



¿CUÁL ES LA MEJOR DISPOSICION DE LAS FASES EN UNA LINEA DE TRANSMISION DOBLE CIRCUITO?

Héctor Silvio Llamó Laborí

RESUMEN/ABSTRACTS

Se presentan las características matemáticas y los resultados del algoritmo OPTFASE.EXE. El mismo permite optimizar la disposición de las fases en las líneas doble circuito de cualquier configuración y conductores sencillos o múltiples. Los dos circuitos pueden estar en la misma torre o en el mismo derecho de vía.

Palabras claves: Optimizar, Doble circuito, Asimetría, Permutaciones

In this paper is presented the mathematical characteristics and the result of OPTFASE.EXE algorithm. Its permit to optimize the phase dispositions of double circuit transmission lines of any configuration, single or bundled conductors which can be in the same tower or right of way.

Key words: Optimize, Double circuits, Asymmetry, Permutations.

INTRODUCCIÓN.

Cuando el ingeniero proyectista de redes de transmisión de energía eléctrica tiene la posibilidad de escoger entre varias estructuras diferentes para líneas doble circuito debe tener una herramienta matemática que le permita decidir con un alto grado de certeza cuál es la estructura que le proporciona, para una disposición determinada de las fases, un valor de reactancia inductiva adecuado desde los puntos de vista de la caída de voltaje y el consumo de potencia reactiva con una asimetría que disminuya el desbalance que introduce la línea a valores que tal vez eviten la necesidad de transponer la línea.

Se presentan las características de un algoritmo que resuelve el problema planteado porque entrega con un mínimo de datos, para todas las permutaciones posibles entre las seis fases que forman un doble circuito: las reactancias equivalentes del doble circuito, las asimetrías a las secuencias cero y negativa y el incremento de la Capacidad Estática de la transmisión.

PLANTEAMIENTO MATEMÁTICO DEL ALGORITMO

En los textos donde se analizan las redes de transmisión se calcula la reactancia equivalente por fase de las líneas doble circuito aplicando el método de la Distancia Media Geométrica (DMG)⁽¹⁾.

El algoritmo matemático presentado en este trabajo y denominado OPTFASE utiliza un método matricial más general que permite analizar líneas con conductores sencillos o múltiples, cualquier configuración, cualquier número de circuitos y, como se trabaja en cantidades de fase, no tiene que hacerse la suposición de que la línea está simétricamente transpuesta⁽²⁾.

Para facilitar la explicación se utilizará una línea del Sistema Electroenergético Nacional (SEN): la línea a 220 kV Central Termoeléctrica del Este de la Habana (Santa Cruz) Subestación Cotorro. Esta

línea tiene 24,2 km, está formada por estructuras de acero P235 con dos cables protectores de acero del tipo TK70 y dos conductores ACO-400 por fase. Como los resultados del algoritmo se expresan en valores relativos, para simplificar la entrada de los datos, se suponen conductores fijos para todas las líneas del tipo ACO-300, se toma una corrección de Carson de primer orden con una resistividad promedio de 100 W-m y se desprecia el efecto de los cables protectores.

Investigaciones realizadas por el autor de este trabajo condujeron a estas simplificaciones al demostrar que las mismas no modifican la tendencia de la variación de los resultados y simplifican la entrada de los datos de forma apreciable aspecto éste muy importante en la etapa de diseño.

La ecuación de las caídas de voltaje para los doce conductores de la línea suponiendo que el recibo está en cortocircuito es:

$$(U) = (Z')(I') \quad \text{V/km} \quad (1)$$

Donde:

(U') : Vector con las caídas de voltaje en los doce conductores activos de la línea.

(I') : Vector con las corrientes en los doce conductores activos de la línea.

(Z') : Matriz impedancia de orden doce con los parámetros electromagnéticos de fase.

Como la línea es doble circuito (DC) con dos conductores por fase se cumple que los voltajes de los conductores que forman las fases A, B y C son iguales entre sí ($U_1=U_4=U_7=U_{10}$ etcétera).

Mediante transformaciones elementales al sistema de ecuaciones 1 se logran ceros en las localizaciones de los voltajes 4 al 12 con lo que se obtiene el nuevo sistema de ecuaciones :

$$(U'')=(Z'')(I'') \quad V/km \quad (2)$$

Donde:

$$(U'')=(U_1 \ U_2 \ U_3 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0) \quad (3)$$

Haciendo una partición en la ecuación 2 por las filas y las columnas delimitadas por los ceros logrados en el vector voltaje y aplicando una reducción de Kron(3) se obtiene el nuevo sistema de ecuaciones de orden tres:

$$(U)=(Z_{eq})(I)=((Z_{11})-(Z_{12})(Z_{22})^{-1}((Z_{21}))(I)) \quad (4)$$

Donde:

(U): Vector de orden tres con los voltajes en las fases a, b y c.

(I): Vector con las corrientes en los conductores equivalentes que forman las fases. Por ejemplo:

$$I_a=I_1 + I_4 + I_7 + I_{10}$$

$$I_b=I_2 + I_5 + I_8 + I_{11}, \text{ etcetera.}$$

(Zeq): Matriz equivalente del doble circuito (DC) que es de orden tres.

(Z12), (Z22) y (Z21): Submatrices que surgen de la partición hecha a la matriz (Z'').

Si se aplica la ecuación de transformación de las componentes simétricas(3) a la matriz (Zeq) se obtiene:

$$(Z_s)=(S)^{-1}(Z_{eq})(S) \quad (5)$$

Donde:

(S) y (S)⁻¹: Matrices de transformación de las componentes simétricas.⁽³⁾

(Zs): Matriz con las componentes simétricas de los parámetros inductivos del DC equivalente.

En la matriz (Zs) los elementos propios son los parámetros de secuencia cero (0-0), positiva (1-1) y negativa (2-2) del circuito equivalente del DC y los elementos mutuos, 0-1 y 2-1, dan una idea de la asimetría de la línea a las secuencias cero y negativa.

Para analizar una estructura dada, el algoritmo calcula y almacena los elementos Z00, Z11, Z01 y Z21 para cada una de las seis permutaciones posibles entre las fases de los dos circuitos y tabula los resultados que se muestran a continuación para la línea analizada en este trabajo.

RESULTADOS PRÁCTICOS DEL ALGORITMO OPTFASE.

Cto. 1	Cto. 2	$\frac{X_{eq}}{X_{Max}} \%$	$\frac{Z_{01}}{Z_1} \%$	$\frac{Z_{21}}{Z_1} \%$
a-b-c	a-b-c	100	6,22	12,44
a-b-c	a-c-b	96,75	3,84	8,48
a-b-c	b-a-c	96,75	3,84	8,48
a-b-c	c-a-b	93,04	3,61	1,95
a-b-c	b-c-a	93,04	3,61	1,94
a-b-c	c-b-a	92,54	6,71	5,45

Tabla 1- Resultados del análisis de la línea CTE Habana - Cotorro con el algoritmo OPTFASE.

La tabla 1 muestra varios resultados de interés para los proyectistas de las líneas de transmisión doble circuito:

- La disposición de las fases a-b-c a-b-c es la que tiene la mayor reactancia inductiva a la secuencia positiva. Ello implica la menor Capacidad Estática de la Transmisión (CET) y las mayores pérdidas de potencia reactiva.

- Esta misma disposición de las fases es la que presenta la mayor probabilidad de que la línea tenga que ser transpuesta por ser la que tiene la mayor asimetría a la secuencia negativa.⁽⁴⁾
- La disposición de las fases a-b-c b-c-a es la de menor asimetría a la secuencia negativa por lo que utilizarla podría evitar su transposición⁽⁴⁾.
- La disposición de las fases a-b-c c-b-a es la que tiene la menor reactancia a la secuencia positiva y por ende es la de mayor CET. Así, si es posible obviar el hecho de que es la disposición que ofrece el mayor desbalance a la secuencia cero, su utilización permite, sin costo adicional, un incremento de la CET del 8,06% lo que no es despreciable.

CONCLUSIONES.

Se mostraron las características matemáticas y los resultados de un algoritmo muy útil para los ingenieros diseñadores y proyectistas de líneas de transmisión y de estructuras porque permite conocer las características eléctricas más importantes de las líneas doble circuito a partir de las seis disposiciones posibles que pueden darse a sus fases. Su importancia económica estriba en que los cambios en la disposición de las fases se hacen sin modificar el costo del proyecto.

El algoritmo trabaja con líneas DC ubicadas en la misma torre o en el mismo derecho de vía, con cualquier configuración y hasta 28 conductores sencillos o múltiples (bundled conductors).

REFERENCIAS.

- 1- Grainger J. J. Stevenson W. D.: "Power System Analysis." McGraw-Hill. 1994.
- 2- Llamó H. S.: "Cálculo Automatizado Para el diseño de las líneas de transmisión de Energía Eléctrica." Tesis para el grado de Dr. En Ingeniería Eléctrica.
- 3- Anderson P.: "Analysis of Faulted Power Systems." Iowa State University Press. 1973.
- 4- Llamó H. S. "Como evitar la transposición de las líneas doble circuito." Revista Energética. Volumen XX, No. 2. 1999.

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.