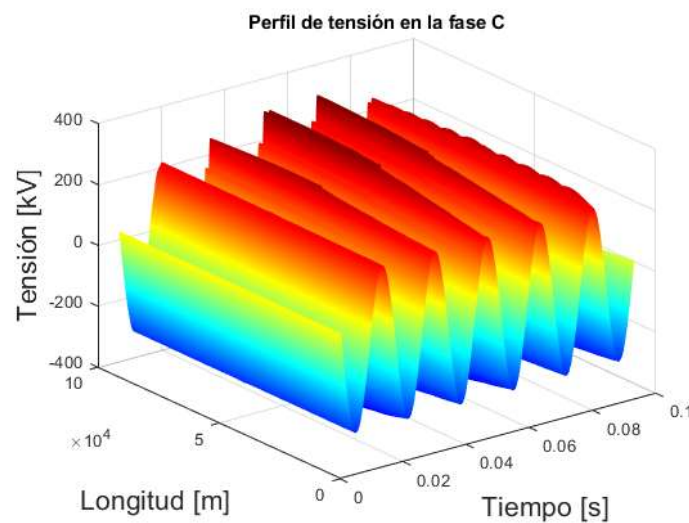


Figura 11. Perfil de tensión en la fase C ante una falla en el polo negativo de la línea híbrida.

La Figura 12 presenta el perfil de tensión obtenido para el polo positivo, se puede observar que al ocurrir la falla existe una sobretensión importante de aproximadamente 700 kV, la cual es casi uniforme a lo largo de la línea, luego esta sobretensión se ira amortiguando cerca de su valor nominal, al liberarse la falla se observa que aparece otra sobretensión parecida a la tensión de arranque de los

convertidores. El perfil de tensión del polo negativo se muestra en la Figura 13, se aprecia que al momento de la falla existe un cambio de polaridad de la tensión, también esta tensión es más grande en los extremos de la línea, después comienza a amortiguarse hasta valores cercanos a cero y al liberarse la falla aparece al igual que en el polo positivo una tensión parecida al arranque de los convertidores.

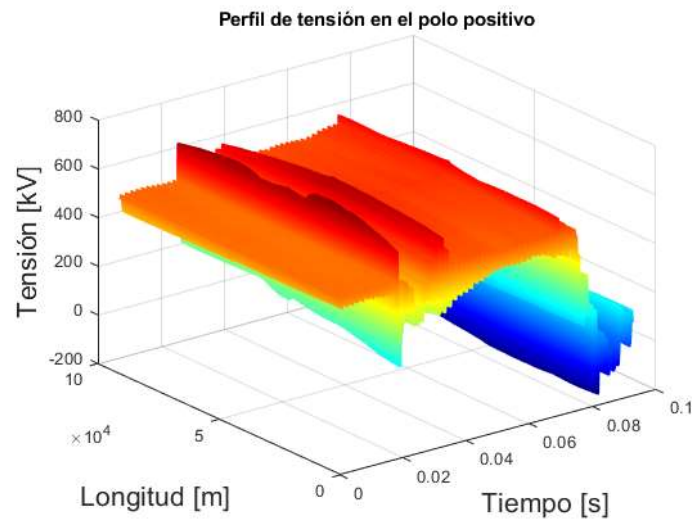


Figura 12. Perfil de tensión en el polo positivo ante una falla en el polo negativo de la línea híbrida.

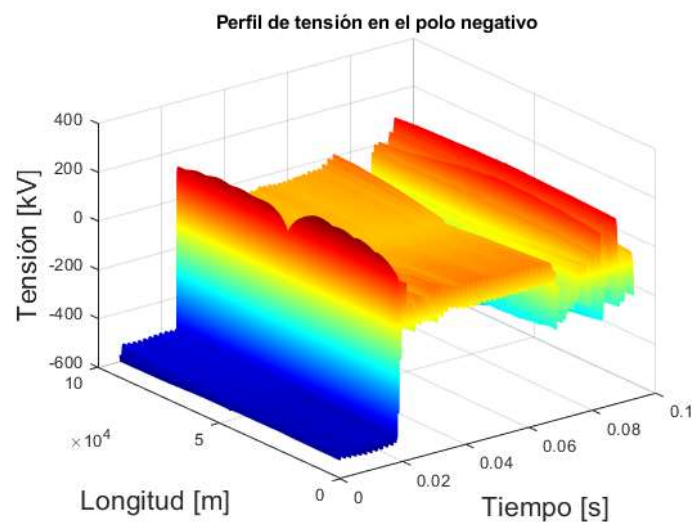


Figura 13. Perfil de tensión en el polo negativo ante una falla en el polo negativo de la línea híbrida.

C. Cable de potencia bajo condiciones de falla a tierra.

En este caso se modeló únicamente el sistema de CD de la Figura 1, sustituyendo la línea de transmisión aérea por una línea subterránea con cable coaxial de HVDC de

± 500 kV y 300 km de longitud; en la Figura 14 se muestran los datos del cable utilizado para el sistema de HVDC subterráneo. Los cables se consideraron a 1 m de profundidad, separados 1.5 m, y en un terreno con 100 ohms*m de resistividad.

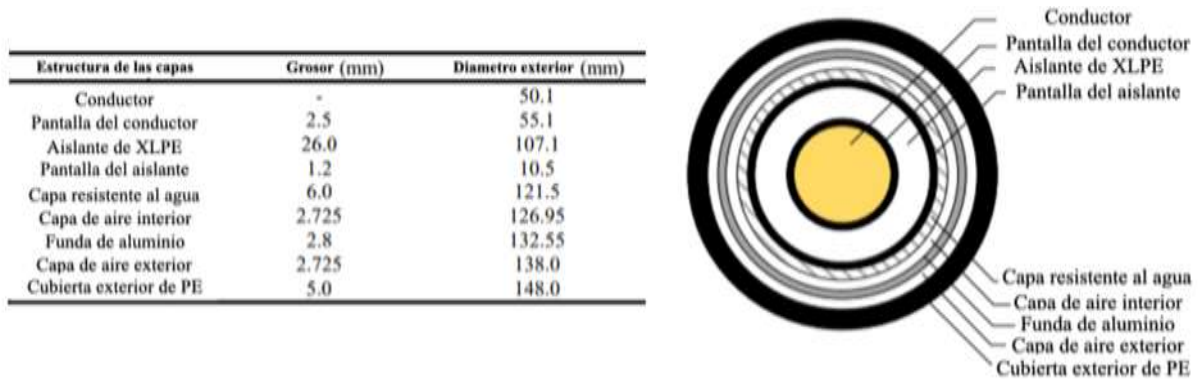


Figura 14. Datos del cable de XLPE-HVDC [13].

De la misma manera que para la línea aérea híbrida en este caso se utilizó PSCAD/EMTDC para modelar el sistema HVDC con cables y con convertidores a base de tiristores, En este caso se simuló una falla sólida a tierra a 120 km de la longitud del cable en el polo positivo a los 0.8

segundos de energización y con una duración de 50 ms. En la Figura 15, para validar el modelo, se compara las respuestas transitorias en un punto específico del cable obtenidas de PSCAD/EMTDC y del perfil de tensiones, como se puede ver las señales coinciden.

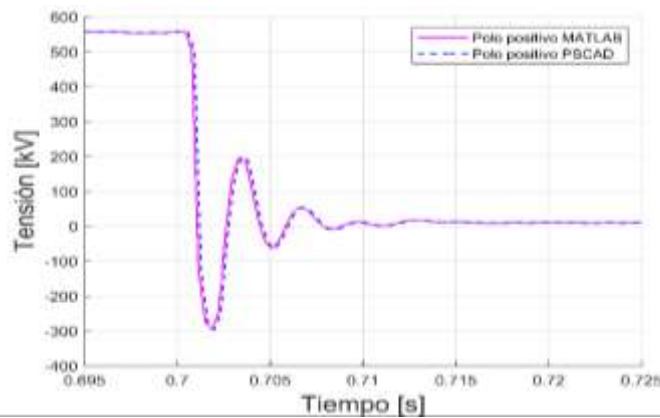


Figura 15. Validación del modelo ante una falla entre núcleo y pantalla a 210 km del nodo emisor.

En la Figura 16 se muestra el perfil de tensión de falla del polo positivo, en la cual se observa un abatimiento de la tensión a 120 km del cable, por otro lado, en los

extremos del cable se aprecia la forma de onda del transitorio en el cual se observa la inversión de polaridad a lo largo del cable.

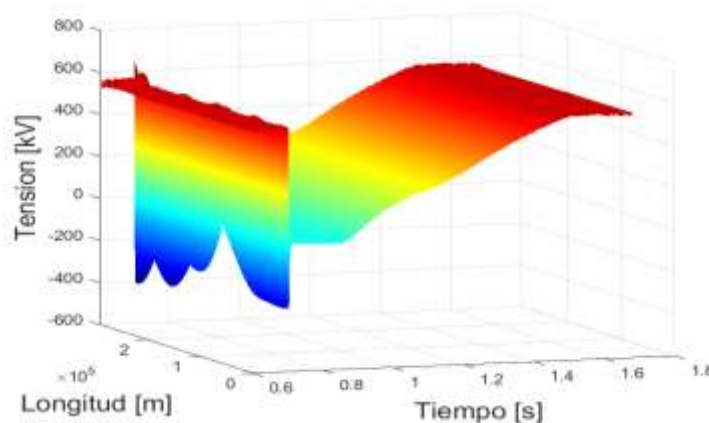


Figura 16. Perfil de tensión en el cable del polo positivo en condiciones de falla.

En la Figura 17 se muestra el perfil de tensión del polo negativo, se observa que sobre la longitud de la línea no hay una variación de tensión tan considerable como en el polo positivo. Sin embargo, por la naturaleza de los convertidores, la falla en el

polo positivo produce un transitorio reduciendo la tensión del polo negativo causado por el incremento de la corriente en el punto de falla afectando al control de apertura y cierre de los interruptores de los convertidores de CA/CD y CD/CA [14].

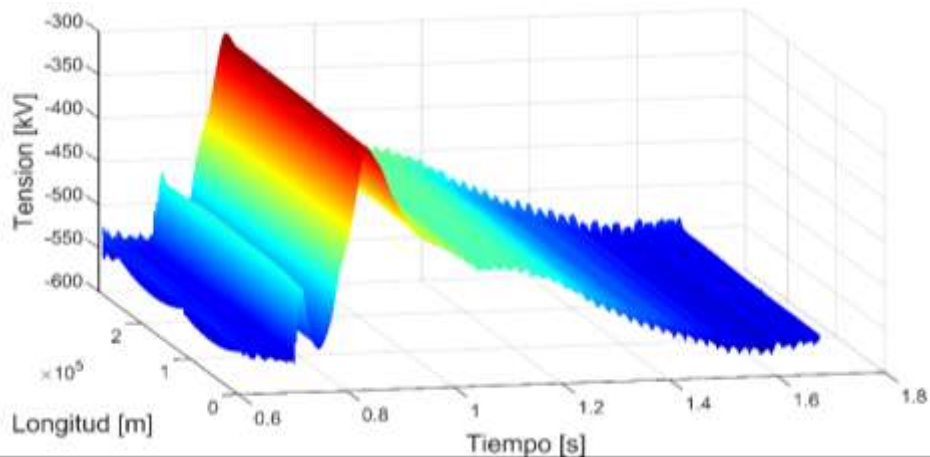


Figura 17. Perfil de tensión en el cable del polo negativo en condiciones de falla.

D. Cable de potencia bajo condiciones de descarga atmosférica.

En esta sección se simuló la incidencia de una descarga atmosférica a los 0.7 s con un valor pico de 1300 kV, el tiempo de frente de onda de $1.2 \mu\text{s}$ y un tiempo al valor medio de $50 \mu\text{s}$. La incidencia atmosférica al cable se estableció en el extremo receptor (subestación inversora) del sistema de CD mostrado en la Figura 1, esto para representar una descarga atmosférica en la transición del cable subterráneo a una línea aérea.

Del perfil de tensión del polo positivo, que se presenta en la Figura 18, se observa que a lo largo de la línea se tienen sobretensiones tanto positivas como negativas, también se observa que la sobretensión se atenúa a lo largo del cable. El transitorio genera un incremento considerable en la tensión positiva, la cual se atenúa conforme se aleja del punto de incidencia; también la descarga atmosférica causa una inversión de polaridad que afecta al campo eléctrico en el sistema de aislamiento del polo negativo, lo que puede conducir a la ruptura del aislamiento del cable.

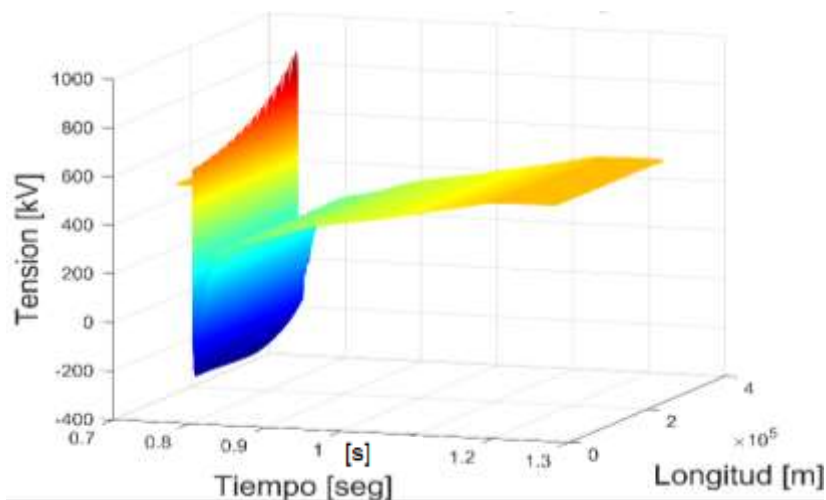


Figura 18. Perfil de tensión en el cable del polo positivo en condiciones de descarga atmosférica.

Cabe destacar que en caso de descarga atmosférica el valor pico de la inversión de polaridad no es a los 300 km donde ocurrió la descarga atmosférica, sino en un punto intermedio a lo largo del cable.

El perfil de tensión del polo negativo se presenta en la Figura 19, en este perfil de tensión, al igual que en el polo positivo, se observa un transitorio que provoca una sobretensión en el extremo del cable, sin embargo, no provoca inversión de polaridad.

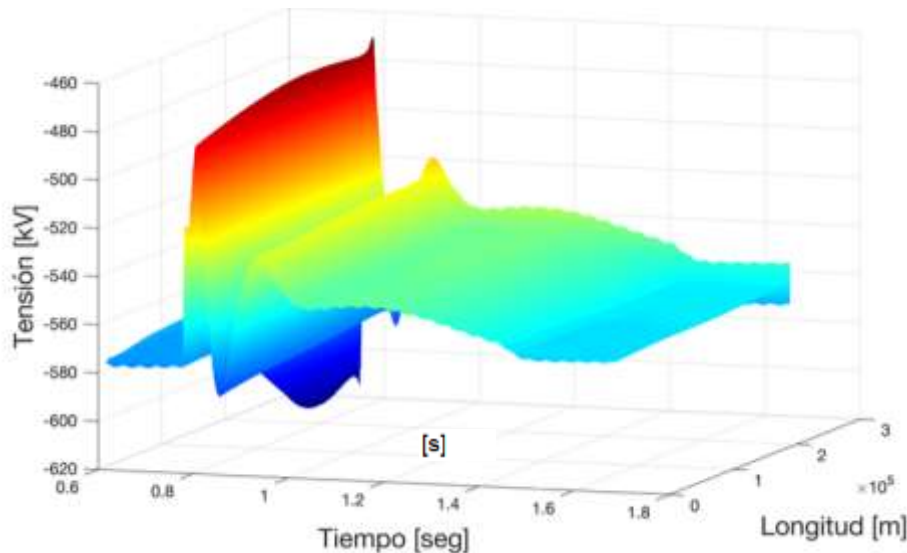


Figura 19. Perfil de tensión en el cable del polo negativo en condiciones de descarga atmosférica.

En la Figura 20 se presenta la tensión de la pantalla del polo positivo, en este perfil se observa que la incidencia de descarga atmosférica induce una tensión a la pantalla

del cable, aunque la tensión inducida no es del mismo nivel que la tensión aplicada, este nivel de tensión puede ser no aceptable en algunos casos.

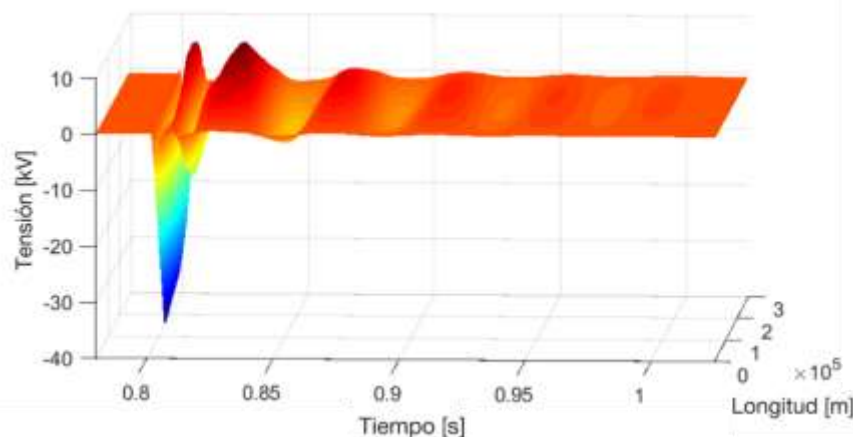


Figura 20. Perfil de tensión en la pantalla del cable del polo positivo en condiciones de descarga atmosférica.

La tensión en la pantalla del polo negativo se presenta en la Figura 21, en este perfil se observa un comportamiento muy similar al de la Figura 20, aunque con polaridad contraria. A los 0.7 s en el instante en el que ocurre la descarga se observa un transitorio

a lo largo de la línea con polaridad positiva; en las Figuras 20 y 21 se observa que el valor pico de la tensión a lo largo de la línea se presenta a una distancia de 250 km aproximadamente del punto de incidencia.

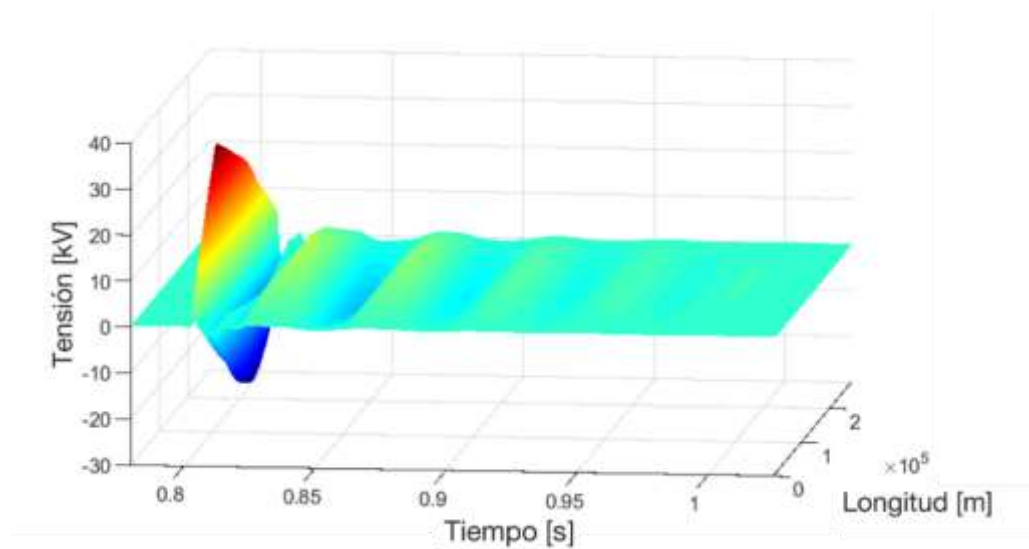


Figura 21. Perfil de tensión en la pantalla del cable del polo negativo en condiciones de descarga atmosférica.

Cabe destacar que la tensión inducida a lo largo de la línea empieza con un transitorio de polaridad contraria a la del conductor central. En las Figuras 20 y 21 se puede observar que la duración del transitorio de la tensión inducida en las pantallas de los conductores respecto al tiempo es notablemente menor respecto a las Figuras 18 y 19, esto debido a las mayores pérdidas en la pantalla.

IV. CONCLUSIONES

Se presenta una metodología para calcular perfiles transitorios de tensión en sistemas de transmisión híbridos (circuitos de alta tensión de CA y de CD en la misma torre) y en sistemas de cables HVDC en condiciones de falla a tierra y durante el impacto de una descarga atmosférica. Al determinar los perfiles de tensión transitorios, calculados con la transformada numérica de Laplace inversa, es posible visualizar la tensión sobre toda la longitud de la línea, lo que permitió llegar a los siguientes resultados:

- Para la línea de transmisión híbrida se observa que, en estado transitorio, la línea de CD puede provocar grandes tensiones inducidas, también cabe destacar que con el uso de perfiles se puede llegar a determinar en qué punto a lo largo de la línea ocurren las sobretensiones

más altas y también la polaridad de éstas.

- Para los cables de HVDC se puede observar que la inversión de polaridad es muy probable que ocurra en estado transitorio, es decir, en caso de que ocurra una falla a tierra o por incidencia de descarga atmosférica, esta condición genera un alto riesgo de falla del aislamiento en cables extruidos.
- Lo anterior muestra la gran utilidad que representa un modelo de perfiles transitorios de tensión para el estudio de líneas híbridas y de HVDC con cables.

V. Bibliografía

- [1] R. Valdez, “Evolución y crecimiento de la energía renovable en las empresas de generación eléctrica en México”, Tesis de maestría, CIEMAD—IPN, México. D.F. 2012, available: <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/27236>
- [2] Lundquist, J., Barthold, L. O., Beutel, A., Britten, A. C., Douglass, D. A., Iglesias, J., ... & Steevens, S. Working group, “Guide to the conversion of existing AC lines to DC operation”, CIGRE Technical Brochure 583-Working Group B2, vol. 41, 2014.

- [3] L. Barthold, R. Adapa, H. Clark y D. Woodford, "System advantages in conversion of AC transmission lines to DC", 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Londres Inglaterra, págs. 1-5, octubre 2010.
- [4] C. Calderón, C. Tejada, F. Espino y R. Nuricumbo, "Inducción electromagnética en una línea de transmisión híbrida" XIX Congreso Nacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, CDMX México, págs. 1-4, noviembre 2020.
- [5] S. Zhang, Y. Li, B. Liu, X. Shi, L. M. Tolbert y F. Wang, "HVDC converter transformer saturation in hybrid AC/DC system caused by coupled transmission lines", 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Tampa EUA, págs. 411-415, Marzo 2017.
- [6] E. M. Gralista, M. Gibescu y K. Velitsikakis, "On the Modelling of a Hybrid HVAC-HVDC Overhead Transmission Line: Techniques and Challenges", 2018 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE), Atenas Grecia, págs. 1-5, febrero 2018.
- [7] J. Hu, Z. He, L. Lin, K. Xu y Y. Qiu, "Voltage Polarity Reversing-Based DC Short Circuit FRT Strategy for Symmetrical Bipolar FBSM-MMC HVDC System", IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 6, núm. 3, págs. 1008-1020, septiembre 2018.
- [8] A. Imburgia et al., "Effect of Polarity Reversal on the Partial Discharge Phenomena", 2020 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), Nueva Jersey EUA, págs. 378-381, octubre 2020.
- [9] R. Nuricumbo, "Cálculo de perfiles transitorios a lo largo de sistemas de transmisión aplicando la transformada numérica de Laplace" Tesis de maestría, SEPI ESIME Zacatenco—IPN, México. D.F. 2014, available: <https://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/17875>
- [10] P. Moreno y A. Ramirez, "Implementation of the Numerical Laplace Transform: A Review Task Force on Frequency Domain Methods for EMT Studies, Working Group on Modeling and Analysis of System Transients Using Digital Simulation, General Systems Subcommittee, IEEE Power Engineering Society", in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, núm. 4, págs. 2599-2609, octubre. 2008.
- [11] P. Gómez y Felipe A., "The numerical Laplace transform: An accurate technique for analyzing electromagnetic transients on power system devices", ELSEVIER, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 31, núm. 2-3, págs. 116-123, 2008.
- [12] R. Nuricumbo, "Desarrollo de métodos en el dominio de la frecuencia para determinar perfiles transitorios a lo largo de líneas de transmisión uniformes y no uniformes" Tesis de Doctorado, SEPI ESIME Zacatenco—IPN, México. D.F. 2018, available: <https://tesis.ipn.mx/xmlui/handle/123456789/27081>
- [13] C. Gary, "Approche complète de la propagation multifilaire en haute fréquence par utilisation des matrices complexes" EDF Bull. Direction des Études et Rech, núm. 3-4, págs 5-20, 1976.
- [14] L. M. Wedepohl y D. J. Wilcox, "Transient Analysis of Underground Power Transmission Systems - System Model and Wave Propagation Characteristics" Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, vol. 120, núm 2, págs. 253-260, febrero 1973.

- [15] S. A. Schelkunoff, "The Electromagnetic Theory of Coaxial Transmission Lines and Cylindrical Shield" Bell System Technical Journal, vol. 13, págs. 532-579, octubre 1934.
- [16] F. Pollaczek, "Ueber das feld einer unendlich langen wechselstromdurchflossenen einfachleitung" Elektrische Nachrichtentechnik, vol. 3, núm 4, págs. 339-359, 1926.
- [17] Y. Liu, S. Zhang, X. Cao, C. Zhang y W. Li, "Simulation of electric field distribution in the XLPE insulation of a 320 kV DC cable under steady and time-varying states", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 25, núm. 3, págs. 954-964, junio 2018.
- [18] M. H. Rashid, "Power electronics handbook devices, circuits, and applications", ser. Academic Press. EL SEVIER, EUA, pág. 823, 2011.