

Modelado de una línea de transmisión no uniforme de la mina Peñasquito para analizar el desempeño de un algoritmo de localización de fallas que utiliza perfiles transitorios de tensión

Omar Hernández García, Fermín Pascual Espino Cortés, Member, IEEE, Rodrigo Nuricumbo Guillén, Pablo I. Kotkoff Villegas
Área de estudios eléctricos avanzados, KOTKOFF Electric, Ensenada Baja California
Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México
e-maíl: omarhgipn@hotmail.com , fespino@ipn.mx , rodrigo.ng.85@gmail.com , PKotkoff@kotkoff.com

Abstract—En éste trabajo, se modeló una línea de transmisión no uniforme de 400 KV, la cual suministra energía eléctrica a una sección de la mina Peñasquito, localizada en Mazapil, Zacatecas. El objetivo de los trabajos realizados entre KOTKOFF Electric y la mina Peñasquito es dar cumplimiento a los estudios eléctricos que estipula el código de red mexicano, sin embargo, se aprovecharon las visitas para realizar mediciones de la resistividad del suelo y definir la altura y posición de los conductores, en aquellos puntos de la línea de transmisión que presentan mayor grado de no uniformidad.

Posteriormente al modelado de la línea de transmisión no uniforme, se prueba el comportamiento de un algoritmo de localización de fallas, que obtiene los resultados con base en el análisis de los perfiles transitorios de tensión, obtenidos al momento de presentarse una falla de cortocircuito o falla a tierra.

El proceso de validación consiste en comparar el punto de falla estimado con el algoritmo de localización de fallas en líneas de transmisión no uniformes, en análisis, contra un punto de falla conocido. Esto se logra al inyectar señales de tensiones y corrientes de falla, obtenidas del programa de simulación para transitorios electromagnéticos ATPDraw, del cual se conoce el punto donde se aplicó la falla.

Keywords—Localización de fallas, línea de transmisión no uniforme, perfiles transitorios de tensión.

I. INTRODUCCIÓN

El suministro de energía eléctrica en todos los centros de carga y redes generales de distribución, debe cumplir los lineamientos de seguridad, calidad, confiabilidad y continuidad [1]. Un suceso que puede interferir con lo mencionado anteriormente son las fallas de cortocircuito o fallas a tierra, las cuales tienen una alta tasa de probabilidad en líneas de transmisión aéreas, por lo tanto, constantemente se crean tecnologías destinadas a proteger las líneas de transmisión y aislar rápidamente las fallas, con el objetivo de minimizar el daño en los circuitos y reducir el tiempo que estos quedan fuera de operación [2].

La mina Peñasquito, se dedica a la explotación de minerales metálicos como el cobre, oro y zinc, es considerada como la mina a cielo abierto más grande de México.



Fig. 1. Fotografía de la mina a cielo abierto Peñasquito.

La mina mantiene operación continua las 24 horas del día, todos los días del año, a continuación, se muestra una fotografía del proceso de transporte de la materia prima, lo cual se realiza con vehículos de gran envergadura.



Fig. 2. Fotografía del transporte de materia prima en la mina Peñasquito.

La importancia de mantener un suministro continuo de energía eléctrica se debe a que las pérdidas económicas son multimillonarias, por lo tanto, esta empresa cuenta con varias subestaciones eléctricas y hasta líneas de transmisión propias.

La línea de transmisión que se analizó en este trabajo tiene una longitud de 50 km y alimenta un transformador de potencia de 120 MVA. La gran capacidad de la máquina estática hace darnos cuenta de que se requieren tecnologías de localización de fallas altamente eficientes, con las cuales no se pierda tiempo buscando la zona dañada.



Fig. 3. Fotografía de un transformador de potencia de 120 MVA.

En este trabajo se describe como se obtienen los datos para modelar una línea de transmisión no uniforme y cuál es el comportamiento de un algoritmo de localización de fallas que realiza cálculos en el dominio de la frecuencia mediante la transformada numérica de Laplace (TNL), ante dicho modelo. Las muestras de tensión y corriente en los extremos de la línea, obtenidas mediante simulaciones digitales, junto al modelo de línea no uniforme, se utilizan para la estimación del punto de falla.

II. MODELO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN NO UNIFORME

Los aspectos más importantes para obtener un modelo de línea de transmisión no uniforme, es el medir la resistividad del suelo con un telurómetro con calibración vigente y estimar la altura y posición geométrica de los conductores en aquellos puntos que consideremos con mayor grado de no uniformidad, entre más información contenga el modelo eléctrico de la línea, mejor será el desempeño del localizador de fallas.

La línea de transmisión en 400 KV que se modeló atraviesa terreno árido y en una sección un lago. Para la sección árida, se realizó la medición de la resistividad del suelo en la subestación y se obtuvo un valor de $137 \Omega \cdot m$. Para la sección que atraviesa el lago se propone una resistividad muy baja de $0.5 \Omega \cdot m$.

La altura y posición geométrica de los conductores se tomaron de los datos de las torres de transmisión que la mina Peñasquito mandó a Kotkoff Electric para los estudios de cumplimiento del código de red mexicano.

La ventaja de usar un modelo de línea de transmisión no uniforme es que se puede incluir parámetros eléctricos distintos en cada sección que la conforma.

La ecuación (1) se utiliza para obtener la profundidad de penetración compleja, con la cual se puede incluir la resistividad del suelo.

$$P = \sqrt{\frac{\rho_e}{j\omega\mu_e}} \quad (1)$$

Donde ρ_e es la resistividad del terreno, μ_e la permeabilidad magnética del terreno y $j\omega$ el operador de la frecuencia.

Para obtener la impedancia y admitancia por unidad de longitud, respectivamente ecuaciones (2) y (3), se utilizó el método de imágenes, el cual puede incluir los fenómenos eléctricos debidos a la geometría de la línea, la dependencia frecuencial, las pérdidas del retorno por tierra y las pérdidas en el conductor [3].

$$Z = Z_G + Z_t + Z_c = j\omega(L_G + L_t) + R_t + Z_c \quad (2)$$

$$Y = j\omega C = j\omega P^{-1} \quad (3)$$

Donde Z es la impedancia total por unidad de longitud, Z_G la impedancia geométrica, Z_t la impedancia del retorno por tierra y Z_c la impedancia del conductor, R_t es la parte real de Z_t y P se conoce como los coeficientes de potencial de Maxwell.

La impedancia y admitancia por unidad de longitud, forman parte de las ecuaciones del telegrafista, ecuaciones (4) y (5), las cuales sirven para representar una línea de transmisión de parámetros distribuidos, con cuya solución se obtienen las ecuaciones (6) y (7) [4].

$$-\frac{dV}{dx} = ZI \quad (4)$$

$$-\frac{dI}{dx} = YV \quad (5)$$

$$Z_0 = [Z^{-1}\Psi]^{-1} = \Psi^{-1}Z \quad (6)$$

$$Y_0 = Z^{-1}\Psi \quad (7)$$

Donde V es una matriz de voltajes, I una matriz de Corrientes, Ψ es la matriz de propagación de voltaje, Z_0 es la impedancia característica y Y_0 la admitancia característica.

Partiendo de las ecuaciones (6) y (7), se puede obtener una expresión matemática que define la matriz de transferencia de una línea multiconductora, lo cual se muestra en la ecuación (8) [4].

$$\begin{bmatrix} V_{Remoto} \\ i_{Remoto} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{local} \\ i_{local} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$A = \cosh(\Psi l) \quad (9)$$

$$B = -Z_0 \sinh(\Psi l) \quad (10)$$

$$C = Y_0 \sinh(\Psi l) \quad (11)$$

$$D = -\cosh(\Psi l) \quad (12)$$

Para el modelado de una línea de transmisión no uniforme, se utiliza la propiedad de conexión en cascada de matrices cadena (ϕ), lo cual se logra considerando un desfase de 180 grados eléctricos en la expresión de la corriente de la ecuación

(8). Esto hace posible considerar diferentes valores de altura y resistividad de suelo en cada modelo de matriz cadena, como se muestra en la Fig. 4.

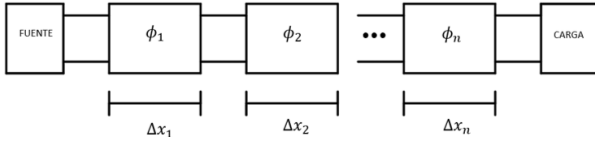


Fig. 4. Modelo de una línea de transmisión no uniforme.

III. ALGORITMO DE LOCALIZACION DE FALLAS

En este trabajo se realiza el análisis de un algoritmo desarrollado en [5], del cual se describen los aspectos generales más importantes.

El algoritmo de localización de fallas en líneas no uniformes requiere de mediciones de señales de tensión y corriente en ambos extremos de la línea al momento de ocurrir una falla de cortocircuito o falla a tierra, las cuales inicialmente se encuentran en el dominio del tiempo, y son transformadas al dominio de la frecuencia al utilizar la expresión discreta de la transformada numérica de Laplace directa, esta se muestra en la ecuación (13) [4].

$$F(c + j(2m + 1)\Delta\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta t) e^{-cn\Delta t} e^{-j(2m+1)\Delta\omega\Delta t} \Delta t \quad (13)$$

Donde $\Delta\omega$ es el paso de integración en la frecuencia, Δt el paso de integración en el tiempo, N el número de muestras, n, m son contadores de 0 hasta $N - 1$ y c es una constante del factor de amortiguamiento, el cual sirve para aminorar el error debido a la propia discretización de las señales [4].

Los perfiles transitorios describen el comportamiento de la corriente o tensión en puntos internos de la línea de transmisión, al utilizar simultáneamente el modelo de línea no uniforme y las muestras de las señales de tensión y corriente en el dominio de la frecuencia, se puede obtener los perfiles transitorios que van del nodo emisor al nodo receptor $v(x, s)$ y $i(x, s)$, y los que van del nodo receptor al nodo emisor $v'(x, s)$ y $i'(x, s)$ [4].

Para interpretar la información de los perfiles transitorios, se utiliza la expresión discreta de la transformada numérica de Laplace inversa (TNLI), lo cual sirve para transformar los perfiles al dominio de tiempo, esto se define en la ecuación (14).

$$f(n\Delta t) \cong \frac{e^{cn\Delta t}}{\pi} \text{Re} \left\{ \sum_{m=0}^{N-1} [f(c + j(2m + 1)\Delta\omega) \sigma[(2m + 1)\Delta\omega] e^{j(2m+1)n\Delta\omega\Delta t} \Delta\omega'] \right\} \quad (14)$$

Donde Ω es un tiempo finito, $\sigma(\omega)$ es la función ventana, $\Delta\omega$ es el paso de integración en la frecuencia, Δt el paso de integración en el tiempo, N el número de muestras, n, m son contadores de 0 hasta $N - 1$ y c es una constante del factor de amortiguamiento.

El algoritmo descrito en [5] aprovecha el decaimiento de la tensión al momento de ocurrir una falla, con lo que se puede definir que $v(x, t)$ describe la tensión desde el extremo emisor a la falla y $v'(x, t)$ desde el extremo remoto a la falla, con esto

se puede hacer la diferencia entre ambos perfiles y obtener un tercer perfil, conocido como perfil transitorio de tensión de falla $v_f(x, t)$ y poder estimar la distancia del punto dañado, como se muestra respectivamente en la ecuaciones (15) y (16) [4].

$$v_f(x, t) = \begin{cases} v(x, t) & \text{desde } x = 0 \text{ hasta } x = d_f \\ v'(x, t) & \text{desde } x = d_f \text{ hasta } x = l \end{cases} \quad (15)$$

$$v_f(x, t) = |v(x, t) - v'(x, t)| \rightarrow 0 \quad (16)$$

IV. CASOS DE PRUEBA

Se presentan los resultados obtenidos con el algoritmo, al considerar una línea que pertenece a la mina Peñasquito, la cual tiene una longitud de 50 km, es alimentada a 400 KV y que transporta energía para una carga en estrella de 100 Ω por fase. A continuación, se muestra una figura con los datos considerados.

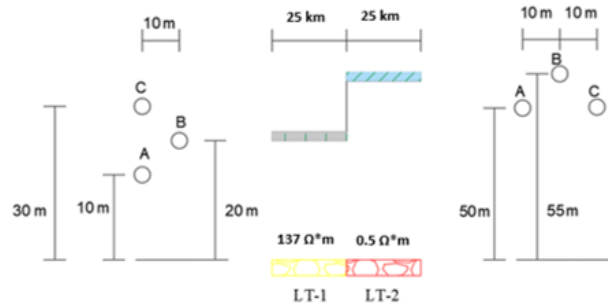


Fig. 5. Línea de transmisión no uniforme utilizada para probar el algoritmo de localización de fallas.

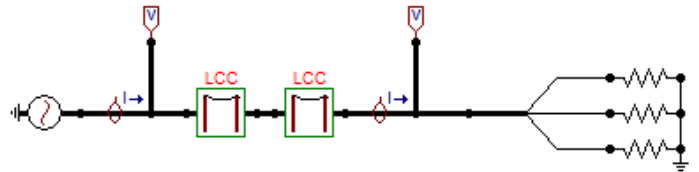


Fig. 6. Modelo en ATPDraw utilizado para obtener las muestras de tensión y corriente en los extremos de la línea.

A. Caso 1: Algoritmo de localización de fallas utilizado como método gráfico.

El algoritmo desarrollado en [5] puede obtener las gráficas en tres dimensiones de $v_f(x, t)$, lo cual resulta muy útil, ya que al momento de presentarse una falla, cualquier persona puede proporcionar la información del dato de falla al área encargada de reparar la anomalía.

Se aplicaron fallas trifásicas solidas al modelo de línea no uniforme, a una distancia de 10, 25 y 40 km desde el nodo emisor. A continuación, se muestran los resultados.

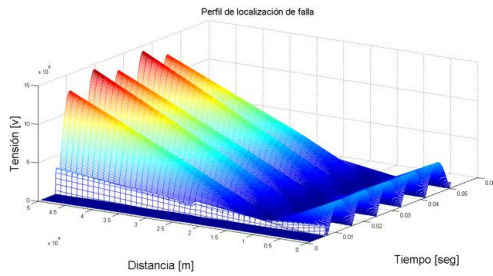


Fig. 7. Resultado gráfico de una falla a 10 km desde el nodo emisor.

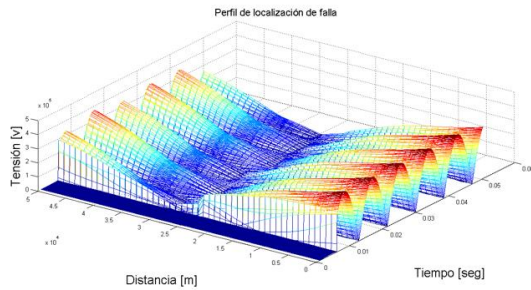


Fig. 8. Resultado gráfico de una falla a 25 km desde el nodo emisor.

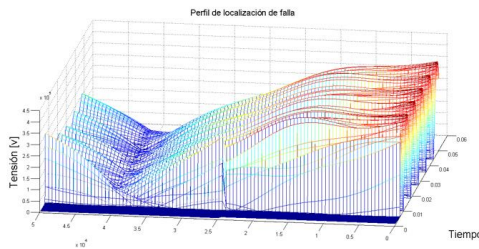


Fig. 9. Resultado gráfico de una falla a 40 km desde el nodo emisor.

B. Caso 2: Desempeño del algoritmo ante fallas monofásicas que presentan impedancia de falla.

Las fallas monofásicas son las que mayor presencia tienen en un sistema y en ocasiones presentan características especiales que ocasionan una mala operación de los equipos de protección. En este caso se analiza el comportamiento del algoritmo ante una falla monofásica, a 10 km desde el nodo emisor, variando la impedancia de falla en valores inusualmente altos y considerado un modelo de línea de transmisión no uniforme.

En la TABLA I, se muestran las especificaciones y resultados de aplicarse una falla monofásica.

TABLA I. Condiciones y resultados de las fallas aplicadas en el caso 2.

Tipo de falla	Impedancia de falla [Ω]	Distancia calculada [km]	Error relativo [%]
FA-T	0	10.13	0.13
	10	10.06	0.06
	25	10.1	0.1
	50	9.85	0.15
	100	10.097	0.097
	250	10.58	0.58
	500	10.16	0.16

FB-T	750	10.79	0.79
	1000	11.58	1.58
	0	10.25	0.25
	10	10.45	0.45
	25	10.5	0.5
	50	10.62	0.62
	100	10.37	0.37
	250	10	0
	500	9.65	0.35
	750	12.12	2.12
FC-T	1000	12	2
	0	10.246	0.246
	10	10.145	0.145
	25	10.27	0.27
	50	10.154	0.154
	100	10.158	0.158
	250	9.87	0.13
	500	10.3	0.3
	750	11.34	1.347
	1000	12.5	2.5

En la Fig. 10 se muestra el error relativo de las fallas aplicadas en el caso 2.

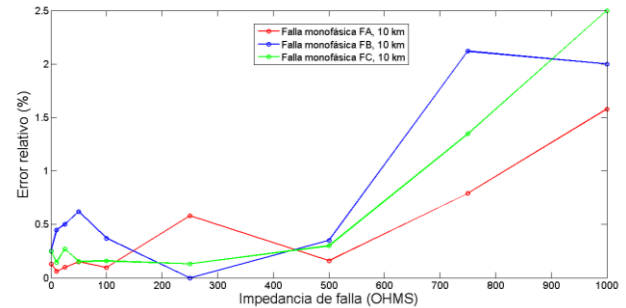


Fig. 10. Error relativo para la falla monofásica del caso 2.

V. CONCLUSIONES

Una empresa minera es altamente dependiente de la energía eléctrica y el aspecto que más relevancia tiene es la continuidad de suministro, en el caso de presentarse una falla de tal magnitud que ocasione la salida de alguna línea de transmisión, las pérdidas económicas son extremadamente altas, por lo tanto, contar con tecnologías de localización de fallas es muy necesario.

El algoritmo es fácil de implementar, únicamente requiere los registros de datos de fallas emitidos por los relevadores al momento de operar.

El algoritmo es amigable con los operadores, ya que puede crear perfiles tridimensionales, donde personas no entrenadas pueden definir visualmente en que punto se origino la falla, con lo que se elimina la necesidad de esperar al personal experto en localización de fallas.

En el caso de las fallas a tierra, se aplicaron impedancias de fallas no comunes, con valores extremadamente altos y el algoritmo fue capaz de localizar el punto dañado, si embargo esto aun es limitado por que el algoritmo depende de los registros de datos de falla que manda el relevador al operar, y con dichas magnitudes de impedancia de falla, los relevadores

en ocasiones no funcionan correctamente, por lo tanto, esta puede ser una aplicación futura.

REFERENCES

- [1] Comisión Reguladora de Energía, «Tercera Sección del Diario Oficial de la Federación». Comisión Reguladora de Energía, abr. 08, 2016.
- [2] F. Toledo, *Métodos computacionales para el análisis de sistemas de potencia.*, Primera. México: Ducere, 1997.
- [3] C. GARY, «Análisis de la propagación de ondas a través de conductores múltiples en alta frecuencia utilizando matrices complejas.», *Electricite de France*.
- [4] R. Nuricumbo Guillén, «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, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://tesis.ipn.mx/handle/123456789/27081>
- [5] Omar Hernández García, «Localización de fallas en líneas de transmisión no uniformes usando perfiles transitorios de tensión», *RVP-AI/ROC&C'2021*, nov. 2021.