



ALGORITMO PARA DISEÑAR LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CON CABLES PROTECTORES SEGMENTADOS

Héctor Silvio Llamo Laborí.

Resumen/Abstrac

En las líneas de transmisión a voltajes de 220 kV y mayores, el valor de las pérdidas en los cables protectores puede justificar económicamente su segmentación para reducirlas a cero.

Se presentan los resultados y las características de un algoritmo para diseñar o comprobar el diseño de esquemas de cables protectores segmentados a partir de calcular el voltaje máximo inducido electromagnéticamente en los mismos.

Palabras claves: Pérdidas, segmentados, cables protectores, transposiciones.

In the 220 kV and higher transmission lines, the lost value in the ground wires can justifies economically its segmentation to reduce it to zero.

Are presented the characteristics and results of an algorithm to design or test the schemes of segmented ground wires calculating the electromagnetic voltage induced on it.

Key words: Lost, segmented, shield wires, transpositions.

Generalidades.

Los cables protectores se instalan en las líneas aéreas para protegerlas contra las descargas atmosféricas.

El surgimiento de las redes de transmisión a voltajes de 220 kV y mayores, ha provocado el diseño de líneas con los cables protectores segmentados en tramos formando "T" o "T'" aisladas entre sí y con un solo punto conectado a tierra de forma efectiva que hace cero la corriente inducida por la carga y por ende, las pérdidas de potencia activa en los cables protectores.

Dado que en Cuba existen líneas a 220 kV con sus cables protectores aislados de la tierra, se consideró conveniente desarrollar un algoritmo para diseñar o comprobar el diseño de esquemas de cables protectores segmentados a partir de calcular el voltaje máximo inducido electromagnéticamente en dichos cables por una línea simple o doble circuito con hasta 28 conductores sencillos o múltiples dispuestos en la misma torre o en el mismo derecho de vía.

Planteamiento matemático.

Para conocer y evaluar los efectos electromagnéticos (E/M) y electrostáticos (E/S) de las líneas de transporte de energía eléctrica hay que precisar su significado físico y determinar sus valores.

Aunque las líneas operan con corriente alterna, como la longitud de onda a 60 Hz es muy grande (4800 km) comparada con la longitud de las líneas, puede trabajarse con las expresiones de los campos magnéticos y eléctricos estáticos (análisis casi estático). En este caso las ondas E/M y E/S se propagan transversalmente⁽¹⁾ (a 90° una de la otra), se pueden considerar independientes y puede afirmarse que el campo magnético está asociado solamente con la corriente que circula por la línea debida a la carga, la ocurrencia de cortocircuitos, etcétera.

Cuando los cables protectores están aislados de la tierra formando segmentos en forma de "T" o "T'" (figura

1), el voltaje inducido es de origen electromagnético porque la conexión a tierra mostrada hace que la carga electrostática inducida circule hacia la tierra y colapse el potencial relativamente alto que podría inducirse electrostáticamente.

El voltaje inducido de naturaleza electromagnética en los cables protectores crece linealmente desde el punto de puesta a tierra hasta él o los extremos abiertos formando una o dos rampas como se muestra en la figura 1.

A continuación se describirá matemáticamente el algoritmo VICPC: Voltaje Inducido en los Cables Protectores.

La figura 1 un cable protector formando una "T" con su punto medio conectado a tierra a través de una resistencia de puesta a tierra R_T de un valor lo suficientemente bajo como para que no se acumule la carga electrostática.

El desarrollo matemático se obtendrá a partir del caso particular de una línea simple circuito con dos cables protectores.

La ecuación de los voltajes inducidos electromagnéticamente en uno de los lados de longitud "L" de una de las "T" que forman el cable protector es, en notación simbólica y particionada:

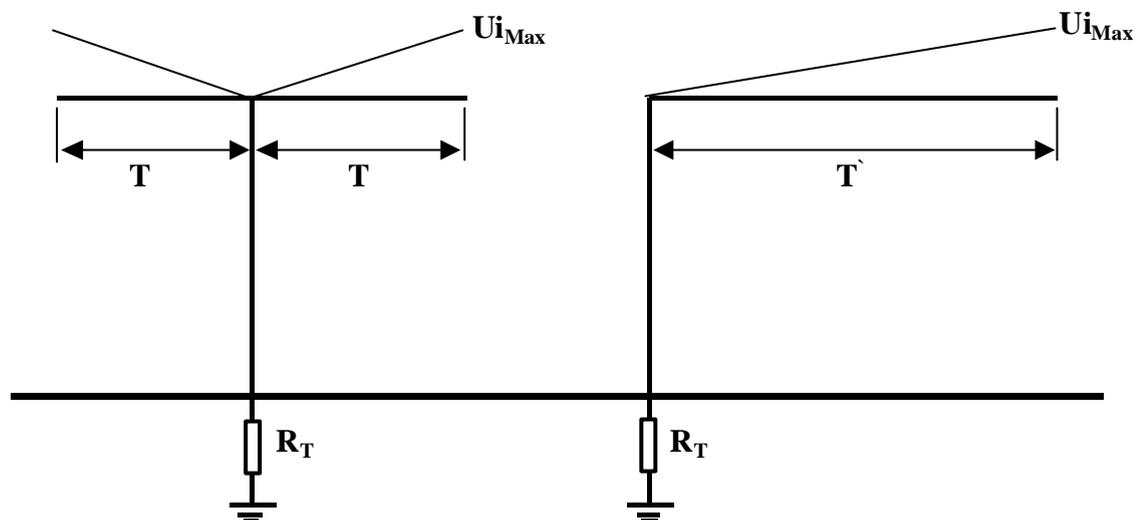


Figura 1- Esquema de un cable protector seccionalizado formando una “T” o una “Γ”.

$$\begin{bmatrix} (U) \\ (U_{CP}) \end{bmatrix} = L \cdot \begin{bmatrix} (Z_{11}) & (Z_{12}) \\ (Z_{21}) & (Z_{22}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (I) \\ (0) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde:

(U): Vector con los voltajes al neutro aplicados a la línea.

(U_{CP}): Vector con los voltajes inducidos electromagnéticamente en los cables protectores.

(I): Vector con las corrientes por las fases de la línea.

(0): Vector nulo con las corrientes en los cables protectores.

(Z_{11}): Submatriz con los elementos propios y mutuos entre los conductores de fase solamente

(Z_{12})=(Z_{21})_T: Submatrices con los elementos mutuos entre los conductores de fase y los cables protectores.

(Z_{22}): Submatriz con los elementos propios y mutuos de los cables protectores solamente.

L: Longitud en kilómetros del tramo de cable protector considerado.

Todas las submatrices de los parámetros de fase están modificadas por el efecto del retorno de las corrientes por la tierra mediante una corrección de Carson.

Despejando el voltaje inducido en los cables protectores:

$$(U_{CP})=L \cdot (Z_{21})(I) \quad (2)$$

Desarrollando:

$$(Z_{21}) = \begin{bmatrix} Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} \end{bmatrix} \Omega/\text{km} \quad (3)$$

Líneas con conductores múltiples.

El tratamiento de las líneas multiconductoras puede hacerse de dos formas:

1. Reduciendo el haz formado por dos, tres o más conductores a un conductor equivalente.
2. Calculando el voltaje inducido por todos los conductores del haz.

Las ecuaciones 4 y 5 para una línea simple circuito con dos conductores por fase y dos cables protectores, dan una idea más clara de lo anteriormente expuesto.

La ecuación 3 muestra cual es el voltaje inducido en el cable protector No. 7 por el haz de conductores de la fase "A", formado por los conductores 1 y 4, sin reducir:

$$U_7 = (Z_{71} \quad Z_{72} \quad Z_{73} \quad Z_{74} \quad Z_{75} \quad Z_{76}) \begin{pmatrix} I_1 \\ 0 \\ 0 \\ I_4 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

V/km (4)

La ecuación 4 muestra cual es el voltaje inducido en el cable protector No. 7 por el haz de conductores de la fase "A" reducido a un conductor equivalente:

$$U_7 = (Z_{7A} \quad Z_{7B} \quad Z_{7C}) \begin{bmatrix} I_A \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ V/km (5)}$$

Esta reducción se incorporó al programa VICPC para simplificar el algoritmo matemático y reducir el tiempo de ejecución porque se demostró que los voltajes inducidos así calculados son ligeramente superiores (menos de un 2 %) que los calculados como la suma fasorial de todos los conductores que forman el haz lo que da un pequeño margen de seguridad a los cálculos.

Voltajes máximos inducidos electromagnéticamente en los cables protectores.

Con el objetivo de determinar las condiciones de operación que provocan los mayores voltajes inducidos electromagnéticamente en los cables protectores, los mismos se calcularon para cargas trifásicas balanceadas de varios valores y factores de potencia; cortocircuitos trifásicos, de dos fases a tierra, entre fases y de una fase a tierra. Los resultados de esta investigación demostraron que los mayores voltajes inducidos se logran con los cortocircuitos de una fase a tierra porque, como es sabido, la suma de los campos magnéticos asociados con corrientes balanceadas es nula y por el contrario, cuando la falla involucra a una sola fase, el voltaje inducido es máximo porque no tiene ningún efecto contrario.

La figura 2 muestra las características del aislamiento de los cables protectores seccionalizados y aislados de la tierra. Cuando una descarga atmosférica provoca un sobrevoltaje, el arco salta a través del entrehierro mostrado, conecta a tierra el cable protector y protege la línea de forma efectiva.

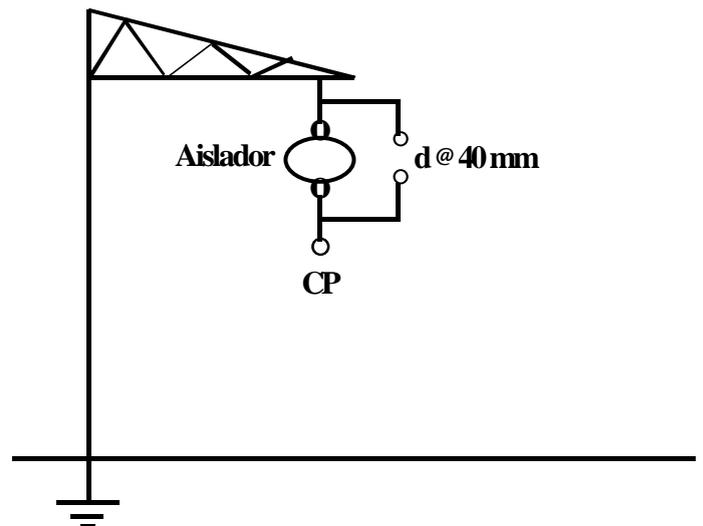


Figura 2- Características generales del aislamiento de los cables protectores (CP) aislados de la tierra

Para evitar que se establezca el arco en los entrehierros mencionados cuando ocurre un cortocircuito en la línea o que una vez establecido por una descarga atmosférica se mantenga, debe cumplirse la siguiente desigualdad⁽²⁾:

$$U_d \geq U_i \cdot K_A \cdot K_E \cdot K_M \quad (6)$$

Donde:

U_d : Voltaje al que ocurre la ruptura del espacio interelectrónico en kilovolt.

U_i : Voltaje inducido electromagnéticamente en los CP en kilovolt debido a la corriente que circula por los conductores de fase de la línea.

K_A : Coeficiente para considerar la asimetría de la corriente de cortocircuito.

K_E : Coeficiente para considerar la dispersión estadística de del voltaje al que ocurre la ruptura en el entrehierro.

K_M : Coeficiente para tener en cuenta la influencia de las condiciones meteorológicas en el voltaje de ruptura en el entrehierro.

En el algoritmo del programa VICPC se calcula el voltaje inducido en los cables protectores a partir de la expresión:

$$(U_i) = (Z_{21})(I) \cdot L \quad (7)$$

Donde:

$$(U_i) = \begin{bmatrix} U_4 \\ U_5 \end{bmatrix} \quad \text{Para el caso particular de una línea simple circuito con un conductor por fase y dos cables protectores.}$$

$$(I) = \begin{bmatrix} 0 \\ I_K \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Para un cortocircuito en la fase "K" (K=A, B o C) porque se busca cuál es la fase que da el mayor voltaje inducido por tener el mayor acoplamiento electromagnético.}$$

(Z_{21}) y L: Ya fueron definidos.

Efectuando en la ecuación 7, el voltaje inducido en el cable protector No. 4, suponiendo que un cortocircuito en la fase "C" es el que causa el mayor voltaje inducido:

$$U_4 = L \cdot Z_{43} \cdot I_3 \quad (8)$$

Despejando "L":

$$L = \frac{U_4}{Z_{43} \cdot I_3} \quad \text{km} \quad (9)$$

Despejando el voltaje inducido en 5 ($U_i = U_4$ en este caso particular) y sustituyéndolo en 9 se obtiene, dada la desigualdad mostrada, la longitud máxima que puede tener el segmento de un cable protector sin que se establezca el arco en el entrehierro con la máxima corriente debida a una falla ocurrida en la línea:

$$L = \frac{U_d}{Z_{43} \cdot I_3 \cdot K_A \cdot K_E \cdot K_M} = \frac{U_d}{U_4 \cdot K_A \cdot K_E \cdot K_M} \quad \text{km} \quad (10)$$

Influencia de la transposición en el voltaje inducido en los cables protectores.

La ecuación para calcular el voltaje inducido electromagnéticamente en los cables protectores de una línea simple circuito con un cortocircuito de una fase a tierra en la fase "B" es:

$$\begin{bmatrix} U_4 \\ U_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} \\ Z_{51} & Z_{52} & Z_{53} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_B \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Efectuando:

$$U_4 = Z_{42} \cdot I_B \quad \text{V/km} \quad (12)$$

$$U_5 = Z_{52} \cdot I_B \quad \text{V/km} \quad (13)$$

Donde la submatriz (Z_{21}) está en Ω/km

Como es sabido, la influencia de la transposición sobre los parámetros de fase de las líneas de transmisión se cumple para su longitud total. Como los parámetros de fase utilizados en el algoritmo del VICPC se calculan por unidad de longitud (en Ω/km), el voltaje inducido se calcula sin considerar la transposición de la línea.

Cálculo de la corriente debida a los cortocircuitos de una fase a tierra.

Para calcular el voltaje inducido máximo debido a los cortocircuitos de una fase a tierra y su variación, según el punto de cortocircuito (CC) se mueve a lo largo de la línea, hay que considerar el cálculo de dichas corrientes para líneas simple o doble circuito, radiales o con alimentación bilateral.

Se utilizó el método tradicional de las componentes simétricas a partir del voltaje de prefalla conocido en el punto de CC y de los parámetros de secuencia de la red. Además, se preparó un algoritmo que busca la

impedancia mutua máxima en la submatriz (Z_{21}) y almacena el número de orden de la fase y el cable protector con esto, se determina cuál es la ubicación del cortocircuito que provoca el mayor voltaje inducido y en cuál de los cables protectores se induce. La tabla I muestra algunos de los resultados obtenidos.

La figura 3 muestra un esquema básico de donde se derivan las posibilidades para representar el sistema eléctrico en las cabezas de la línea:

1. La línea puede ser simple o doble circuito.
2. El punto de ocurrencia del cortocircuito puede moverse en cualquier sentido a lo largo de la línea para buscar, automáticamente, el que da el mayor valor de corriente de cortocircuito.
3. Hay que conocer los niveles de cortocircuito en MVA del envío y del recibo para las fallas trifásica y de una fase a tierra.
4. El sistema considerado puede ser radial.

Identificación de la línea	Mayor Impedancia	Fase que da el mayor CC	Voltaje inducido en el CP No.
Mariel-Habana 220 (2 circuitos)	$Z_{72}=Z_{85}$	B	7
Mariel-San Agustín (2 circuitos)	$Z_{72}=Z_{85}$	B	7
Bayamo-Manzanillo (1 circuito)	Z_{42}	B	4
San Agustín-Naranjito (2 circuitos)	$Z_{71}=Z_{86}$	A	7

Tabla I- Resultados del algoritmo para buscar el voltaje inducido máximo.

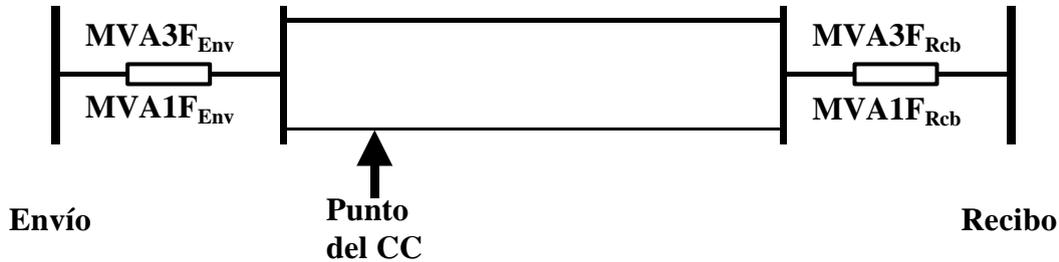


Figura 3- Monolínea con la representación de la línea y sus “cabezas”.

Resultados Prácticos.

Para obtener algunos resultados prácticos se modelaron dos líneas con el algoritmo VICPC⁽³⁾:

1. Una línea simple circuito (SC) a 220 kV con dos cables protectores de acero del tipo TK-70, una longitud de 160 km y un conductor por fase AC-400/51 con 400 mm² de sección transversal para un total de 8 conductores.
2. Una línea doble circuito (DC) a 220 kV con dos cables protectores del mismo tipo que la anterior, una longitud de 200 km y dos conductores AC-400/51 por fase para un total de 14 conductores.

Los niveles de cortocircuito supuestos en las cabezas de las líneas se muestran en la tabla 2.

Para los coeficientes del denominador de la expresión (10) se tomaron, de la referencia (4), los valores siguientes: $K_A=1,8$; $K_E=1,1$; $K_M=1,1$; $U_D=36$ kV

La tabla 3 muestra los resultados alcanzados

Línea	Niveles de cortocircuito en MVA			
	Envío		Recibo	
	Trifásico	Monofásico	Trifásico	Monofásico
SC	4043	4629	2498	2554
DC	2900	3080	3628	3709

Tabla 2- Niveles de cortocircuito en las cabezas de las líneas estudiadas.

Longitud Máxima:	Número de secciones.		El CC máximo es para la fase:	El voltaje máximo se Induce en el CP No.:
	En “T”	En “Γ”		
SC: 5,54 km	14	29	B	5
DC: 6,50 km	15	31	B	13

Tabla 3- Resultados del algoritmo VICPC (Voltaje Inducido en los cables protectores).

Fase con el CC.	Expresión general de la corriente de cortocircuito en la fase indicada.	En función del voltaje en la fase "A"
A	$I_A = \frac{3 \cdot U_A}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$	$I_A = \frac{3 \cdot U_A}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$
B	$I_B = \frac{3 \cdot U_B}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$	$I_B = \frac{3 \cdot a^2 U_A}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$
C	$I_C = \frac{3 \cdot U_C}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$	$I_C = \frac{3 \cdot a U_A}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$

Tabla 4- Expresiones para las corrientes debidas a un cortocircuito monofásico en cualquiera de las tres fases de una línea de transmisión.

Conclusiones.

- Los mayores voltajes inducidos en los cables protectores se obtienen con los cortocircuitos de una fase a tierra.
- La tabla 4 muestra que el valor modular de la corriente de cortocircuito, cuando se calcula utilizando las componentes simétricas, es independiente de la fase en la que ocurre el cortocircuito, método utilizado en el VICPC.
- El valor del voltaje inducido en los cables protectores es función de la fase donde ocurre el cortocircuito porque depende de la ubicación en el espacio de los mismos con respecto a los conductores de fase.
- La longitud de los lados de la "T" o de las "T" es prácticamente proporcional al valor de la corriente de cortocircuito de ahí la importancia de obtener su valor máximo.
- Debido a la dificultades en conocer el valor de la resistividad del terreno, se analizó su efecto en el voltaje inducido encontrándose que: si la resistividad del terreno aumenta, el voltaje inducido aumenta, aunque no linealmente, ocurriendo un aumento mayor para valores de la resistividad del terreno entre 50 y 500 Ω -m.

DATOS DEL AUTOR.

Héctor Silvio Llamo Laborí.

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Centro de Investigaciones y pruebas Electroenergéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), Ciudad de La Habana.

En la actualidad, es jefe de la disciplina Sistemas Electroenergéticos e imparte cursos de pregrado y postgrado en las asignaturas relacionadas con los Sistemas Eléctricos de Potencia.