

Cálculo de las Pérdidas de Potencia en Líneas de Transmisión Convencionales y No Convencionales

Milton Edwin Cervantes Bautista
Instituto Politécnico Nacional
ESIME ZAC.
Ciudad de México, MÉXICO
Email: mcervantesb2000@alumno.ipn.mx

Carlos Tejada Martínez
Instituto Politécnico Nacional
ESIME ZAC.
Ciudad de México, MÉXICO
Email: ctejadam@ipn.mx
URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8332-135X>

Fermín P. Espino Cortés
Instituto Politécnico Nacional
SEPI ESIME ZAC.
Ciudad de México, MÉXICO
Email: fpespino@ipn.mx
URL ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4853-7563>

Resumen— En este trabajo se realiza un análisis comparativo de las pérdidas de potencia generadas por efecto Joule y efecto corona, en cuatro líneas de transmisión de 500 kV. Se consideran dos líneas convencionales y dos no convencionales. Para el cálculo de las pérdidas por efecto corona se requiere el valor del campo eléctrico máximo en la superficie de los conductores, para el cual existen fórmulas aplicables a líneas convencionales. Sin embargo, el cálculo del campo eléctrico máximo en los casos no convencionales se realiza mediante simulaciones basadas en el Método del Elemento Finito (MEF). A fin de calcular el SIL de cada una de las líneas bajo estudio, se obtienen los parámetros de impedancia serie y admitancia en derivación, mediante simulaciones en el programa ATP. Al final se comparan los resultados obtenidos para determinar cuál de las cuatro líneas presenta un mejor desempeño desde el punto de vista de pérdidas de potencia.

Palabras Clave — efecto corona, efecto Joule, líneas no convencionales, pérdidas de potencia

Abstract- In this work, a comparative analysis of the power losses generated by the Joule effect and the corona effect is carried out in four 500 kV transmission lines. Two conventional lines and two non-conventional lines are considered. To calculate the losses due to the corona effect, the value of the maximum electric field on the surface of the conductors is required, for which there are formulas applicable to conventional lines. However, the calculation of the maximum electric field in non-conventional cases is carried out through simulations based on the Finite Element Method (FEM). In order to calculate the SIL of each of the lines under study, the series impedance and shunt admittance parameters are obtained through simulations in the ATP program. At the end, the results obtained are compared to determine which of the four lines presents the best performance from the point of view of power losses.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de energía eléctrica en países como México, impone la necesidad de aumentar la capacidad de los sistemas de transmisión. Algunas opciones ya estudiadas son el aumento de la tensión de operación y la conversión de líneas de CA a CD.

Otra alternativa de reciente interés son las líneas de transmisión de alta cargabilidad (HSIL), en las cuales se optimiza la configuración geométrica de los conductores a fin de disminuir la impedancia característica de la línea y consecuentemente aumentar el SIL (Surge Impedance Loading) [1]. Sin embargo, al modificar la disposición geométrica de los conductores, también se pueden alterar los niveles de campo eléctrico superficial, el cual puede alcanzar valores críticos que propicien la aparición del efecto corona [2]. Este último a su vez puede contribuir al aumento de las pérdidas de potencia, ruido audible e interferencia electromagnética.

Por otro lado, en el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2024-2038), en la búsqueda de propuestas de proyectos de ampliación y modernización de la Red Nacional de Transmisión, el capítulo 5 establece como uno de sus objetivos: operar con eficiencia energética, minimizando las congestiones en la red de transmisión y las pérdidas de energía eléctrica por efecto joule [3].

Es por lo anterior que en este trabajo se realiza un análisis comparativo de las pérdidas de potencia por efecto Joule y efecto corona de 4 líneas de transmisión de 500 kV, dos de ellas convencionales y otras dos no convencionales. Se consideran líneas convencionales aquellas que cuentan con configuraciones simétricas de haz de conductores, en forma circular y con las mismas distancias entre conductores del haz. Por otro lado, se denominan líneas no convencionales aquellas que cuentan con haces de conductores con disposiciones asimétricas.

Para el análisis se hace uso de tres herramientas computacionales, MATLAB en donde se implementan las metodologías para el cálculo de pérdidas de potencia por efecto Joule y corona. El programa COMSOL Multiphysics para obtener los valores de campo eléctrico máximo, especialmente en los casos asimétricos en donde las fórmulas convencionales ya no son aplicables. El programa ATP para la obtención de la impedancia serie y admitancia en derivación, necesarios para el cálculo del SIL.

Al final se comparan los resultados obtenidos de los 4 casos de estudio, a fin de identificar el diseño con el mejor desempeño desde el punto de vista de pérdidas de potencia.

II. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE POTENCIA

A. Pérdidas por Efecto Joule

Las pérdidas por efecto Joule en un conductor representan la conversión de energía eléctrica en energía calorífica, este comportamiento describe la manera en la que una corriente eléctrica que fluye a través de un conductor con una resistencia específica genera una pérdida de potencia en forma de calor [4].

Las pérdidas por efecto Joule se pueden calcular con la ecuación (1):

$$P_J = I^2 R \left(\frac{W}{m} \right) \quad (1)$$

donde:

P_J son las pérdidas por fase a causa del efecto Joule en W/m

I es la corriente eléctrica en A

R es la resistencia eléctrica del conductor de fase en Ω , o si corresponde, la resistencia equivalente de los conductores de fase.

B. Pérdidas por Efecto corona

Por su parte, el efecto corona se interpreta como descargas eléctricas que se originan alrededor de los conductores al estar en presencia de un alto campo eléctrico, mismo que ocasiona una ionización del aire, brindando la energía suficiente para que los electrones se liberen del material y se dirijan al exterior.

Para la estimación de pérdidas eléctricas causadas por este fenómeno, se puede usar la fórmula empírica conocida como el método Electricité de France (EDF), propuesta en el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) [5], a partir de la cual es posible evaluar las pérdidas por corona en ambiente favorable (seco). Además, también considera líneas de transmisión con múltiples conductores por fase. El método EDF está dado por la ecuación:

$$P_C = P_0 r^{1.8} (n+6)^2 \cdot 10^{7(E^*-0.7)} \left(\frac{W}{m} \right) \quad (2)$$

donde:

$$E^* = \frac{E_{max}}{E_C} \quad (3)$$

P_C son las pérdidas por corona por fase en W/m.

P_0 es un factor relacionado con el estado del conductor, que toma un valor de 1.5×10^{-2} para conductores nuevos, y se considera un valor de 1.5×10^{-3} si se tienen conductores desgastados.

r es el radio del conductor en cm.

n es el número de conductores por fase.

E^* es la relación entre el campo eléctrico máximo en la superficie de los conductores (E_{max}) y el campo eléctrico crítico de inicio corona (E_C), ambos en kV/cm.

Para el cálculo del campo eléctrico superficial (E_{max}), existen fórmulas aplicables a configuraciones simétricas de haz de conductores (líneas convencionales). En este trabajo también se estudian casos con configuraciones asimétricas (líneas no convencionales), en donde el cálculo de E_{max} se realiza mediante simulaciones basadas en el Método del Elemento Finito (MEF).

La ecuación (4) se puede utilizar para calcular el campo eléctrico crítico E_C :

$$E_C = 21.1m\delta \left[1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta r}} \right] \quad (4)$$

En la expresión anterior:

m es un factor de irregularidad de la superficie, que toma el valor de 0.75 a 0.85 en conductores limpios, un intervalo de 0.6 a 0.8 para conductores con daños superficiales, y de 0.3 a 0.6 en presencia de vegetación o gotas de agua.

δ es la densidad relativa del aire, que depende de la altitud sobre el nivel del mar y temperatura de la zona.

III. CASOS DE ESTUDIO

En este trabajo se analizan 4 líneas de transmisión de 500 kV cuyos datos se presentan en la Tabla 1. El caso 1 consiste en una línea en configuración horizontal y a partir de la cual, mediante la reconfiguración de la disposición geométrica de los conductores, se derivan los casos 2 a 4. Los casos 1 y 2 (Figuras 1 y 2), corresponden a líneas convencionales con configuraciones de haz circulares y simétricas. Los casos 3 y 4 (Figuras 3 y 4), corresponden a líneas no convencionales, en donde los conductores del haz de las fases laterales se colocan en un medio círculo.

Tabla 1.- Características de las líneas de transmisión bajo estudio

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Radio del conductor [cm]	1.334	1.0885	1.334	1.0885
Radio del haz [cm]	31.82	75	Central = 31.82 Lateral = 92.85	Central = 31.82 Lateral = 95.27
Número de conductores	4	6	4	6
Resistencia $\left[\frac{\Omega}{km} \right]$	0.0798	0.119	0.0798	0.119
SIL [MW]	969.12	1,587.58	1,119.02	1,339.91
Corriente de fase [kA]	1.119	1.833	1.292	1.547
Frecuencia [Hz]	60			

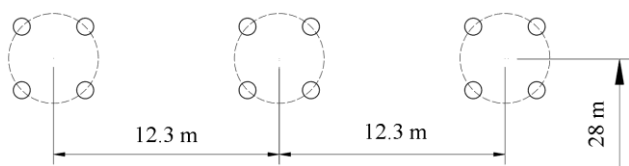


Figura 1.- Caso 1: línea de transmisión convencional con 4 conductores por fase

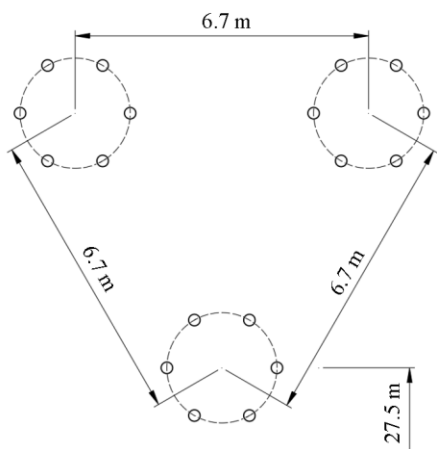


Figura 2.- Caso 2: línea de transmisión HSIL convencional con 6 conductores por fase.

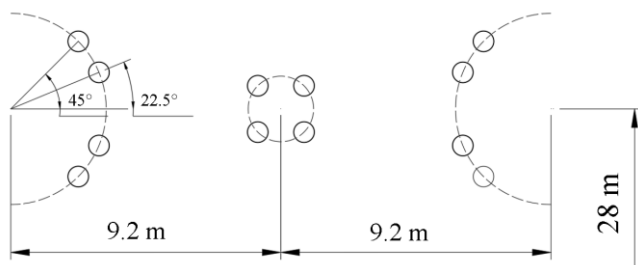


Figura 3.- Caso 3: línea de transmisión HSIL no convencional con 4 conductores por fase.

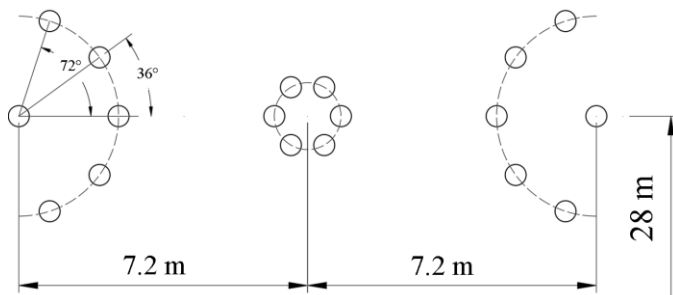


Figura 4.- Caso 4: línea de transmisión HSIL no convencional con 6 conductores por fase.

Para los cálculos se contempla una longitud de línea de 610.5 km, que constituye la trayectoria desde la subestación eléctrica de Ixtepect, en el estado de Oaxaca, a la subestación Yautepec, estado de Morelos. Se consideran también condiciones ambientales y geográficas extremas de operación (Yautepec), teniendo una altitud promedio de 1289 msnm., y una temperatura de 38.5 °C.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la determinación del campo eléctrico máximo requerido en el cálculo de las pérdidas por efecto corona, se realizaron simulaciones en el programa COMSOL Multiphysics, basado en el Método del Elemento Finito (MEF). Los resultados de las simulaciones se muestran en la Tabla 2. Obsérvese que el diseño original (Caso1) presenta el valor más pequeño de campo eléctrico (15.44 kV/cm), mientras que el Caso 2, en donde se hace más notoria la compactación de la línea, presenta el valor más alto de campo eléctrico (20.48 kV/cm).

En la Tabla 3 se presentan los resultados obtenidos de las pérdidas de potencia, aplicando la metodología descrita en la sección II, la cual fue implementada mediante un código en MATLAB. También, en la misma tabla se reportan los parámetros de impedancia serie y admitancia en derivación, las cuales fueron obtenidos mediante simulaciones realizadas en el programa ATP Draw y los cuales fueron requeridos para el cálculo del SIL.

De los resultados mostrados en la Tabla 3, es posible observar que la línea convencional (caso 1) es la que genera menores pérdidas eléctricas (5.25 %), misma que tiene la menor potencia SIL (969.12 MW). No obstante, la línea HSIL simétrica (caso 2) mantiene la mayor pérdida de potencia (16.99 %), al mismo tiempo que tiene el incremento más significativo en potencia SIL (1587.58 MW), por lo que se encuentra una relación proporcional entre el aumento de la potencia de transmisión y la generación de pérdidas eléctricas a lo largo de la trayectoria.

Tabla 2.- Resultados de campo eléctrico en la superficie de los conductores (E_{max})

Caso de estudio	Campo eléctrico máximo (E_{max})	
	[$\frac{kV}{cm}$]	
Caso 1	15.44	
Caso 2	20.48	
Caso 3	17.42	
Caso 4	17.60	

Tabla 3.- Comparación de pérdidas eléctricas por efecto Joule y corona en los casos de estudio

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Impedancia de fase [$\frac{\Omega}{km}$]	0.0219+j 0.325	0.0209+j 0.195	0.0214+j 0.285	0.0209+j 0.235
Admitancia en derivación [$\frac{\mu S}{km}$]	j4.9009	j7.916	j5.730	j6.785
Impedancia característica [Ω]	257.96	157.47	223.40	186.57
SIL [MW]	969.12	1,587.58	1,119.02	1,339.91
Pérdidas eléctricas por efecto Joule [MW]	45.755 4.72%	122.051 7.68%	61.006 5.45%	86.955 6.48%
Pérdidas eléctricas por efecto corona [MW]	5.151 0.53%	147.172 9.31%	22.159 1.98%	18.677 1.39%
Pérdidas de potencia totales [MW]	50.906 5.25%	269.224 16.99%	83.165 7.43%	105.632 7.84%
Potencia total entregada [MW]	918.213	1,318.363	1,035.868	1,234.283

Además, se puede resaltar que el efecto Joule es el fenómeno eléctrico que constituye la principal fuente de energía desperdiciada en las líneas bajo estudio, a excepción del caso 2, en donde se aprecia un mayor impacto por parte del efecto corona. Lo anterior debido a que es el Caso 2 el cual presenta el campo eléctrico más elevado (20.48 kV/cm), aumentando drásticamente las pérdidas por efecto corona.

Por último, se destaca que el caso 4 (que cuenta con el segundo mayor incremento en el SIL) ofrece una mejor relación entre la potencia total entregada y la potencia natural SIL, alcanzando un valor de 92.11%, en comparación con el caso 2, que, a pesar de disponer del mayor SIL, muestra una considerable disminución en dicha relación, siendo de un 83.04%, debido a que genera pérdidas de potencia muy significativas. Por consiguiente, el caso 4 demuestra una mayor eficiencia en la transmisión de energía eléctrica.

V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizó un análisis comparativo de las pérdidas de potencia de 4 líneas de transmisión de 500 kV, dos de ellas convencionales y otras dos no convencionales. Se ha podido observar que, en el proceso de reconfiguración del haz de conductores de una línea a fin de aumentar el SIL, también se pueden presentar aumentos considerables en los valores de campo eléctrico máximo. Tal así en el cambio del Caso 1 al Caso 2, aunque se logra aumentar el SIL de 969.12 MW a 1587.58 MW, también aumenta el campo eléctrico de 15.44 kV/cm a 20.48 kV/cm, resultado de la compactación de la línea. Lo anterior deja ver que en los estudios de optimización del SIL de una línea de transmisión, es importante considerar como restricciones valores aceptables de pérdidas de potencia entre algunos otros factores establecidos en los estándares que rigen la operación de los sistemas de transmisión.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] M. Ghassemi, "High Surge Impedance Loading (HSIL) Lines: A Review Identifying Opportunities, Challenges, and Future Research Needs", *Transacciones IEEE sobre suministro de energía*, vol. 34, no. 5, pp. 1909-1924, Oct. 2019. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2910210
- [2] M. A. Khan y M. Ghassemi, Corona Loss Calculation for Unconventional High Surge Impedance Loading Transmission Lines, Simposio de Energía de América del Norte 2023 (NAPS), Estados Unidos, 2023, pp. 1-6, doi: [10.1109/NAPS58826.2023.10318608](https://doi.org/10.1109/NAPS58826.2023.10318608).
- [3] Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN 2024-2038). Secretaría de Energía.
- [4] H. Jouhara, et al., Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications, *Revista internacional de termofluidos*, Vol. 9, 2021. <https://doi.org/10.1016/J.IJFT.2021.100063>.
- [5] Instituto de Investigación de Energía Eléctrica, EPRI AC Transmission Line reference book-200 kV and above, Palo Alto, CA, 2005.