



Influencia de la disposición de las fases en el comportamiento eléctrico de la línea doble circuito CTE Habana Cotorro

Héctor Silvio Llamo
Julio Marcelo Arias

Recibido: Junio del 2008
Aprobado: Septiembre del 2008

Resumen/ Abstract

En este trabajo se presentan los resultados de analizar como influye la disposición de las fases de una línea doble circuito en aspectos importantes de su comportamiento eléctrico como son: sus parámetros inductivos y capacitivos equivalentes a las secuencias positiva, negativa y cero, sus caídas de tensión y pérdidas de potencia activa y reactiva, su impacto ecológico, el valor de las pérdidas por efecto corona, su cargabilidad, etcétera. Los resultados se obtuvieron modelando la línea doble circuito a 220 kV que enlaza la estación generadora del Este de la Habana con la barra a 220 kV de la subestación Cotorro. Además, se analiza el error que se comete cuando se desprecia el acoplamiento mutuo entre los circuitos de la línea.

Palabras claves: disposición de las fases, acoplamiento mutuo, parámetros de secuencia

In this paper are presented the results of the influence of phase dispositions of a double circuit's transmission lines in various important aspects like its equivalent inductive and capacitive parameters of sequence positive, negative and zero, its tension drops and active y reactive losses, its ecological impact, the corona losses value, its chargeability, etc. This result was obtained modeling the double circuit line at 220 kV that link the generation station East of Havana with the bus bar at 220 kV of Cotorro Sub Station. Beside of that, it was analyzed the error make when the mutual coupling between the line circuits is not take into account.

Key words: phase dispositions, mutual coupling, sequence parameters

INTRODUCCIÓN

Cuando se realizan por métodos manuales cálculos de flujos de carga, cortocircuitos, estabilidad, etcétera, es usual simplificar las líneas doble circuito cuyos circuitos están en la misma estructura suponiendo una línea equivalente en la que sus parámetros inductivos son la mitad de los de cada circuito individual y los capacitivos el doble. Este modelo es correcto

si se puede despreciar el acoplamiento mutuo entre ambos circuitos.

En este trabajo se calculan los parámetros de secuencia positiva, negativa y cero de una línea doble circuito, despreciando y sin despreciar dicho acoplamiento para determinar hasta que punto el modelo que los desprecia y que se llamará "tradicional" es correcto. También se

analiza que influencia tiene la disposición de las fases de un circuito con respecto a las del otro en dicho comportamiento eléctrico pues con cambios que, en la etapa de diseño carecen de costos adicionales, es posible lograr una mejor operación de la línea.

MODELO MATEMÁTICO DEL DOBLE CIRCUITO EQUIVALENTE A UN SIMPLE CIRCUITO

Las ecuaciones matriciales que dan el comportamiento matemático de una línea doble circuito con cualquier configuración y número de conductores por fase, incluyendo el efecto de los cables protectores y del retorno de las corrientes por la tierra son ⁽¹⁾:

$$(\underline{U})_6 = (\underline{Z})_{6,6}(\underline{I})_6 \quad (2.1)$$

$$(\underline{I})'_6 = (\underline{Y})_{6,6}(\underline{U})_6 \quad (2.2)$$

Donde $(\underline{U})_6$, $(\underline{I})_6$ e $(\underline{I})'_6$ son los vectores de orden seis con las tensiones al neutro, las corrientes debidas a la carga y las corrientes capacitivas respectivamente en cada fase del doble circuito. $(\underline{Z})_{6,6}$ y $(\underline{Y})_{6,6}$ son las matrices de orden seis con los parámetros inductivos y capacitivos respectivamente de la línea.

La ecuación (2.1) desarrollada es:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \\ \underline{U}_4 \\ \underline{U}_5 \\ \underline{U}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\underline{Z})_I & (\underline{Z})_{I-II} \\ (\underline{Z})_{II-I} & (\underline{Z})_{II} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{I}_4 \\ \underline{I}_5 \\ \underline{I}_6 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Donde $(\underline{Z})_I$ y $(\underline{Z})_{II}$ son las submatrices con los elementos propios y mutuos de y entre las fases que forman los circuitos I y II respectivamente, mientras, $(\underline{Z})_{I-II} = \text{Transpuesta de } (\underline{Z})_{II-I}$ son las submatrices donde están los elementos mutuos entre los circuitos I y II.

Teniendo en cuenta las relaciones que las tensiones \underline{U}_1 y \underline{U}_4 , \underline{U}_2 y \underline{U}_5 , y \underline{U}_3 y \underline{U}_6 son iguales entre sí dos a dos, se realizan transformaciones elementales al sistema de ecuaciones (2.3) consistentes en restar las filas y las columnas 1, 2 y 3 de las filas y las columnas 4, 5 y 6 respectivamente para lograr el nuevo sistema de ecuaciones.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\underline{Z})'_I & (\underline{Z})'_{I-II} \\ (\underline{Z})'_{II-I} & (\underline{Z})'_{II} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{I}_1 + \underline{I}_4 \\ \underline{I}_2 + \underline{I}_5 \\ \underline{I}_3 + \underline{I}_6 \\ \underline{I}_4 \\ \underline{I}_5 \\ \underline{I}_6 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Aplicándole una reducción de Kron al sistema de ecuaciones (2.4) se reduce su orden de 6 a 3 y el nuevo sistema será:

$$(\underline{U})_3 = (\underline{Z})_{3,3}(\underline{I})_3 \quad (2.5)$$

Aplicando la ecuación de transformación de las componentes simétricas ⁽¹⁾ a la matriz $(\underline{Z})_{3,3}$ de la ecuación (2.5), se obtienen los parámetros de secuencia de la línea equivalente. Así:

$$(\underline{Z}_S) = (\underline{S})^{-1}(\underline{Z})_{3,3}(\underline{S}) = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{00} & \underline{Z}_{01} & \underline{Z}_{02} \\ \underline{Z}_{10} & \underline{Z}_{11} & \underline{Z}_{12} \\ \underline{Z}_{20} & \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{22} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Donde: \underline{Z}_{00} es la impedancia de secuencia cero de la línea simple circuito equivalente a un doble circuito en ohm.

$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{22}$ son las impedancias de secuencia positiva y negativa de la línea simple circuito equivalente a un doble circuito en ohm.

El desarrollo anterior se hace también para los parámetros capacitivos partiendo de la ecuación (2.2) si se despeja el vector de las tensiones al neutro (U_6) y se obtienen los parámetros de secuencia capacitivos \underline{B}_{00} , y $\underline{B}_{11} = \underline{B}_{22}$ en siemen.

INFLUENCIA DEL ACOPLAMIENTO MUTUO ENTRE LOS CIRCUITOS SOBRE LOS PARÁMETROS EQUIVALENTES DE SECUENCIA POSITIVA, NEGATIVA Y CERO

Para cuantificar el efecto del acoplamiento mutuo entre los circuitos de una línea doble circuito se modeló la línea de transmisión a 220 kV CTE Habana Cotorro con 31 km, 2 conductores de 400 mm² por fase y 2 cables protectores de acero de 70 mm² para un total de 14 conductores. Se supuso una flecha de 9 m para los conductores de fase y de 7,2 m para los cables protectores. El programa MZYC.EXE del paquete de programas PARLINC⁽²⁾, forma, inicialmente, un sistema de ecuaciones de 14 por 14 que es reducido a 6 por 6 mediante una reducción de Kron⁽¹⁾, tanto para los parámetros inductivos, como para los capacitivos.

La tabla 3.1 muestra los acoplamientos inductivos mutuos entre ambos circuitos, en ohm, para la línea tal como está operando realmente, y la tabla 3.2, suponiendo que un circuito está a 1 km del otro. Las reducciones en las partes reales e imaginarias de las impedancias son del mismo orden, siendo las mayores las del elemento 1-4 pues la resistencia y la reactancia mutuas reales son 10,39 y 2,49 veces mayores, respectivamente, que cuando los circuitos se suponen a 1 km entre sí.

$\underline{Z}_{1-4} =$ 8,484+j70,647	$\underline{Z}_{1-5} =$ 8,328+j71,142	$\underline{Z}_{1-6} =$ 7,863+j70,664
	$\underline{Z}_{2-5} =$ 8,715+j72,736	$\underline{Z}_{2-6} =$ 8,528+j72,900
		$\underline{Z}_{3-6} =$ 8,886+j74,089

Tabla 3.1- Impedancias mutuas entre las fases de los circuitos I (1, 2 y 3) y II (4, 5 y 6) para ambos circuitos operando en la misma torre. Corrección de Carson de primer orden.

$\underline{Z}_{1-4} =$ 0,816+j28,274	$\underline{Z}_{1-5} =$ 0,825+j29,343	$\underline{Z}_{1-6} =$ 0,833+j30,130
	$\underline{Z}_{2-5} =$ 0,839+j29,633	$\underline{Z}_{2-6} =$ 0,846+j30,421
		$\underline{Z}_{3-6} =$ 0,857+j30,669

Tabla 3.2- Impedancias mutuas entre las fases de los circuitos I (1, 2 y 3) y II (4, 5 y 6) suponiendo que ambos circuitos están separados 1 km entre sí. Serie de Carson.

La tabla 3.3 muestra los parámetros inductivos y capacitivos equivalentes de secuencia cero y positiva de la línea modelada reales y cuando se calculan mediante el método tradicional que supone que los parámetros inductivos equivalentes son la mitad y los capacitivos el doble de los de uno de los circuitos.

Se denominó Exacto 1 al calculado por el procedimiento explicado en el epígrafe 2 si ambos circuitos se suponen a 1 km de separación y Exacto 2, con el mismo método, pero si la línea tiene sus dos circuitos en la misma torre.

La fila 1 (Cto. I = II), muestra los parámetros de cada circuito que son iguales entre sí porque los conductores de cada circuito están dispuestos simétricamente con respecto al eje de la estructura.

La segunda fila (Tradicional), muestra los parámetros equivalentes del doble circuito calculados como $\underline{Z}_{Eq} = \underline{Z}_i/2$ y $\underline{B}_{Eq} = 2 \cdot \underline{B}_i$ ($i = 0$ ó 1 para las secuencias cero y positiva).

Condición:	R ₀ (ohm)	X ₀ (ohm)	B ₀ (siemen)	R ₁ (ohm)	X ₁ (ohm)	B ₁ (siemen)
Cto. I = II	9,182	38,814	0,812·10 ⁻⁴	1,374	11,050	0,144·10 ⁻⁴
Tradicional	4,591	19,407	1,624·10 ⁻⁴	0,687	5,525	0,288·10 ⁻⁴
Exacto 1	5,261	21,317	1,430·10 ⁻⁴	0,683	5,527	0,287·10 ⁻⁴
Exacto 2	8,497	31,369	1,130·10 ⁻⁴	0,692	5,761	0,279·10 ⁻⁴

Tabla 3.3 Influencia del acoplamiento mutuo entre los circuitos en los parámetros de secuencia equivalentes del doble circuito.

Las filas Exacto 1 y 2 muestran que el error que se comete cuando se desprecia el acoplamiento mutuo entre los circuitos es pequeño a la secuencia positiva: una disminución máxima del 4,09 % en la reactancia inductiva y un aumento del 3,23 % en la susceptancia capacitiva. Pero es importante a la secuencia cero: una reducción del 45,97 % en la resistencia, del 38,13 % en la reactancia y un aumento del 43,72 % en la susceptancia. Las consecuencias de estas variaciones serían pequeñas en un cálculo de flujo de cargas, pero la relación entre las corrientes del cortocircuito de una fase a tierra para esta línea, conectada a una barra de capacidad infinita sería, tomando los módulos:

$$\frac{I_{CC} \text{ Aproximada}}{I_{CC} \text{ "Real"}} = \frac{/Z_0 + 2 \cdot Z_1 /_{Aprox.}}{/Z_0 + 2 \cdot Z_1 /_{Real}} = \frac{44,014}{31,036} = 1,418$$

La tabla 3.3 en su fila Exacto 1 muestra que la diferencia entre los parámetros se debe al acoplamiento mutuo entre los circuitos pues si fuera despreciable, como se muestra en la tabla 3.2, el incremento de la corriente de cortocircuito sería sólo del 6,46 %. Para un caso balanceado, la diferencia es solamente del 0,027 %.

INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS FASES EN EL VALOR DE SU REACTANCIA, SUS DESBALANCES Y SU CAPACIDAD ESTÁTICA DE LA TRANSMISIÓN

Cuando se proyecta un doble circuito, es posible, sin costo adicional, escoger la disposición de las fases de un circuito con respecto al otro que logra mejorar el comportamiento de la línea en aspectos como el valor de su reactancia inductiva, su desbalance a las secuencias cero y negativa, su capacidad estática de la transmisión (CET), etcétera. En la referencia 3 se muestra por el autor de este trabajo que es posible evitar la transposición de un doble circuito escogiendo una disposición adecuada para sus fases. El programa OPTFASE.EXE del paquete de programas PARLINC, da los resultados que se muestran en la tabla 4.1 para cualquier línea doble circuito⁽⁴⁾. La figura 4.1 muestra la disposición de las fases para tres de las seis posibles combinaciones.

La tabla 4.1 muestra que si lo que se desea es reducir las caídas de tensión, la mejor disposición de las fases es la ABC-CBA que como es natural, coincide con la que da un mayor incremento de la CET dada su menor reactancia. Sin embargo, si lo que se desea es reducir al máximo el desbalance que introduce la línea a la secuencia negativa, la mejor disposición es ABC-CAB.

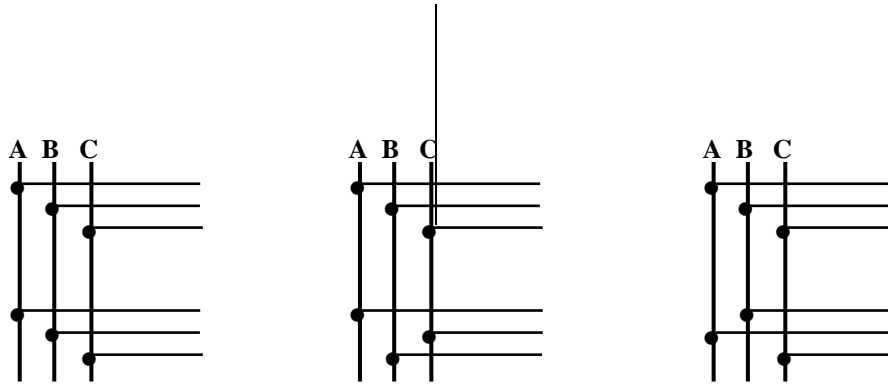


Fig. 4.1- Tres de las seis disposiciones posibles para las fases de un doble circuito.

Disposición de las fases:		$\frac{X_{1-Eq}}{X_{1-Max}}$ (%)	$\frac{I_{Secuencia\ 0}}{I_{Secuencia\ +}}$ (%)	$\frac{I_{Secuencia\ -}}{I_{Secuencia\ +}}$ (%)	Incremento de la CET (%)
Circuito I	Circuito II				
ABC	ABC	100 Máx.	6,270	12,435 (Máx.)	0,000 Mín.
	ACB	96,749	3,812	8,482	3,360
	BAC	96,749	3,842	8,482	3,360
	CAB	93,042	3,612 Mín.	1,955 (Mín.)	7,478
	BCA	93,042	3,612	1,955	7,478
	CBA	92,540 Mín.	6,706 Máx.	5,452	8,601 Máx.

Tabla 4.1- Influencia de la disposición de las fases de cada circuito en algunos aspectos del comportamiento de la línea doble circuito CTE Este de la Habana Cotorro.

INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS FASES EN LOS PARÁMETROS INDUCTIVOS Y CAPACITIVOS EQUIVALENTES DEL DOBLE CIRCUITO

Disposición de las fases:		R_0 (Ω)	X_0 (Ω)	B_0 (S) (10^{-4})	R_1 (Ω)	X_1 (Ω)	B_1 (S) (10^{-3})
Cto. I	Cto. II						
ABC	ABC	8,497	31,369	1,130	0,692	5,761	0,279
	ACB	8,488	31,352	1,130	0,695	5,572	0,284
	BAC	8,537	31,301	1,130	0,694	5,574	0,285
	CAB	8,525	31,322	1,130	0,689	5,361	0,292
	BCA	8,525	31,322	1,130	0,689	5,361	0,292
	CBA	8,521	31,363	1,130	0,682	5,334	0,294

Tabla 5.1- Influencia de la disposición de las fases de cada circuito en los parámetros inductivos y capacitivos equivalentes del doble circuito de la línea CTE Este de la Habana Cotorro.

La tabla 5,1 muestra que la disposición de las fases de cada circuito tiene poca influencia en el valor de los parámetros de secuencia de la línea doble circuito analizada.

La susceptancia de secuencia cero permanece constante y las mayores diferencias son del 0,57 % y 0,22 % en la resistencia y la reactancia de secuencia cero respectivamente.

Del 5,38 % en la susceptancia capacitiva de secuencia positiva y del 1,91 % y el 8,00 % en la resistencia y la reactancia de secuencia positiva respectivamente.

Estos resultados se obtuvieron con el programa PARAMC.EXE del paquete de programas PARLINC.

INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS FASES EN LA IMPEDANCIA MUTUA DE SECUENCIA CERO ENTRE LOS CIRCUITOS I Y II

Disposición de las fases:		R_{m-0} (Ω)	X_{m-0} (Ω)
Circuito I	Circuito II		
ABC	ABC	7,813	23,924
	ACB		
	BAC		
	CAB		
	BCA		
	CBA		
Línea transpuesta.			
Un circuito a 1 km del otro.		2,185	1,238

Tabla 6.1- Influencia de la disposición de las fases de cada circuito en los parámetros inductivos mutuos de secuencia cero entre los dos circuitos de la línea CTE Este de la Habana Cotorro.

Clarke, en la página 402 del tomo 1 del libro Circuit Analysis of A-C Power Systems escribe que la impedancia mutua de secuencia cero entre dos circuitos conectados en paralelo de una línea de transmisión depende de la separación entre los circuitos y de las características, el número y la localización de los cables protectores.

La magnitud de esta impedancia mutua para las líneas con sus dos circuitos colocados en la misma torre es del 50 % de la impedancia de secuencia cero de cada circuito, es independiente del grado de transposición de la línea y por ende en los problemas usuales que la involucran, no puede ser despreciada.

Para comprobar si el algoritmo PARAMC.EXE estaba dando resultados correctos, se obtuvieron los resultados de la tabla 6.1.

Los mismos demuestran que dicha impedancia es independiente de la disposición de las fases y de la transposición de la línea, pero que está influenciada por la separación entre los circuitos.

INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS FASES EN LA CARGABILIDAD DE LA LÍNEA DOBLE CIRCUITO

Disposición de las fases:		P _N (MW)	SIL (MW)	Q _{Gen.} (Mvar)	Límite de estabilidad estática	
Circuito I	Circuito II				(MW)	Ángulo (°)
ABC	ABC	399	401	16,09	7977	83,00
	ACB	410	411	16,38	8232	
	BAC	410	411	16,40	8232	
	CAB	423	424	16,81	8510	
	BCA	423	424	16,81	8552	
	CBA	425	427	16,91	8607	
Tradicional		414	415	16,57	8315	

Tabla 7.1- Influencia de la disposición de las fases de cada circuito en la cargabilidad de la línea doble circuito CTE Este de la Habana Cotorro. Resultados obtenidos con el programa PARAMC.EXE.

Disposición de las fases:		Caída de tensión (%)	Pérdidas de P (%)	Pérdidas de Q (%)
Circuito I	Circuito II			
ABC	ABC	10,00	2,40	29,96
	ACB	9,67	2,40	29,12
	BAC	9,66	2,39	29,12
	CAB	9,27	2,36	28,15
	BCA	9,27	2,36	28,15
	CBA	9,20	2,33	28,02
Tradicional		9,56	2,36	28,89

Tabla 7.2- Influencia de la disposición de las fases de cada circuito en las caídas de tensión y las pérdidas de la línea doble circuito CTE Este de la Habana Cotorro. Resultados obtenidos con el programa PARAMC.EXE.

Uno de los aspectos de mayor importancia en las líneas de transmisión es su cargabilidad. Antes de que se tuviera en cuenta su impacto ecológico, la cargabilidad se aumentaba, fundamentalmente, aumentando el nivel de tensión de la transmisión. En la actualidad se logra con las líneas de potencia natural aumentada o compactas con más de un conductor por fase. Los resultados de la tabla 7.1 muestran que, se puede lograr un incremento del 6,52 % en la potencia natural, del 6,48 % en la SIL, del 7,89 % en su límite de estabilidad estática y del 5,09 % en la potencia reactiva capacitiva sólo cambiando la disposición de las fases del

segundo circuito de ABC a CBA. La tabla 7.1 muestra, además, que el método tradicional que calcula la potencia natural y la SIL como el doble de la de uno de los circuitos da resultados que son ligeramente diferente que los que tienen en cuenta el acoplamiento mutuo entre los circuitos.

La tabla 7.2 muestra los resultados obtenidos para las caídas de tensión y las pérdidas con una transferencia de 1501 MVA, factor de potencia 0,9 en atraso. Las menores pérdidas y la menor caída de tensión se obtienen con la disposición ABC CBA, pero las disminuciones son sólo del 8,0, del 2,9 y del 6,48 % para la caída de tensión y las pérdidas de potencia activa y reactiva respectivamente.

INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS FASES EN LA DISTRIBUCIÓN DE LAS POTENCIAS POR CONDUCTOR ACTIVO Y EN LAS CAÍDAS DE TENSIÓN POR FASE DE LA LÍNEA

Disposición de las fases:		Desviación máxima con respecto a la distribución ideal (25 %)	Caídas de tensión: (%)			Desbalance de las caídas de tensión en porcentaje.
Circuito I	Circuito II		A (%)	B (%)	C (%)	
ABC	ABC	0,699	11,61	9,72	8,41	27,595
	ACB	10,060	9,85	10,70	8,15	23,850
	BAC	9,757	10,35	8,54	10,37	17,662
	CAB	10,240	9,82	9,11	9,11	7,246
	BCA	10,243	8,99	9,82	9,12	8,468
	CBA	0,888	10,17	9,32	8,34	18,030

Tabla 8.1- Influencia de la disposición de las fases de cada circuito en la distribución de las potencias por conductor activo y en las caídas de tensión por fase de la línea doble circuito CTE Este de la Habana Cotorro.

Utilizando el programa DECORRC.EXE del paquete de programas PARLINC se modeló la línea mediante sus Constantes Generalizadas Matriciales (de orden 12 en este caso) y se determinó qué potencia circulaba por cada conductor activo (12) en MW y Mvar y en porcentaje de la transferencia total de la fase.

La transferencia ideal sería un 25 % de la potencia total por fase pues en este caso hay cuatro conductores entre los circuitos I y II. Para no sobrecargar el trabajo con un exceso de resultados, en la tabla 8.1 se muestran solamente las desviaciones máximas con respecto a la ideal, que indica que la mejor disposición es ABC-ABC. Sin embargo los desbalances de las caídas de

tensión es la ABC-CAB con un 7,246 %, la disposición que reduce al máximo

INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS FASES DE CADA CIRCUITO EN LAS PÉRDIDAS DE POTENCIA Y ENERGÍA ACTIVAS EN LOS CABLES PROTECTORES Y EN LAS PÉRDIDAS POR EFECTO CORONA DE LA LÍNEA DOBLE CIRCUITO CTE ESTE DE LA HABANA COTORRO

Disposición de las fases:		Pérdidas en los cables protectores:	
Circuito I	Circuito II	En kilo watt.	En kilo watt hora/año.
ABC	ABC	7,42	33 768,30
	ACB	7,17	32 642,40
	BAC	12,25	55,785,00
	CAB	13,04	59 371,20
	BCA	12,87	58 616,40
	CBA	13,91	63 328,20

Tabla 9.1- Influencia de la disposición de las fases de cada circuito en las pérdidas de potencia y energía activas de la línea doble circuito CTE Este de la Habana Cotorro. Programa VICPC.EXE.

Las líneas de transmisión que tienen sus cables protectores continuos y conectados a tierra, tienen pérdidas adicionales en los mismos debido a que la tensión inducida electromagnéticamente en los mismos da lugar a la circulación de corrientes que provocan pérdidas de Joule en los mismos. La tabla muestra que dichas pérdidas pueden ser reducidas un máximo del 48,45 % cambiando la disposición de las fases ABC ACB lo que no cuesta nada en la etapa de construcción de la línea.

Las líneas de transmisión de 110 kV en adelante, tienen pérdidas por efecto corona que hacen que este fenómeno sea tenido en cuenta a la hora de seleccionar sus conductores. Mediante el programa CORONA.EXE se calcularon las pérdidas por efecto corona de la línea estudiada para las seis disposiciones posibles de sus fases observándose en la tabla 9.2 que se logra una

reducción máxima del 15,52 % si se utiliza la disposición de las fases ABC ABC.

Disposición de las fases:		Pérdidas por efecto corona con Buen tiempo en kilo watt.
Circuito I	Circuito II	
ABC	ABC	7,256
	ACB	7,739
	BAC	7,715
	CAB	8,246
	BCA	8,246
	CBA	8,289

Tabla 9.2- Influencia de la disposición de las fases de cada circuito en las pérdidas por efecto corona De la línea doble circuito cte este de la habana cotorr

INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DE LAS FASES DE CADA CIRCUITO EN EL IMPACTO ECOLÓGICO DE LA LÍNEA DOBLE CIRCUITO CTE ESTE DE LA HABANA COTORRO

Disposición de las fases:		Campo Eléctrico en kilo volt Efectivos por metro.	Campo Magnético en Micro teslas.
Circuito I	Circuito II		
ABC	ABC	2,685	15,896
	ACB	1,753	12,961
	BAC	2,653	14,754
	CAB	1,618	10,564
	BCA	1,765	10,564
	CBA	1,483	11,205

Tabla 10.1- Influencia de la disposición de las fases de cada circuito en el impacto ecológico de la línea doble circuito CTE Este de la Habana Cotorro. Para el campo eléctrico se supuso una tensión de 253 kV y una transferencia de 750,5 MVA por circuito para el campo magnético.

Un aspecto de primera importancia en el diseño de las líneas de transmisión es reducir al máximo su impacto ecológico en el medio que la rodea. Utilizando los programas CAMPOEL.EXE y CMDESBAL.EXE pertenecientes al paquete de programas PARLINC, se

calcularon los campos eléctricos y magnéticos transversales al doble circuito para las seis posibles configuraciones de sus fases.

La tabla 10.1 muestra los resultados alcanzados. El campo eléctrico puede ser reducido en un 44,21 % con la disposición de las fases ABC CBA, mientras que el campo magnético puede reducirse en un 33,54 % con cualquiera de las disposiciones ABC CAB o ABC BCA. Se insiste en que si estas disposiciones se planifican en la etapa de diseño de la línea y se ejecutan durante su construcción, no cuestan ni un centavo

Conclusiones

- ✓ Despreciar el acoplamiento entre los circuitos de las líneas doble circuito conduce a errores del 41,8 % en los cálculos de los cortocircuitos de una fase a tierra y sólo del 0,027 % en el cálculo de fenómenos balanceados que utilicen sólo la secuencia positiva.
- ✓ Escoger adecuadamente la disposición de las fases de un circuito con respecto al otro permite mejorar su comportamiento eléctrico con la ventaja de que, si se hace en la etapa de diseño, no significa costos adicionales de inversión.

REFERENCIAS

- [1]Llamo, H. S.: “Modelos y Análisis de las Líneas de Transporte de Energía Eléctrica”. Texto en formato digital para la asignatura homónima de la Maestría en Ingeniería Eléctrica”. CIPEL. 2005.
- [2]Llamo, H. S.: PARLINC. Paquete de programas para realizar un análisis integral de las líneas de transporte de energía eléctrica. Versión XI-D. 2007.
- [3]Llamo, H. S.: “Como evitar la transposición en las líneas doble circuito”. Revista Ingeniería Energética. Vol. XX. N0. 2/1999.
- [4]Llamo, H. S.: “¿Cuál es la mejor disposición de las fases en una línea de transmisión doble circuito?”. Revista Ingeniería energética. Vol. XXIII. No. 1/2003.

AUTOR

Héctor Silvio Llamo Laborí

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Consultante, Centro de Investigaciones y Pruebas Electro Energéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), Ciudad de la Habana.

e- mail: hllamo@electrica.cujae.edu.cu

Julio Marcelo Arias Castañeda

Ingeniero Electricista, Master en Ciencias técnicas, doctorante del Centro de Investigaciones y Pruebas Electro Energéticas (CIPEL), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), Ciudad de la Habana.

e-mail: juliomarceloecu@yahoo.com