



TEORICO-EXPERIMENTALES

INFLUENCIA DEL MODELO MATEMÁTICO UTILIZADO EN LOS PARÁMETROS DE SECUENCIA DE LAS LÍNEAS A 34,5 KV

Héctor Silvio Llamo Laborí.

Resumen/Abstract

Se presentan los resultados de analizar cual es la influencia de la presencia de los cables protectores, el valor de la resistividad del terreno y la corriente que circula por los cables protectores en los parámetros de secuencia positiva, negativa y cero de las líneas a 34,5 kV con el objetivo de que los ingenieros y técnicos que calculan flujos de cargas y cortocircuitos con dichas líneas tengan una idea de la tendencia del error que se comete cuando se desprecian alguno de los aspectos tratados.

Palabras claves: Resistividad, Cables Protectores, Secuencia cero.

The results of analyzing the effect of the shield wires, the ground resistivity and the current ground return in the sequence parameters of 34,5 kV transmission lines are presented. It is intended that engineers and technicians that calculated load flow and short circuits with this type of lines gets an idea of the error tendency that exist if these aspects are disregarded.

Key words: Resistivity, Shield wires, Zero sequence.

Generalidades

La mayor o menor exactitud de la representación matemática de las líneas de transporte de energía eléctrica en cualquiera de los escalones que forman los sistemas eléctricos de potencia (SEP) influye decisivamente en los resultados de los estudios de flujos de carga y cortocircuitos. Los parámetros más afectados son los de secuencia cero y éstos, dado que tienen un valor que puede ser de 2 a 3,5 veces mayor que los de secuencia positiva en las líneas simple circuito y de 3 a 5 veces mayor en las doble circuito, modifican sustancialmente los resultados de las corrientes de cortocircuito que comprenden la tierra.

Para que los parámetros de secuencia cero estén próximos a los de la línea real, deben incluir el efecto del retorno de las corrientes por la tierra y el efecto de los cables protectores.

El efecto del retorno de las corrientes por la tierra se incluye mediante las correcciones debidas a Carson que son función de la frecuencia, de la resistividad del terreno y de la disposición de los conductores en el espacio. El efecto de los cables protectores se incluye aplicando una reducción de Kron a los

parámetros de fase (físicos) de la línea. El algoritmo PARLINC⁽¹⁾, utilizado para obtener los resultados mostrados en este trabajo, tiene en cuenta estos dos efectos por lo que la exactitud de los parámetros de secuencia calculados es satisfactoria para la mayoría de los cálculos realizados por los ingenieros y técnicos que trabajan en los SEP.

Los resultados se obtuvieron modelando una línea a 34,5 kV dispuesta en estructuras tangentes tipo "A" normalizadas en Cuba, tomadas de la referencia 2 suponiéndole una longitud de 1 km y conductores con los datos mostrados en la tabla 1.

Conductores y/o CP.	Resistencia en Ω/km	Diámetro en mm	RMG en mm
CU#4/0-7	0,188	13,260	4,810
CU#3/0-7	0,237	11,790	4,280
CU#2/0	0,299	10,520	3,820
3/8"40A	4,350	9,520	$1,83 \cdot 10^{-6}$

Tabla 1- Datos de los conductores de fase y cables protectores utilizados en el análisis.

Influencia de los cables protectores en los parámetros de secuencia

Para obtener los resultados de las tablas 2 y 3 se modelaron dos estructuras, una con el cable protector (4 hilos), otra sin el cable protector (3 hilos) y se obtuvieron los parámetros de secuencia de la línea.

La tabla 2 muestra que los parámetros de secuencia positiva son independientes de la presencia de los cables protectores,

resultado esperado porque como es sabido, las corrientes de secuencia positiva son balanceadas, su suma fasorial es cero y al no tener efecto sobre los cables protectores, éstos no la tienen sobre los parámetros de la línea.

Conductor/Cable Protector	Resistencia de Sec. (+)	Reactancia de Sec. (+)
CU#4/0-7 / 3/8"40 ^a	(*) 0,188	0,439
	(♠) 0,188	0,439
CU#3/0-7 / 3/8"40 ^a	(*) 0,237	0,448
	(♠) 0,237	0,448
CU#2/0- / 3/8"40 ^a	(*) 0,299	0,457
	(♠) 0,299	0,457

(*): Línea sin cable protector.

(♠): Línea con cable protector.

Tabla 2- Influencia del cable protector en los parámetros de secuencia positiva.
Resultados en Ω/km .

Cond./CP	R de Sec. 0	Variación en %	X de Sec.0	Variación en %	Z de Sec.0	Variación en %
CU#4/0-7 / 3/8"40A	(*) 0,366	-20,261	1,854	4,392	1,889	2,999
	(♠) 0,459		1,776		1,834	
CU#3/0-7 / 3/8"40A	(*) 0,415	-18,307	1,863	4,369	1,909	2,856
	(♠) 0,508		1,785		1,856	
CU#2/0-/ 3/8"40A	(*) 0,477	-16,316	1,872	4,406	1,932	2,711
	(♠) 0,570		1,793		1,881	

(*): Línea sin cable protector.

(♠): Línea con cable protector.

Tabla 3- Influencia del cable protector en los parámetros de secuencia cero. Resultados en Ω/km .

La tabla 3 muestra como influye la presencia del cable protector en la resistencia, la reactancia y el módulo de la impedancia de secuencia cero de la línea. El tipo de cable protector se mantuvo constante (acero, 3/8" con una corriente por el cable protector de 40 A). Los resultados alcanzados fueron los siguientes:

- La presencia del cable protector incrementa el valor de la resistencia de secuencia cero en un valor apreciable que es mayor mientras mayor es el calibre del conductor.
- Con la reactancia inductiva de secuencia cero ocurre lo contrario: Considerar la presencia del cable protector hace que la misma disminuya, el efecto es menor y prácticamente independiente del calibre de los conductores de fase.
- La variación del módulo de la impedancia de secuencia cero es muy similar a la de la reactancia.

Donde:

U_{PF} : Voltaje de prefalla en el extremo del alimentador en volt de fase.

Z_1 , Z_2 y Z_0 : Impedancias de secuencia positiva, negativa y cero, respectivamente del alimentador en Ω/km .

La tabla 4 muestra los resultados para la línea con conductores de fase CU#4/0-7 y cable protector de acero 3/8"40A. Las diferencias en el módulo y en el ángulo de la corriente son pequeñas. No obstante, se recomienda no despreciar el efecto del cable protector para que las corrientes obtenidas estén lo más próximas posible a las reales.

Influencia de la presencia de los cables protectores en los resultados del cálculo de un cortocircuito monofásico

Para simplificar los cálculos, y teniendo en cuenta que lo que se busca es la influencia de los parámetros de la línea, se supondrá que la misma está alimentada desde una barra de capacidad infinita ($XCC=0$ en las tres secuencias) y que el cortocircuito es efectivo ($ZF=0$). En ese caso la corriente para un cortocircuito monofásico es:

$$I_{CC} = \frac{3 \cdot U_{PF}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \text{ Ampere} \quad (1)$$

¿Cable Protector?	Corriente de cortocircuito (A)	Variación en porcentaje
No	36559,91 / 74,81°	0,000/0,000
Si	37200,05 / 72,54°	-1,72 / 3,13

Tabla 4- Influencia de la presencia del cable protector en el valor de la corriente de un cortocircuito monofásico.

Influencia de la resistividad del terreno

La resistividad del terreno es un parámetro difícil de calcular y es usual suponer un valor de 100 Ω -m. En la literatura se encuentra que dicho valor es un promedio muy aceptado. Sin embargo, a veces las líneas se tienden por terrenos rocosos donde la resistividad posee valores mucho mayores o por terrenos agrícolas donde la resistividad es de 50 Ω -m. Cuando se calculan las corrientes de ajuste de los relevadores es necesario tener en cuenta las condiciones reales del terreno por donde está trazada la línea para evitar fallas en su operación.

La tabla 5 muestra los resultados alcanzados con el programa PARLINC modelando la misma línea a 34,5 kV anterior. Se mantuvieron el mismo conductor y el mismo cable protector, pero

se cambiaron los valores de la resistividad del terreno. Los resultados alcanzados pueden resumirse a partir de las siguientes conclusiones:

- Los parámetros de secuencia positiva son independientes de la resistividad del terreno porque la trayectoria de las corrientes de dicha secuencia no comprende la tierra.

Resistividad En Ω -m	R de Sec. 0	Variación en %	X de Sec.0	Variación en %	Z de Sec.0	Variación en %
50	(*) 0,366 (♠) 0,448	22,404	1,776 1,705	-3,998	1,813 1,763	2,836
60	(*) 0,366 (♠) 0,451	23,224	1,796 1,724	-4,008	1,833 1,782	2,862
70	(*) 0,366 (♠) 0,454	24,044	1,814 1,739	-4,135	1,851 1,797	3,005
80	(*) 0,366 (♠) 0,456	24,590	1,829 1,753	-4,155	1,865 1,811	2,982
90	(*) 0,366 (♠) 0,458	25,513	1,842 1,765	-4,180	1,878 1,823	3,017
100	(*) 0,366 (♠) 0,459	25,409	1,854 1,776	-4,207	1,889 1,834	3,041
200	(*) 0,366 (♠) 0,471	28,689	1,932 1,846	-4,451	1,966 1,905	3,202
400	(*) 0,366 (♠) 0,484	32,240	2,011 1,916	-4,724	2,044 1,976	3,441
600	(*) 0,366 (♠) 0,491	34,153	2,057 1,956	-4,910	2,089 2,017	3,569
1000	(*) 0,366 (♠) 0,501	36,885	2,114 2,007	-5,061	2,145 2,069	3,673
10000	(*) 0,366 (♠) 0,550	50,273	2,375 2,234	-5,936	2,403 2,301	4,433

(*): Línea sin cable protector.

(♠): Línea con cable protector.

Tabla 5- Influencia de la resistividad del terreno en los parámetros de secuencia cero.

- Cuando las líneas carecen de cable protector o se ha despreciado su efecto, la resistencia de secuencia cero es independiente de la resistividad del terreno. Esto se debe a que este efecto se incluye mediante la fórmula de Carson con una corrección de primer orden que, para la parte resistiva, es función de la frecuencia solamente como se muestra en la ecuación 2.

$$\Delta R_{ii} = \Delta R_{ik} = \Pi^2 \cdot 10^{-4} \cdot f \quad (2)$$

Donde:

$\Delta R_{ii} = \Delta R_{ik}$: Correcciones de Carson a las partes reales de los elementos propios y mutuos de la matriz impedancia de los parámetros de fase (Z).

f: Frecuencia del SEP en Hz (≤ 60 Hz)

- Con la parte reactiva no sucede lo mismo porque las correcciones de Carson para las partes imaginarias de los elementos de la matriz (Z) dependen del parámetro “De” que es función de la resistividad del terreno como se muestra en las expresiones 3, 4 y 5.

$$\Delta X_{ii} = L - N \cdot \ln(2 \cdot De \cdot Y_i) \quad (3)$$

$$\Delta X_{ik} = L - N \cdot \ln(2 \cdot De \cdot S_{ik}) \quad (4)$$

Donde:

$$De = 4 \cdot \Pi \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{5f}{r}} \quad (5)$$

$$L = 2,46372 \cdot 10^{-4} \cdot \Pi \cdot f \quad (6)$$

$$N = 4 \cdot \Pi \cdot 10^{-4} \cdot f \quad (7)$$

Y_i : Altura promedio del conductor “i” en metros.

S_{ik} : Distancia entre el conductor “i” y la imagen del conductor “k”.

- Según aumenta la resistividad del terreno, el incremento de la resistencia de secuencia cero por considerar el efecto de los cables protectores (CP) es mayor: Para el rango de valores de resistividad mostrado, entre el 22,404 y el 50,273 %.
- Con las reactancias de secuencia cero ocurre lo contrario. Es decir, al aumentar la resistividad del terreno las reactancias tienden a disminuir cada vez más si se comparan con los parámetros sin cables protectores, pero la variación es pequeña y casi constante en un amplio margen de variación de la resistividad (desde 50 hasta 600 Ω -m).

Error en el cálculo de las impedancias de secuencia cero y en el valor de las corrientes de cortocircuitos monofásicos si se suponen 100 W-m de resistividad en lugar de la real.

La tabla 6 muestra la variación de la resistencia y la reactancia de secuencia cero del alimentador a 34,5 kV modelado en este trabajo cuando se calculan suponiendo una resistividad promedio de 100 W-m y ésta es de un valor diferente.

Las partes resistivas y reactivas varían en el mismo sentido que lo hace la resistividad del terreno por lo que es fácil tener una idea de la tendencia del error.

Por otro lado, debe notarse que las variaciones disminuyen cuando la resistividad aumenta. Por ejemplo, de 200 a 600 W-m, (400 W-m de incremento) aumenta negativamente un 3,653 % y de 600 a 10000 W-m, (9400 W-m de incremento), el 8,189 %.

La tabla 7 indica que los errores en el valor de las corrientes debidas a un cortocircuito monofásico pueden ser apreciables e invalidar el ajuste de un relé de impedancia o de sobrecorriente si la diferencia entre el valor de resistividad supuesto y el real es apreciable.

Mientras mayor es la diferencia, en cualquier sentido, entre la resistividad real y la supuesta, mayor es la diferencia entre la corriente real y la calculada

ρ en Ω -m	Resistencia de Secuencia 0	Variación cra. 100 Ω -m	Reactancia de Secuencia 0	Variación cra. 100 Ω -m
50	0,448	-2,396	1,705	-3,998
60	0,451	-1,743	1,724	-2,928
70	0,454	-1,089	1,739	-2,083
80	0,456	-0,654	1,753	-1,295
90	0,458	-0,218	1,765	-0,619
100	0,459	0,000	1,776	0,000
200	0,471	2,614	1,846	3,941
400	0,484	5,447	1,916	7,883
600	0,491	6,972	1,956	10,135
1000	0,501	9,150	2,007	13,007
10000	0,550	19,826	2,234	25,788

Tabla 6- Variación de las impedancias de secuencia cero de una línea a 34,5 kV cuando se calculan suponiendo que la resistividad del terreno es de 100 Ω -m y realmente es de otro valor menor y/o mayor. Resultados en Ω /km.

ρ en Ω -m	Corriente de un cortocircuito Monofásico en Ampere.	Variación en porcentaje por utilizar 100 Ω -m en lugar del valor real.
50	38174,41	2,621
60	37907,92	1,905
70	37689,81	1,318
80	37508,15	0,829
90	37344,39	0,389
100	37199,44	0,000
200	36282,69	-2,464
400	35403,98	-4,827
600	34923,74	-6,117
1000	34323,80	-7,730
10000	31877,54	-14,306

Tabla 7- Variación de las corrientes de cortocircuito de una línea a 34,5 kV cuando se calculan suponiendo que la resistividad del terreno es de 100 Ω -m y realmente es de otro valor menor y/o mayor.

Influencia del valor de la corriente por el cable protector en los parámetros de secuencia de la línea.

Los conductores de acero se utilizan extensivamente para proteger las líneas de transmisión aéreas contra las descargas atmosféricas en regiones donde el ambiente no es salino o con contaminación química.

Debido a su alta permeabilidad, los conductores de acero tienen una inductancia interna mayor que los conductores no magnéticos de cobre, bronce o aluminio. También, su relación entre la resistencia efectiva a la corriente alterna y su resistencia a la corriente directa es mayor que la de los conductores no magnéticos de la misma sección transversal debido a las pérdidas histerésicas y a que tienen un efecto pelicular mayor.

En los conductores de acero, la resistencia a la corriente alterna y la inductancia interna varían cuando varía la corriente. Para un conductor de sección transversal constante, que opere a la temperatura del ambiente y a frecuencia constantes, la resistencia a la corriente alterna y la reactancia interna aumentan cuando la corriente aumenta desde cero. Si la permeabilidad es alta, estos in-

crementos alcanzan su valor máximo para valores de corrientes relativamente bajos. Más allá de estos valores, la resistencia y la reactancia decrecen. Cuando la permeabilidad es baja, los incrementos mencionados antes son menores y los valores máximos de la resistencia y la reactancia pueden no alcanzarse con valores tan altos como los de las corrientes permisibles por capacidad térmica.

Los valores máximos de resistencia y reactancia se alcanzan aproximadamente al mismo valor de corriente y éstos se corresponden con la permeabilidad máxima del conductor.

La tabla 8 muestra los parámetros de los conductores de acero utilizados como cables protectores en algunas líneas a 33 kV para que se aprecie la influencia de la corriente que circula por el cable en sus parámetros.

Cable Protector Tipo:	Resistencia en Ω/km	Diámetro en mm	Radio Medio Geométrico en mm
3/8"40A	4,350	9,520	$1,830 \cdot 10^{-6}$
3/8"30A	4,040	9,520	$3,050 \cdot 10^{-6}$
3/8"20A	3,600	9,520	$91,40 \cdot 10^{-6}$
3/8"10A	3,040	9,520	$3,050 \cdot 10^{-3}$

Tabla 8- Variación de los parámetros de los cables protectores de acero cuando varía la corriente que por ellos circula entre 10 y 40 Ampere.

La tabla 9 muestra la influencia del valor de la corriente por los cables protectores en los parámetros de secuencia cero. No se muestran los de secuencia positiva porque no varían.

Como ya se explicó, y se muestra en la segunda columna, de la tabla 7, la resistencia eléctrica a 60 Hz aumenta cuando la co-

rriente por el cable protector aumenta. La columna de los RMG muestra que el efecto es similar en la inductancia propia o interna pues éste se sustituye en el denominador de la expresión de la reactancia.

Cable Protector	Resistencia de Sec. (0)	Diferencia En (%) (*)	Reactancia de Sec. (0)	Diferencia En (%) (*)	Impedancia de Sec. (0)	Diferencia En (%) (*)
3/8"40A	0,459	0,000	1,776	0,000	1,834	0,000
3/8"30A	0,464	1,089	1,768	-0,450	1,828	-0,327
3/8"20A	0,477	3,922	1,759	-0,957	1,823	-0,599
3/8"10A	0,497	8,279	1,742	-1,914	1,812	-1,199

(*): Con respecto a la primera (40 A)

Tabla 9- Variación de los parámetros de secuencia cero de una línea a 34,5 kV cuando varía la corriente que circula por el cable protector.

La tabla 9 muestra que la resistencia de secuencia cero aumenta hasta un 8,279 % cuando la corriente por el cable protector disminuye de 40 a 10 A. Sin embargo, la reactancia de secuencia cero disminuye, aunque mucho menos (hasta casi un 2 %). Su influencia predomina en la variación del módulo de la impedancia que disminuye hasta un valor máximo ligeramente mayor que el 1,0 %.

En este caso, la influencia de estas variaciones en el valor de la corriente debida a un cortocircuito monofásico es poco notable como muestra la tabla 10. También se observa que mientras mayor es la corriente por el CP, menor es la corriente de cortocircuito

Corriente por el Cable Protector en Ampere	Corriente debida a un cortocircuito Monofásico en Ampere.
40	37200,11
30	37282,12
20	37343,99
10	37478,00

Tabla 10 – Variación de la corriente de un cortocircuito monofásico con la variación de la corriente que circula por el cable protector.

Resumen

Se demostró que es necesario modelar las líneas de transporte de energía eléctrica en general y las de 34,5 kV en particular considerando el efecto de los cables protectores y de la resistividad del terreno porque influyen en el valor de los parámetros de secuencia cero modificando los valores de las corrientes de cortocircuito que comprenden la tierra.

Referencias

- 1- Llamo, H. S.: "PARLINC. Programas para realizar un análisis integral de las líneas de transporte de energía eléctrica". CIPEL. ISPJAE. 1997.
- 2- UNE: "Normas para Líneas Aéreas de Distribución y Subtransmisión. Grupo Especial de Proyectos".
- 3- Llamo, H. S.: "Cálculo de los parámetros inductivos de las redes de distribución primaria y secundaria". Monografía. Universidad Mayor de San Simón. Bolivia. 2003.

DATOS DEL AUTOR.

Héctor Silvio Llamó 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.