

Análisis de Corrientes Corona en Línea Híbrida de Alta Tensión 320kV HVAC y ± 500 kV HVDC mediante configuración Punta-Plano

Martinez Ramos Jorge Miguel, Linares y Miranda Roberto, Espino Cortes Fermín Pascual

Departamento de Ingeniería Eléctrica SEPI ESIME ZAC.

Instituto Politécnico Nacional

Ciudad de México, México

Jmartinezr1507@alumno.ipn.mx

Resumen— En este trabajo se presenta un análisis de la corriente de corona en circuitos híbridos (CA/CD) de 320[kV] HVCA y ± 500 [kV] HVCD compartiendo la misma torre. El análisis de la torre se realiza mediante simulación con el software PSCAD, mientras la configuración punto-plano se lleva a cabo mediante el software COMSOL Multiphysics. Los resultados muestran un acoplamiento electromagnético entre ambos circuitos con campos eléctricos superpuestos. El problema presentado aún no ha sido ampliamente considerado, por lo que es un aporte que demuestra que el fenómeno de descarga corona tiene diferentes puntos de análisis, razón por la cual no ha dejado de ser importante en el diseño de circuitos híbridos de alta tensión.

Palabras Clave — Acoplamiento Electromagnético, Corriente Corona, Línea de Transmisión Híbrida.

Abstract — This paper presents an analysis of the corona current in hybrid circuits (AC/DC) of 320[kV] HVAC and ± 500 [kV] HVDC sharing the same tower. The analysis of the tower is performed through simulation with PSCAD software while the point-plane configuration is carried out using COMSOL Multiphysics software. The results show an electromagnetic coupling between both circuits with electric fields produced overlapping. The problem presented has not yet been considered, so it is a contribution that shows that the corona discharge phenomenon has different points of analysis, which is why it has not ceased to be important in the design of high voltage hybrid circuits.

Keywords — Electromagnetic Coupling, Corona Current, Hybrid Transmission Line.

I. INTRODUCCIÓN

1. Motivación

La transmisión de energía eléctrica es uno de los niveles más importantes en los sistemas eléctricos, encargado de la transferencia de energía eléctrica a grandes distancias, requiriendo valores elevados de tensión para ello. El diseño de las líneas de alta tensión es de importancia principalmente en la determinación de los niveles de tensión, distanciamiento y la geometría a utilizar en los conductores con el propósito de mantener un nivel de campo eléctrico lo suficientemente bajo para evitar la ionización del aire y por consecuencia, la aparición

de corriente corona [1]. El uso de circuitos múltiples de líneas de transmisión de CA en la misma torre ha sido utilizado para aumentar la capacidad de transmisión, sin embargo, la escasa distancia espacial entre circuitos presenta un desequilibrio de parámetros de las líneas de transmisión, una solución es el uso de las líneas de CD. Una transición abrupta no es viable, por lo que en cambio se han desarrollado los llamados circuitos híbridos (CA/CD) en las que comparten el mismo derecho de vía o incluso la misma torre. El uso de líneas híbridas de alta tensión ha generado problemas en la interacción entre conductores de CA y CD en el campo eléctrico, tensión de inicio de corona y corrientes corona. La propuesta de las líneas híbridas no es nueva y la problemática mencionada ha sido analizada desde el siglo pasado [2]. Hoy en día, aún los problemas persisten a pesar de grandes cambios tecnológicos.

Uno de los principales problemas a los que se enfrenta una línea de transmisión es la posibilidad de producirse la descarga corona, siendo este un fenómeno donde el potencial de un conductor es lo suficientemente elevado para originar una intensidad de campo eléctrico superior a la rigidez dieléctrica del medio que lo rodea. En el caso del aire se produce su ionización convirtiéndolo en un conductor eléctrico [3].

En el presente trabajo se propone una metodología para analizar el comportamiento de una línea de transmisión híbrida de alta tensión y determinar la posibilidad de existencia de corriente corona a lo largo de la línea. Lo anterior se realizó mediante simulaciones en las que se evalúan las magnitudes de campo eléctrico en la superficie del conductor y a nivel de suelo.

2. Antecedentes

Múltiples artículos han analizado el comportamiento electromagnético entre líneas de transmisión recordando que al tratarse de topologías diferentes y paralelas entres si, la existencia de un acoplamiento electromagnético se hace presente. Varios de estos artículos han centrado el análisis específicamente en los acoplamientos electromagnéticos, mientras que otros han enfocado el estudio en el correcto modelado de la línea híbrida.

Por parte de las líneas híbridas se ha reportado lo siguiente: En [4] se muestra el cálculo del campo eléctrico sobrepuesto con el propósito de verificar los requerimientos de diseño eléctrico y ambiental de la línea; en [5] se describe los estudios analíticos y de laboratorio respecto a la corriente corona y campos eléctricos; en [6] se tiene el análisis de los componentes inducidos en la una línea híbrida en condiciones normales y de falla; en [7] se realiza el análisis tridimensional de una torre mediante el Método de Elemento Finito para el análisis del campo eléctrico en los aisladores y en [8] se realiza el análisis teórico y experimental con electrodos punta-plano.

3. Objetivo del caso de estudio

El objetivo del presente artículo es modelar y evaluar por software el comportamiento del acoplamiento electromagnético y efecto corona en una línea híbrida de alta tensión. Además de realizar la simulación del comportamiento del campo eléctrico de la línea utilizando la configuración punta-plano como método de análisis a tensión reducida.

II. MODELADO DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Para la realización del modelado de la línea de transmisión híbrida se utilizó el software PSCAD con el propósito de analizar el acoplamiento electromagnético existente entre los conductores de CA y CD. La torre propuesta a analizar se muestra en la **Figura 1** la cual se basa en una torre de alta tensión de corriente alterna de doble circuito candidata a la conversión de una línea híbrida de alta tensión con un circuito de 320 [kV_{AC}] y 500 [kV_{DC}] [9].

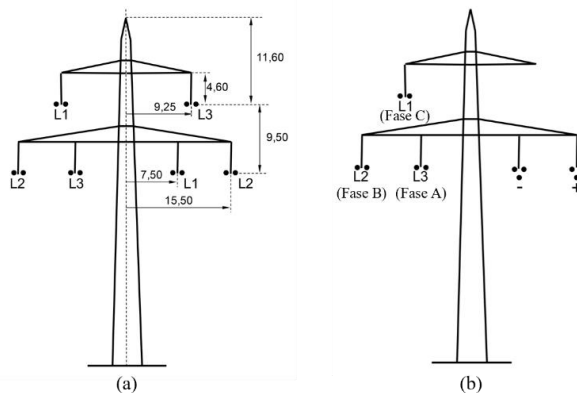


Figura 1.- Dimensiones de una línea de transmisión de (a) doble circuito CA de 380 [kV] convertida en una (b) línea híbrida 320[kV_{AC}] y 500[kV_{DC}] [9].

Siendo una torre de dos conductores por fase, cada uno con un radio de 1.58[cm], el análisis se realizará a los 50[km] de la línea. Se evaluará y comparará la distorsión existente en las tensiones de ambos circuitos al inicio, mitad y final de la línea en condiciones de operación normal para el posterior cálculo del campo eléctrico.

Como previamente se comentó, la existencia de acoplamiento electromagnético en las líneas híbridas ocurre debido a la influencia mutua (superposición) que se tiene en entre la parte

de CA y CD independientemente que estas se encuentren en condiciones nominales o de falla [6].

Se realizó una simulación de 2.5[s] de la línea previamente mencionada con un paso de 2[μs] para el análisis. Es importante mencionar que para este artículo no se consideran condiciones de falla al igual que no se consideran los filtros existentes en las líneas de alta tensión en CD.

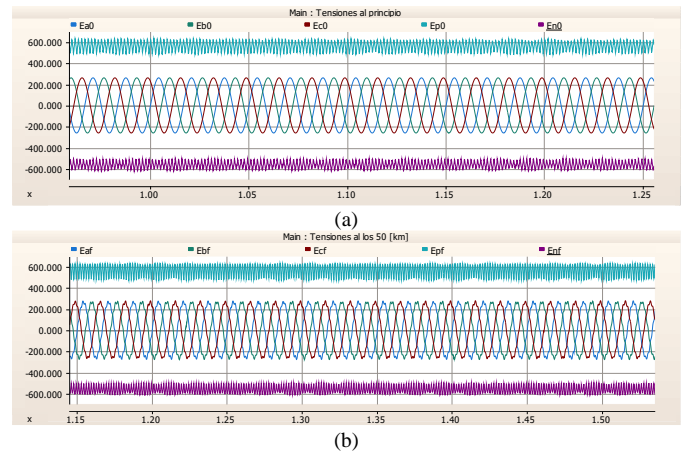


Figura 2.- Valores de tensión obtenidos en la línea híbrida de alta tensión, (a) a 0[km] de línea, (b) 50[km] de línea.

Como se muestra en la **Figura 2**, a los 50[km] de línea se cuenta con una distorsión en las señales de tensión tanto de CA como de CD, por parte de la línea trifásica de corriente alterna esta comienza a sufrir la aparición de armónicos dentro de las tres fases sinusoidales, mientras que por parte de las polaridades de tensión positiva y negativa es posible notar una variación más acrecentada en la señal.

Nota: Es importante mencionar que las señales de CD producidas por los rectificadores de potencia no cuentan con filtros con el propósito de considerar el caso de estudio más crítico.

III. ANÁLISIS DEL CAMPO ELÉCTRICO DE LA LÍNEA HÍBRIDA DE ALTA TENSIÓN

Producto de las distorsiones en la magnitud de tensión en los conductores de la línea, la intensidad del campo eléctrico resulta directamente afectada. Para su análisis se hace uso del Método de Elemento Finito (FEM) en el software COMSOL Multiphysics, partiendo de las ecuaciones de Maxwell.

$$E = -\nabla V \quad (1)$$

$$\nabla \cdot J = -Q \quad (2)$$

$$J = \sigma E + \frac{dD}{dt} + J_e \quad (3)$$

Donde E es conocido como campo eléctrico [V/m] y V es potencial eléctrico [V], mientras ∇V es conocido como el gradiente de potencial en [V]; J es la densidad de corriente en [A/m²] y Q es la densidad de carga eléctrica en [C/m³]; finalmente σ es conocida como la conductividad eléctrica [S/m], mientras $\frac{dD}{dt}$ es conocida como la corriente de desplazamiento [A/m²] y J_e es la densidad de corriente externa [A/m²].

La evaluación de la intensidad del campo eléctrico permite determinar la aparición de corriente corona debido a la ionización del aire, recordando que para que este fenómeno ocurra se requiere una intensidad de campo eléctrico superiores a los 30[kV/cm] en condiciones normales de presión, temperatura y humedad [10].

El modelado se realiza en una vista transversal de los conductores que componen la línea, alimentados por las magnitudes de tensión obtenida a los 50[km].

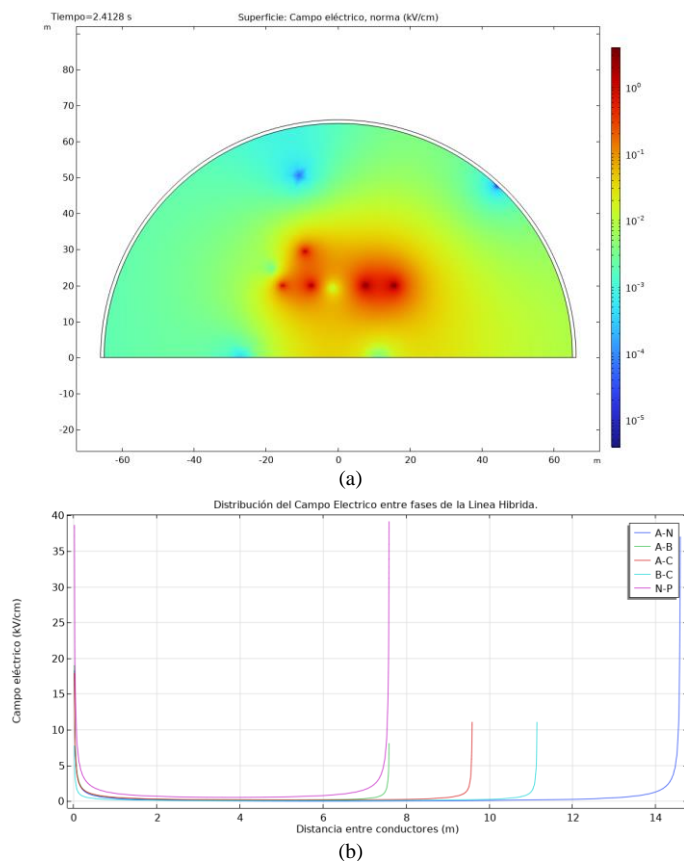


Figura 3.- Campo eléctrico en la línea híbrida de alta tensión con magnitud de tensión máximo en la Fase A. (a) Grafico superficial de la distribución a escala logarítmica, (b) Grafico lineal de la distribución del campo eléctrico a lo largo de la distancia entre conductores.

Como es de esperar, la **Figura 3 (a)** muestra la rápida caída de la magnitud del campo eléctrico a través de la distancia, llegando a ser prácticamente despreciable para la descarga corona a los pocos centímetros, sin embargo, el campo eléctrico de interés se encuentra en la superficie de los conductores. En la **Figura 3 (b)** se observa que los valores mayores de campo eléctrico, superiores a 30[kV/cm], se presentan en la Fase A – Polo Negativo y Polo Negativo – Polo Positivo. Esto debido a que se tratan de los conductores con menor separación entre sí y con las magnitudes de tensión más grandes dentro del análisis. Por lo que es posible centrar el estudio cuando se alcanzan los mayores valores tensión en dichos conductores.

Para este artículo, el caso de estudio es el comportamiento de la corriente corona en el caso híbrido, por lo que se analizará únicamente el caso de tensión máxima en la Fase A, al ser este el más cercano a los conductores de CD.

Tabla 1.- Magnitud de campo eléctrico en la superficie de los conductores cuando se tiene el mayor valor de tensión en la Fase A.

Tiempo [s]	Campo eléctrico VA [kV/cm]	Campo eléctrico VB [kV/cm]	Campo eléctrico VC [kV/cm]	Campo eléctrico V+ [kV/cm]	Campo eléctrico V- [kV/cm]
2.3962	19.039	8.1196	11.704	39.186	38.712

IV. ANÁLISIS DE CORRIENTE CORONA EN CONFIGURACIÓN PUNTA-PLANO

Para el análisis experimental del fenómeno de corriente corona híbrida utilizando la configuración punta plano, es necesario considerar el campo eléctrico generado por la Fase A y enfrentarlo al generado en la Polaridad Negativa, compartiendo el mismo plano a tierra. Siendo estos los conductores de CA y CD más cercanos entre sí.

Para realizar este análisis, se utilizaron dos puntas iguales de 1[mm] de grosor, distanciadas 45[cm] entre sí y 10[cm] del plano a tierra.

La determinación de los valores de tensión requeridos en las puntas para la obtención de los campos eléctricos de la **Tabla 1** está dada en la ecuación Clásica de Punta-Plano [2].

$$E_c = \frac{V}{r * \ln \left| \frac{d}{r} \right|} \quad \therefore V = E_c * r * \ln \left| \frac{d}{r} \right| \quad (4)$$

Donde E_c corresponde a los valores de campo eléctrico obtenidos previamente [V/m], V a la tensión eléctrica a aplicar en la configuración Punta-Plano [V], r hace referencia al radio de la punta y d a la distancia entre la punta energizada y el plano a tierra, ambos en [m].

Aplicando la ecuación, se determinó que para la configuración mencionada es necesario una tensión eléctrica de 10.379 [kV_{CD}] en la punta de corriente directa, y una tensión eléctrica de 5.04 [kV_{CA}] en la punta de corriente alterna. Para la validación de las tensiones obtenidas se realizó su respectivo modelado en COMSOL Multiphysics mostrado en la **Figura 4**.

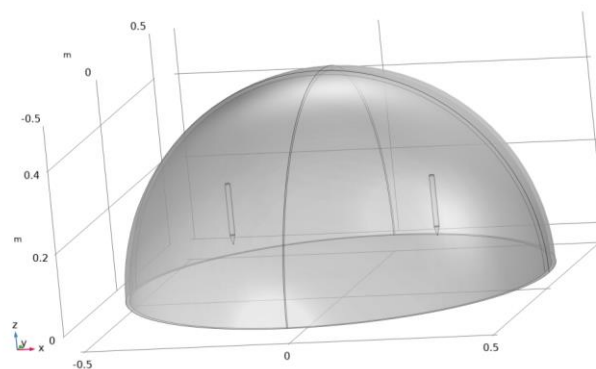


Figura 4.- Modelado del circuito Punta-Plano sugerido para medición de corriente corona híbrida.

Mediante la simulación del circuito punta-plano se permite comparar los campos eléctricos obtenidos en la superficie de los conductores y las puntas con el propósito de validar la metodología propuesta, como es visto en la **Tabla 2**.

Tabla 2.- Magnitud de campo eléctrico en la superficie de las puntas y conductores alimentados con los valores de tensión obtenidos.

Superficie	Campo eléctrico, CD [kV/cm]	Campo eléctrico, CA [kV/cm]
Puntas	49.746	22.528
Conductor	39.186	19.03

Es importante mencionar una ligera diferencia en las magnitudes del campo eléctrico, probablemente debido a los diferentes métodos empleados para el cálculo de tensión y campo eléctrico en el modelo matemático y del FEM respectivamente. Igualmente es de esperar una superposición de los campos eléctricos generados en ambos circuitos, afectando en mayor medida en la configuración punta-plano debido a la cercanía de las puntas.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó una metodología para determinar la posibilidad de aparición de corriente corona en líneas híbridas de alta tensión, basado en el Método de Elemento Finito. Mediante este método es posible evaluar la magnitud del campo eléctrico en los diferentes conductores que componen la línea. Igualmente se realizaron simulaciones en configuración punta-plano que permiten analizar el comportamiento del campo eléctrico y su relación con los valores de tensión de una línea real, facilitando la reproducción del fenómeno en condiciones controladas en laboratorio a tensión reducida en trabajos futuros.

Los resultados obtenidos muestran diferencias entre el uso de modelos matemáticos y simulaciones por software, principalmente influenciadas por el mallado en COMSOL y al comportamiento logarítmico del campo eléctrico en la configuración punta-plano. Producto de esta diferencia se resalta la importancia de la correcta parametrización de los modelos con el propósito de lograr un resultado preciso.

Se declara el no conflicto de interés con respecto a la publicación de este artículo y no se requiere de consentimiento informado ya que se basa únicamente en análisis computacionales y análisis teóricos de sistemas eléctricos.

VI. REFERENCIAS

[1] Pfeiffer M., Hedtke S., M. Franck C., Corona Current Coupling in Bipolar HVDC and Hybrid HVAC/HVDC Overhead Lines, Zurich: ETHzúrich, 2018. <https://doi.org/10.1109/tpwr.2017.2713603>

[2] Sarma Maruvada P., Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines, Research Studies Press LTD, 200.

[3] Tejada Martínez C., Analisis de la Interferencia Electromagnética por Efecto Corona en Líneas de Transmisión de Alta Tensión en CA., Ciudad de México: Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, SEPI ESIME Zacanteco, 2008.

[4] Yang Y., Lu J., Lei Y., A Calculation Method for the Hybrid Electric Field Under UHVAC and UHVDC Transmission Lines in the Same Corridor, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 25, n° 5, pp. 1146-1153, 2010. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2036359>

[5] Chartier V. L., Sarkinen S. H., Steams R. D., Burns A. L., INVESTIGATION OF CORONA AND FIELD EFFECTS OF AC/DC HYBRID TRANSMISSION LINES, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vols. PER 1, pp. 72-80, 1981. <https://doi.org/10.1109/MPER.1981.5511232>

[6] Fayazi M., Saffarian A., Joorabian M., Monadi M., Analysis of induced components in hybrid HVAC/HVDC transmission lines on the same tower for various fault conditions, *Electric Power Systems Research*, vol. 226, n° 109884, pp. 1-11, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109884>

[7] D. Potkrajac, S. Papenheim, M. Kizilcay, Three-dimensional FEM model of an AC/DC hybrid high voltage transmission line to analyze the electrical field along composite insulators, *International Conference on Power Systems*, 2017. IPST2017/17IPST214

[8] Ma Z., He Z., He X., Zhao L., Shen B., He K., X. Junyi, Bian X. «Experimental and Theoretical Study of Corona Inception Threshold in Rod to Plane Electrodes Under AC/DC Combined Voltage: Phase Corresponding to AC Voltage,» *IEEE TRANSACTIONS ON DIELECTRICS AND ELECTRICAL INSULATION*, vol. 30, n° 1, pp. 403-412, 2023. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2022.3210888>

[9] C. B. A. B. A. B. D. D. J. I. V. J. J. J. D. M. S. S. J. Lundquist, «Guide to the Conversion of Existing AC Lines to DC Operation,» *CIGRE*, vol. WG B2.41, 2014.

[10] F. Peek, Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering, McGraw Hill, 1929.