

01170
ref.
1



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

SECCION DE INGENIERIA ELECTRICA

COMPENSACION SERIE Y PARALELO
DE LINEAS DE TRANSMISION

T E S I S

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA ELECTRICA

P R E S E N T A :

Jesús González Flores

C. U., MEXICO, D. F., OCTUBRE DE 1980.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

CONTENIDO

	PAG.
I.- , INTRODUCCION	
II.- MODELACION DE UNA LINEA DE TRANSMISION (LT)	10
2-1.- Introducci3n	
2-2.- Factores m1s importantes en el dise1o.	
2-3.- C1lculo de los par1metros	
2-4.- L1nea con hilos de guarda	
2-5.- L1nea con varios conductores por fase	
2-6.- L1nea no transpuesta	
2-7.- L1nea transpuesta	
2-8.- Impedancia de secuencia	
2-9.- Conclusiones	
III.- VOLTAJE Y CORRIENTE EN LA LT (DESBALANCEADA)	27
3-1.- Introducci3n	
3-2.- Ecuaciones de la LT	
3-3.- Soluci3n de las ecuaciones de la LT	
3-4.- Circuito "pi" equivalente	
3-5.- Circuito "T" equivalente	
3-6.- C1lculo del voltaje y la corriente	
IV.- GR1AO DE COMPENSACION SERIE Y PARALELO	39
4-1.- Introduccion	
4-2.- Estaciones de compensaci3n	
4-3.- Modelo analizado	
4-4.- Caidas de potencial en el circuito	
4-5.- Grado de compensaci3n serie	
4-6.- Grado de compensaci3n paralelo	
4-7.- N1mero de estaciones de compensaci3n	
4-8.- Compensaci3n paralelo en el punto de recepci3n.	

V.-	COMPENSACION DE LA LINEA	PAG.
	5-1.- Introducción	50
	5-2.- Esquemas de compensación	
	5-3.- Impedancias de pre-falla y post-falla	
	5-4.- Sobrevoltajes a tierra en los capacitores serie.	
	5-5.- Resonancia Subsíncrona	
	5-6.- Conclusiones.	
VI.-	RESULTADOS	58
	6-1.- Introducción.	
	6-2.- Datos a considerar.	
	6-3.- Resultados obtenidos.	
	6-4.- Diferentes condiciones de operación de la línea.	
VII.-	CONCLUSIONES	84
	APENDICE A: Programa de Computadora Digital para calcular los parámetros de la línea.	87
	APENDICE B: Programa de Computadora Digital para calcular el grado de compensación.	98
	BIBLIOGRAFIA	105

CAPITULO I

INTRODUCCION.

El desarrollo de nuestro país ha incrementado la demanda de energía eléctrica, de tal manera que para abastecer ésta, se requiere de la construcción (o ampliación) tanto de los centros de generación como de los medios de transporte, para llevar la energía eléctrica a los centros de consumo; esto requiere de un gran esfuerzo del sector eléctrico. Tanto en nuestro país como en algunos otros, durante ciertos periodos (varias décadas) ese crecimiento ha seguido un modelo exponencial; esto significa, que en un periodo (relativamente corto) se debe duplicar la capacidad de generación instalada al inicio de dicho periodo.

La energía en su forma natural generalmente no se encuentra en los centros de consumo, y la "necesidad" de tener energía en esos centros (interpretéase grandes ciudades) nos condiciona a tener que transportar energía. Ese requerimiento (de energía) fue la que hizo nacer a los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEEP) los cuales día a día son más grandes.

La energía la podemos transportar por diferentes medios: por carretera, ferrocarril etc., en su forma natural, o bien en líneas de transmisión en forma de energía eléctrica. Esta última es de las más versátiles.

El transporte de energía eléctrica es una de las principales tareas que tienen las compañías que planean y operan los sistemas eléctricos de Potencia; en nuestro país, como un caso particular, la Comisión Federal de Electricidad (CFE). No con esto se pretende establecer que los problemas de generación y distribución de energía sean menos importantes.

Dentro de los aspectos de transporte de energía eléctrica uno de los más importantes es el de la compensación de las líneas de transmisión, siendo este el punto que se analiza en el presente trabajo.

La necesidad de incrementar la capacidad de las líneas de transmisión es imperiosa dada la gran demanda de energía eléctrica. Esto involucra la adquisición de los medios para transmitir la energía requerida, por lo tanto, el uso óptimo de estos es vital. Para aumentar la capacidad de transmisión de las líneas podemos pensar en lo siguiente:

- Incremento de los voltajes de transmisión.
- Circuitos múltiples.
- Reducción de la frecuencia de transmisión.
- Reducción de la reactancia de los transformadores.
- Compensación de la reactancia serie de la línea (uso de capacitores serie).

Con la compensación de las líneas, además de incrementar la capacidad de transmisión se pretenden resolver los siguientes problemas: a). Satisfacer los requerimientos de potencia reactiva, b). Evitar sobrevoltajes y c). incrementar el límite de estabilidad. El incremento del límite de estabilidad se obtiene reduciendo la impedancia de transferencia de la línea; pero, debemos cuidar que esa reducción sea efectiva, es decir, que se tenga tanto en estado estable (normal) o cuando suceda alguna contingencia.

Al plantear las alternativas de compensar una línea existente, o construir otra, es el factor económico el que nos conduce a la primera. El hecho de compensar las líneas de transmisión no solo debe enfocarse desde el punto de vista de aumento de la capacidad de transmisión, sino también de un mejor aprovechamiento del derecho de vía.

La compensación de líneas se puede efectuar de diferentes formas: Usando compensadores sincrónicos, capacitores

res y reactores o en la última década por los llamados compensadores estáticos. Los elementos compensadores pueden ser (y operar) de diferentes maneras: Permanentemente conectados, "switcheados" en pasos discretos o ajustados de una manera continua al valor deseado dentro de los límites predeterminados.

En el desarrollo que aquí se presenta se manejan como elementos compensadores capacitores y reactores "switcheados" a pasos discretos en forma de estaciones de compensación. Los reactores los usamos para controlar las elevaciones de potencial a tierra de las líneas (o buses). La aplicación de estos reduce la capacidad de transmisión de la línea, pero eso lo eliminamos con el uso de capacitores serie.

El objetivo de este trabajo es diseñar las estaciones de compensación requeridas para las restricciones que se tengan, así como localizarlas en la línea. Los resultados obtenidos se muestran en el capítulo correspondiente.

En el segundo capítulo se analizan la modelación de la línea de transmisión. En el cálculo de los parámetros de la línea se considera el efecto de tierra, (basado en los estudios de Carson [17]), de los hilos de guarda, transposiciones, etc. (programa de computadora digital, apéndice A).

En el tercer capítulo se analizan los voltajes y correspondientes a lo largo de la línea en forma trifásica; esto, para considerar el desbalance de los parámetros de la línea, o sea, cuando la línea no está transpuesta (o al menos no simétricamente). Se obtiene también los circuitos "Pi" y "T" equivalentes en forma trifásica.

En el cuarto capítulo se presenta un método para calcular el grado de conexión serie y paralelo de la línea, teniendo como restricciones, una máxima razón de voltajes y un ángulo máximo de transmisión. Se analiza la compensación considerando estaciones de compensación distribuidas a lo largo de la línea.

En el quinto capítulo se consideran algunos aspectos de la compensación; tales como "switches" de secciones de línea, sobrevoltajes, etc.

En el sexto capítulo se presentan resultados obtenidos introduciendo las estaciones de compensación calculadas para una línea del sistema nacional.

MODELACION DE UNA LINEA DE TRANSMISION

2.1.- INTRODUCCION

En la decisión de construir un sistema de transmisión de energía eléctrica no solo deben de considerarse las necesidades actuales sino también las futuras, de ahí que un pronóstico de cargas es vital; basado por supuesto, en datos estadísticos y planeaciones futuras, para lograr con ello factores reales de crecimiento en los sistemas.

No podemos afirmar tajantemente que un diseño de una línea de transmisión (L.T.) específica es aplicable totalmente a cualquier otra de igual capacidad de carga, ya que (entre otras cosas) la ubicación de la línea es un factor decisivo para su diseño.

2.2.- FACTORES MAS IMPORTANTES EN SU DISEÑO

Por lo que respecta a su ubicación podemos mencionar: Variaciones de las condiciones atmosféricas de la región, tipos de terrenos a cruzar, contaminación del medio ambiente, derecho de vía, etc. De las condiciones eléctricas (de carga) deseadas dependerá el tipo de torres, y en general el diseño mecánico. Los problemas eléctricos más importantes son las pérdidas de potencia por calor y las producidas por el efecto corona; una buena selección del tipo, configuración y número de conductores por fase disminuyen las pérdidas anteriores. No hay que olvidar el número y la ubicación de los conductores de guarda, aislamiento, interferencias, etc.

Muchos estudios de estos factores se han llevado a cabo y una buena recomilación de estos puede encontrarse en la referencia [1].

Una síntesis de los factores de diseño de una L.T. —
se muestra en la fig. (2.1) [1] ; en la cual se muestra —
una secuencia recomendable de desarrollo.

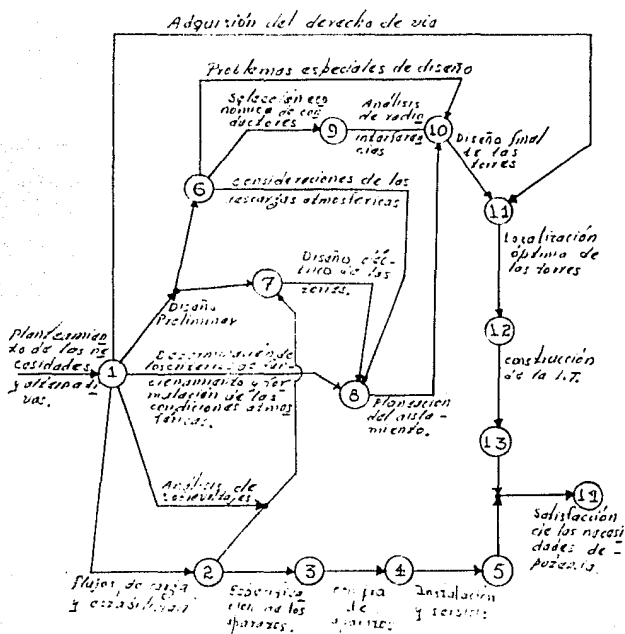


Fig. 2-1 Trayectoria crítica de los pasos a seguir en el —
diseño de una L.T.

El proyecto del diseño en sí, arroja que una vez — cumplidos los requerimientos, resulten al más bajo costo — y con un grado aceptable de confiabilidad.

2.3.- CALCULO DE LOS PARAMETROS DE LA L.T.

Para el cálculo de los parámetros de la línea nos — basaremos en la teoría expuesta por Anderson [2], los — cuales consideran las correcciones de Carson para el e — fecto de tierra. Se hace a continuación una exposición — de las conclusiones y ecuaciones a que se llega.

Línea monofásica

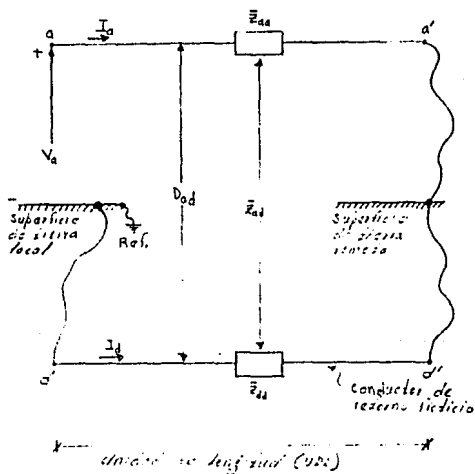


Fig. 2-2 Línea de Carson (con retorno a tierra)

Carson consideró un conductor de retorno para la corriente I_a (fig. 2-2) de tal manera que $I_d = -I_a$, siendo I_d la corriente que circula por el conductor ficticio $d-d$. El conductor de retorno se considera que está ubicado a una distancia D_{ad} abajo de la L.T., sien- do ésta función de la resistividad del terreno.

Podemos escribir para la línea de Carson

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{dd'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a - V_{a'} \\ V_d - V_{d'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ad} \\ \bar{Z}_{da} & \bar{Z}_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ -I_a \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

donde V_a , $V_{a'}$, V_d y $V_{d'}$ son voltajes "medidos" respecto a la misma referencia.

Puesto que $V_d = 0$ y $V_{a'} = -V_{d'} = 0$ (fig. 2-2), tendremos

$$[V_a] = [Z_{aa}] [I_a] \quad (2-2)$$

en donde definimos

$$Z_{aa} \hat{=} \bar{Z}_{aa} + \bar{Z}_{dd} - 2\bar{Z}_{ad} \quad (2-3)$$

La impedancia Z_{aa} considera el efecto de tierra. \bar{Z} se le denomina impedancia primitiva.

Las impedancias primitivas de la línea están dadas por:

$$\begin{aligned} \bar{Z}_{aa} &= r_a + j\omega l_a = r_a + j\omega k \left(\ln \frac{D_{aa}}{r_a} - 1 \right) \\ \bar{Z}_{dd} &= r_d + j\omega l_d = r_d + j\omega k \left(\ln \frac{D_{dd}}{r_d} - 1 \right) \\ \bar{Z}_{ad} &= j\omega m_{ad} = j\omega k \left(\ln \frac{D_{ad}}{D_{da}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (2-4)$$

en donde

S = longitud de la L.T.

D_{ik} = distancia entre el conductor i -ésimo y el k -ésimo, para $i \neq k$

D_{ik} = radio medio geométrico del conductor para $i = k$

La constante K permite utilizar las unidades de longitud que queramos, por ejemplo si K es igual a 0.2×10^{-3} los cálculos serán en kilómetros.

Carson derivó la siguiente fórmula empírica para la resistencia de tierra (r_d) en función de la frecuencia

$$r_d = 9.869 \times 10^{-9} f \quad \Omega / \text{km} \quad (2-5)$$

sustituyendo 2-4 en 2-3 podemos escribir

$$Z_{aa} = (r_a + r_d) + j\omega k \ln \frac{D_{ad}^2}{D_{aa} D_{dd}} \quad (2-6)$$

es más común encontrar 2-6 como

$$Z_{aa} = (r_a + r_d) + j\omega k \ln \frac{D_e}{D_{aa}} \quad (2-7)$$

en donde

$$D_e = \frac{D_{ad}^2}{D_{dd}} \quad (2-8)$$

el factor D_e es una función de la resistividad de la tierra y de la frecuencia; está definido por

$$D_e = 2160 \sqrt{\rho / f} \quad (2-9)$$

ρ = resistividad de la tierra

Línea Trifásica,

El procedimiento se puede extender a la línea trifásica considerando un solo conductor de retorno, como se muestra en la fig. (2-3).

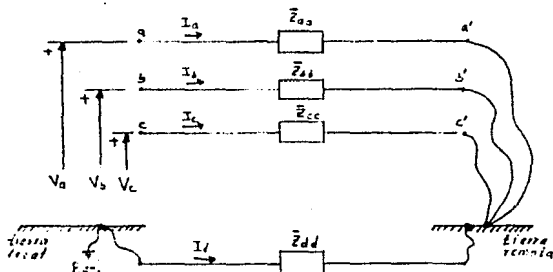


Fig. 2-3 Línea trifásica con retorno a tierra.

De la fig. (2-3) vemos que

$$I_d = - (I_a + I_b + I_c)$$

(2-10)

y las caídas de voltaje con las direcciones de corriente indicadas serán:

$$\begin{bmatrix} V_{a,a'} \\ V_{b,b'} \\ V_{c,c'} \\ V_{d,d'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a - V_{a'} \\ V_b - V_{b'} \\ V_c - V_{c'} \\ V_d - V_{d'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{aa} & \bar{Z}_{ab} & \bar{Z}_{ac} & \bar{Z}_{ad} \\ \bar{Z}_{ba} & \bar{Z}_{bb} & \bar{Z}_{bc} & \bar{Z}_{bd} \\ \bar{Z}_{ca} & \bar{Z}_{cb} & \bar{Z}_{cc} & \bar{Z}_{cd} \\ \bar{Z}_{da} & \bar{Z}_{db} & \bar{Z}_{dc} & \bar{Z}_{dd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_d \end{bmatrix} \quad (2-11)$$

en las cuales hemos considerado la red pasiva, lineal y bilateral.

Tenemos que $V_a' - V_d' = 0$, $V_b' - V_d' = 0$ y $V_c' - V_d' = 0$ para la condición de recepción de la línea. Además, $V_d' = 0$ y a I_d la conocemos en función de I_a , I_b e I_c . La ecuación 2-11 nos quedará de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

En donde hemos definido las impedancias de la siguiente forma:

$$Z_{ij} = \bar{Z}_{ij} - \bar{Z}_{id} - \bar{Z}_{jd} + \bar{Z}_{dd} \quad (2-13)$$

para $i, j = a, b, c$

para $i = j$ tendremos las impedancias propias y para $i \neq j$ tendremos las mutuas.

La magnitud de las impedancias primitivas está dada por:

$$Z_{ii} = r_i + j\omega k \left(\left(\frac{2 \times 10^9}{D_{ii}} - 1 \right) \right) \quad (2-14)$$

$i = a, b, c, d$

para las impedancias propias y

$$Z_{ij} = j\omega k \left(\left(\frac{2 \times 10^9}{D_{ij}} - 1 \right) \right) \quad (2-15)$$

$i, j = a, b, c \quad i \neq j$

para las impedancias mutuas entre fases. Las impedancias mutuas a tierra están dadas por:

$$Z_{id} = j\omega k \left(\left(\frac{2 \times 10^9}{D_{id}} - 1 \right) \right) \quad (2-16)$$

$i = a, b, c$

Combinando las ecuaciones 2-14, 2-15 y 2-16 y sustituyendo el factor D_0 como se definió anteriormente, podemos escribir

$$Z_{ii} = \gamma \left(\frac{1}{\epsilon} + \frac{1}{\epsilon'} \right) \cdot 2 \cdot 10^9 k \cdot \ln \frac{D_0}{r_i} \quad (2-17)$$

$i = a, b, c$

para las impedancias propias y

$$Z_{ij} = \gamma \mu \cdot 2 \cdot 10^9 k \cdot \ln \frac{D_0}{D_{ij}} \quad (2-18)$$

$i \neq j \quad i, j = a, b, c$

para las impedancias mutuas.

Note que las impedancias mutuas tienen una componente resistiva, la cual es debida al efecto (retorno) de tierra.

Admitancia de la línea

Utilizando el método de cargas imágenes para el cálculo de la capacitancia de la línea



Fig. 2-4 cargas con sus respectivas imágenes.

es posible escribir para los voltajes indicados en la fig. — 2-4 la siguiente ecuación

$$V_i = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[\sum_{k=1}^n \left(\frac{H_{ik}}{D_{ik}} \cdot q_k \right) \right] \quad (2-19)$$

$i = 1, 2, \dots, n$

(ver referencias [2] y [4])

En donde

- ϵ_0 = permitividad del vacío
- H_{ik} = distancia de la i -ésima carga a la k -ésima carga-imagen.
- D_{ik} = distancia entre i -ésimo conductor y el k -ésimo, para $i \neq k$
- D_{ik} = radio exterior del conductor i -ésimo para $i = k$
- q_i = carga i -ésima

La ecuación 2-19 puede escribirse en forma matricial de la siguiente forma

$$[V] = [P] [q] \quad (2-20)$$

a P se le conoce como matriz de coeficientes de potenciales. — Una vez conocida la matriz P determinamos la matriz de capacitancias (C) únicamente invirtiendo la matriz de coeficientes de potenciales, matemáticamente

$$[C] = [P]^{-1} \quad (2-21)$$

y la matriz de admitancias de la línea será:

$$[Y] = n f [C] \quad (2-22)$$

2.4.- LÍNEA CON HILOS DE GUARDA

Para el manejo de hilos de guarda, así como para manejar varios conductores por fase, es de gran utilidad auxiliarnos de algebra matricial. Nos ayudaremos de la fig. 2-5 para plantear las ecuaciones de voltaje correspondientes. En la figura se omitieron las inductancias mutuas para mayor claridad de la misma.

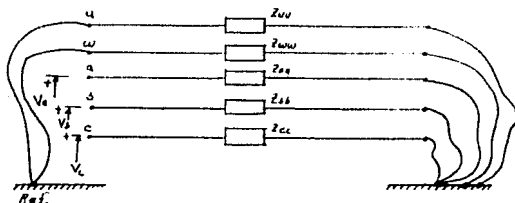


Fig. 2-5 Línea trifásica con dos hilos de guarda.

Aplicando la ley de voltajes de Kirchhoff (LVK) podemos expresar las ecuaciones de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{abc} \\ \bar{V}_{uw} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \bar{Z}_{12} \\ \bar{Z}_{21} & \bar{Z}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{abc} \\ \bar{I}_{uw} \end{bmatrix} \quad (2-23)$$

en donde:

- \bar{V}_{abc} = vector de voltajes de las fases.
- \bar{V}_{uw} = vector de voltajes de los hilos de guarda.
- \bar{Z}_{11} = matriz de impedancias de las fases
- \bar{Z}_{22} = matriz de impedancias de los hilos de guarda.
- \bar{Z}_{12} ; \bar{Z}_{21} = matrices de los elementos mutuos entre fases e hilos de guarda.

\bar{I}_{abc} = vector de corrientes de las fases.

\bar{I}_{uw} = vector de corrientes de los hilos de guarda.

Puesto que los hilos de guarda van aterrizados, sus voltajes serán cero, por lo tanto, si efectuamos la multiplicación indicada en la ecuación 2-23 podemos escribir

$$\bar{V}_{abc} = \bar{Z}_{11} \bar{I}_{abc} + \bar{Z}_{12} \bar{I}_{uw} \quad (2-24)$$

$$0 = \bar{Z}_{21} \bar{I}_{abc} + \bar{Z}_{22} \bar{I}_{uw} \quad (2-25)$$

Si resolvemos 2-25 para \bar{I}_{uw} y sustituimos esta en 2-24 tendremos

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

en la cual hemos definido Z_{abc} de la siguiente manera

$$Z_{abc} = \bar{Z}_{11} - \bar{Z}_{12} \bar{Z}_{22}^{-1} \bar{Z}_{21}$$

la matriz Z_{abc} considera el efecto de los hilos de guarda.

2-5.- LINEA CON VARIOS CONDUCTORES POR FASE

La justificación de utilizar varios conductores por fase es el aumento de la capacidad de transmisión de energía y la reducción de las pérdidas (en general) de la línea.

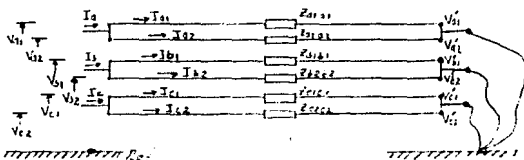


Fig. (2-6) Línea trifásica con dos conductores fase.

En el planteamiento de las ecuaciones, los términos que—
contengan como subíndice "1" (ya sea de voltaje o de corriente)
los llamaremos conductores y los que tengan un "2" (o un "3",
"4", etc.) los llamaremos subconductores, para mayor comodidad
al nominarlos; así la línea de la fig. 2-6 la llamaremos —
"línea trifásica con un subconductor por fase".

Aplicando la LVM a la fig. 2-6 tendremos

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \\ V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11a1} & Z_{11b1} & Z_{11c1} & Z_{11a2} & Z_{11b2} & Z_{11c2} \\ Z_{21a1} & Z_{21b1} & Z_{21c1} & Z_{21a2} & Z_{21b2} & Z_{21c2} \\ Z_{31a1} & Z_{31b1} & Z_{31c1} & Z_{31a2} & Z_{31b2} & Z_{31c2} \\ Z_{41a1} & Z_{41b1} & Z_{41c1} & Z_{41a2} & Z_{41b2} & Z_{41c2} \\ Z_{51a1} & Z_{51b1} & Z_{51c1} & Z_{51a2} & Z_{51b2} & Z_{51c2} \\ Z_{61a1} & Z_{61b1} & Z_{61c1} & Z_{61a2} & Z_{61b2} & Z_{61c2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

Quizá parezca molesto tanto subíndice, pero dá la venta—
ja de mayor claridad en este caso y cuando quisiéramos manejar
mas subconductores por fase (¡ no más de nueve !); pero esa —
molestia se ve disminuida en la computadora, ya que en reali—
dad no se requieren más que dos subíndices, en lugar de los —
cuatro mostrados.

La ecuación (2-27) está planteada de tal manera que fá—
cilmente podemos agrupar en vectores y submatrices los elemen—
tos correspondientes a los conductores y los subconductores.—
Nótese que el orden de los subíndices está de tal forma que —
el elemento Z_{ij} es igual al elemento Z_{ji} , ya que nuestra —
red es lineal y bilateral.

Como $V_{a1} = V_{a2}$, $V_{b1} = V_{b2}$ y $V_{c1} = V_{c2}$ podemos tener —
un sistema equivalente efectuando operaciones permitidas en el
álgebra matricial (operaciones renglón). Restaremos la ecua—
ción de cada conductor a la de sus subconductores, con lo —
que tendremos:

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{111} & Z_{112} & Z_{113} & Z_{114} & Z_{115} & Z_{116} \\ Z_{211} & Z_{212} & Z_{213} & Z_{214} & Z_{215} & Z_{216} \\ Z_{311} & Z_{312} & Z_{313} & Z_{314} & Z_{315} & Z_{316} \\ Z_{411} & Z_{412} & Z_{413} & Z_{414} & Z_{415} & Z_{416} \\ Z_{511} & Z_{512} & Z_{513} & Z_{514} & Z_{515} & Z_{516} \\ Z_{611} & Z_{612} & Z_{613} & Z_{614} & Z_{615} & Z_{616} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{d1} \\ I_{e1} \\ I_{f1} \end{bmatrix} \quad (2-28)$$

Lo cual es equivalente a premultiplicar ambos lados de — la ecuación 2-27 por la matriz

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

En forma abreviada podemos escribir 2-28 como

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

Una vez hecho lo anterior el siguiente paso es reemplazar el vector de corrientes por el siguiente:

$$\begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{d1} \\ I_{e1} \\ I_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{a1} - I_{d1} \\ I_{a1} - I_{e1} \\ I_{a1} - I_{f1} \\ I_{d1} \\ I_{e1} \\ I_{f1} \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

Para lo cual tendremos que alterar la matriz \bar{Z} de tal manera que la ecuación 2-30 no se altere. Podemos escribir (2-30) como

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z} \\ U \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ \bar{I} \end{bmatrix} \quad (2-32)$$

en la cual la matriz U es la matriz unitaria (del orden correspondiente). Descomponiendo U en dos matrices tendremos

$$\begin{bmatrix} U \\ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A^{-1} \\ \end{bmatrix} \quad (2-33)$$

así, 2-32 quedaría

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z \\ A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \\ A^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I} \\ I \end{bmatrix} \quad (2-34)$$

El producto $[A^{-1}] [I]$ da la ec. 2-31 y el producto $[Z] [A]$ da la matriz modificada para no alterar el sistema. Para el caso de un subconductor por fase A y A^{-1} están formadas por los siguientes elementos:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad A^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Si aplicamos este desarrollo en la computadora, requeriríamos guardar (o generar) tantas matrices A como variedades de configuraciones (del número de subconductores) quisiéramos manejar, que aún cuando son matrices dispersas, ocuparían memoria de computadora. Este mismo desarrollo se puede lograr por otras formas que no involucren esa restricción (apéndice A). -

El hecho de manejarlo aquí de esa manera es para darle claridad al desarrollo en poco papel.

Cabe hacer notar que la matriz de impedancias de la ecuación 2-27 incluye al efecto de los hilos de guarda.

Así, podemos escribir 2-34 de la siguiente manera.

$$\begin{bmatrix} V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

o más explícitamente;

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \\ I_{sub} \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

La ecuación 2-36 es similar a la que teníamos cuando manejamos los hilos de guarda, por lo que podemos operarla de igual forma y tener finalmente

$$\begin{bmatrix} V_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix} \quad (2-37)$$

en la que Z_{abc} será una matriz (3X3) (para el caso trifásico) — e incluirá tanto el efecto de los subconductores, como el de los hilos de guarda.

Un desarrollo equivalente se efectúa para obtener la admitancia de la línea.

2-6.- LINEA NO TRANSPUESTA

A lo largo de los anteriores incisos hemos estado manejando la línea no transpuesta, o mejor dicho, no se ha hablado de transposiciones; quizá no halla tenido sentido pues hemos estado manejando la impedancia por unidad de longitud. Para obtener la impedancia de la línea no transpuesta únicamente multiplicaremos Z_{abc} (ec. 2-37) por la longitud total de la línea.

2-7.- LINEA TRANSPUESTA

Aún cuando las transposiciones de las líneas (simétricamente) son costosas, y se tiende en la actualidad a no transporarlas, si es factible transponerlas en Subestaciones de paso o estaciones de compensación, lo cual disminuye grandemente el desbalance.

Para manejar cualquier transposición que se tenga (o se desee tener) es útil manejar las transposiciones en base a factores de transposición (en función de la longitud de sección donde se transponga) y de matrices que roten los conductores para la transposición deseada. Esta teoría la expone claramente Anderson [2]. La ventaja de usar esta teoría es que permite manejar la línea con una o dos transposiciones a cualquier longitud que se tengan y por supuesto los dos casos extremos, sin transponer y simétricamente transpuesta.

2-8.- IMPEDANCIA DE SECUENCIA

Para obtener la matriz de impedancias de secuencia una vez que tengamos la matriz de impedancias de fase (Z_{abc}) nos auxiliaremos de una transformación lineal, que expresada matemáticamente sería

$$Z_{012} = T Z_{abc} T^{-1} \quad (2-38)$$

en donde Z_{abc} fué obtenida anteriormente, Z_{012} es la matriz de impedancias de secuencia (la cual será diagonal para una línea simétricamente transpuesta) y T será la matriz de vectores característicos de la matriz Z_{abc} de una línea simétricamente transpuesta. Se puede demostrar fácilmente que la matriz de componentes simétricas cumple los requisitos para ser una matriz de vectores característicos para la

transformación lineal indicada en (2-38); por lo tanto, —
definiremos a \underline{T} como la matriz de componentes simétricas.

2.9.- CONCLUSIONES

En base a lo anteriormente expuesto se desarrolló el —
programa de computadora digital que calcula los parámetros —
de la línea (apéndice A)

El programa maneja cualquier configuración de la lí—
nea, cualquier número de subconductores por fase y cual—
quier número de hilos de guarda. El programa se puede utili—
zar para lograr valores aceptables tanto de la configura—
ción, como del número de conductores (en general) de la —
línea en caso de diseño, de una manera rápida y exacta.

CAPITULO III

VOLTAJES Y CORRIENTES A LO LARGO DE LA L.T.

3-1.- INTRODUCCION

En este capítulo enfocaremos nuestra atención al análisis de la línea no transpuesta, lo cual involucra manejar matrices y vectores. Ahora bien, si cambiamos lo que en este desarrollo serán matrices y vectores por elementos simples caeremos al caso monofásico, que es como se analiza la línea simétricamente transpuesta.

La notación que utilizaremos será como sigue: Una letra mayúscula testada será una matriz, una minúscula testada será un vector y cualquier letra sin testar será elemento simple. Así por ejemplo, \vec{v} e \vec{i} serán los vectores de voltaje y corriente respectivamente, dados como,

$$\vec{v} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \vec{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

\bar{Z} será una matriz de impedancias, $d\vec{i}$ será un diferencial de vector de corriente, etc.

3-2.- ECUACIONES DE LA L.T.

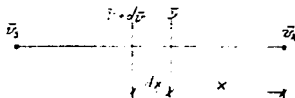


Fig. 31. Línea de Transmisión trifásica desbalanceada.

Para cualquier punto de la línea (fig. 3-1) no deben cumplirse las siguientes ecuaciones

$$d\bar{i} = \bar{y} \bar{v} dx \quad (3-1)$$

$$d\bar{v} = \bar{z} \bar{i} dx \quad (3-2)$$

o puestas de otra manera

$$\frac{d\bar{i}}{dx} = \bar{y} \bar{v} \quad (3-3)$$

$$\frac{d\bar{v}}{dx} = \bar{z} \bar{i} \quad (3-4)$$

en donde \bar{Y} y \bar{Z} son las matrices de admitancia e impedancia de la línea respectivamente. Tendremos para resolver, un sistema de ecuaciones diferenciales de primer orden simultáneas. Si derivamos las ecuaciones 3-3 y 3-4 tendremos

$$\frac{d^2\bar{i}}{dx^2} = \bar{y} \frac{d\bar{v}}{dx} \quad (3-5)$$

$$\frac{d^2\bar{v}}{dx^2} = \bar{z} \frac{d\bar{i}}{dx} \quad (3-6)$$

si sustituimos 3-4 y 3-3 en 3-5 y 3-6 respectivamente tendremos

$$\frac{d^2\bar{i}}{dx^2} = \bar{y} \bar{z} \bar{i} \quad (3-7)$$

$$\frac{d^2\bar{v}}{dx^2} = \bar{z} \bar{y} \bar{v} \quad (3-8)$$

con lo cual hemos desacoplado el sistema, y ahora tendremos que resolver dos ecuaciones diferenciales de segundo orden; de hecho, resolviendo una de ellas tendremos resuelta la otra. Vamos a enfocarnos a resolver la ec. 3-7 para lo cual la escribiremos de una manera más corta

$$\frac{d^2\bar{i}}{dx^2} = \bar{\phi} \bar{i} \quad (3-9)$$

en donde hemos definido $\bar{P} = \bar{Y} \bar{Z}$. Cabe recordar que $\bar{Y} \bar{Z} \neq \bar{Z}^{-1}$. De una manera general podemos decir que $\bar{Y} \bar{Z} \neq \bar{Z} \bar{Y}$ y que \bar{P} es una matriz asimétrica.

3-3.- SOLUCION DE LAS ECUACIONES DE LA L.T.

La solución de la ecuación 3-9 la podemos presentar de dos maneras útiles para nuestros fines: la forma exponencial y la hiperbólica; de hecho, son soluciones totalmente equivalentes, pero la forma de presentarse es más útil para la interpretación (visualización) de conceptos de la solución; por ejemplo la forma exponencial permite visualizar más fácil y más rápidamente las ondas viajeras (incidentes y reflejadas) en la línea y la hiperbólica facilita los cálculos de los voltajes y corrientes a lo largo de la línea. Desarrollaremos la ec. 3-9 para ver más claramente su solución, tenemos la ecuación como

$$\frac{d^2 \bar{i}}{dx^2} - \bar{P} \bar{i} = 0$$

desarrollada quedará

$$\begin{aligned} \frac{d^2 i_1}{dx^2} - p_{11} i_1 - p_{12} i_2 - p_{13} i_3 &= 0 \\ \frac{d^2 i_2}{dx^2} - p_{21} i_1 - p_{22} i_2 - p_{23} i_3 &= 0 \\ \frac{d^2 i_3}{dx^2} - p_{31} i_1 - p_{32} i_2 - p_{33} i_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3-10)$$

Una solución a estas ecuaciones en términos de funciones hiperbólicas la podemos expresar como

$$\begin{aligned} i_1 &= m_1 \operatorname{senh}(\gamma x) \\ i_2 &= m_2 \operatorname{senh}(\gamma x) \\ i_3 &= m_3 \operatorname{senh}(\gamma x) \end{aligned} \quad (3-11)$$

o en forma compacta

$$\bar{i} = \bar{m} \operatorname{senh}(\gamma x) \quad (3-12)$$

otra solución sería

$$i = \bar{m} \operatorname{cosh}(\gamma x) \quad (3-13)$$

en donde

$$\bar{m} = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ m_3 \end{bmatrix}$$

si sustituimos la ec. 3-12 en 3-10 tendremos

$$\begin{aligned} (p_{11} - \gamma^2) m_1 + p_{12} m_2 + p_{13} m_3 &= 0 \\ p_{21} m_1 + (p_{22} - \gamma^2) m_2 + p_{23} m_3 &= 0 \\ p_{31} m_1 + p_{32} m_2 + (p_{33} - \gamma^2) m_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3-14)$$

o bien en forma matricial

$$[\bar{p} - \gamma^2 \bar{I}] [\bar{m}] = 0 \quad (3-15)$$

\bar{I} es la matriz identidad. Para una solución no trivial se debe cumplir que

$$|\bar{p} - \gamma^2 \bar{I}| = 0 \quad (3-16)$$

resolver la ec. 3-16 arroja un polinomio complejo de tercer orden, y las raíces correspondientes y_1^2 , y_2^2 y y_3^2 son de hecho los valores característicos de la matriz \bar{P} . — A cada valor característico se tiene asociado un vector — característico, con lo cual tendremos la matriz de vectores característicos \bar{N} , expresada por

$$\bar{N} = \begin{bmatrix} 1 & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & 1 & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

(arbitrariamente se colocaron los unos en la diagonal). Si sustituimos ahora la otra solución (ec. 3-13) en la ecuación 3-10, obtendremos los mismos vectores característicos y por ende la matriz \bar{N} .

La solución completa (de nuestra ecuación objeto) se puede expresar como una combinación lineal de las dos soluciones analizadas y ésta la podemos expresar como

$$\begin{aligned} i_1 &= k_1 \sinh(\gamma_1 x) + m_{12} k_2 \sinh(\gamma_2 x) + m_{13} k_3 \sinh(\gamma_3 x) + \\ & n_1 \cosh(\gamma_1 x) + m_{12} n_2 \cosh(\gamma_2 x) + m_{13} n_3 \cosh(\gamma_3 x) \\ i_2 &= m_{21} k_1 \sinh(\gamma_1 x) + k_2 \cosh(\gamma_2 x) + m_{23} k_3 \sinh(\gamma_3 x) + \\ & m_{21} n_1 \cosh(\gamma_1 x) + n_2 \cosh(\gamma_2 x) + m_{23} n_3 \cosh(\gamma_3 x) \end{aligned} \quad (3-18)$$

$$\begin{aligned} i_3 &= m_{31} k_1 \sinh(\gamma_1 x) + m_{32} k_2 \sinh(\gamma_2 x) + k_3 \sinh(\gamma_3 x) + \\ & m_{31} n_1 \cosh(\gamma_1 x) + m_{32} n_2 \cosh(\gamma_2 x) + n_3 \cosh(\gamma_3 x) \end{aligned}$$

expresada en forma matricial tendremos

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & 1 & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \sinh(\gamma_1 x) \\ k_2 \sinh(\gamma_2 x) \\ k_3 \sinh(\gamma_3 x) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & 1 & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \cosh(\gamma_1 x) \\ n_2 \cosh(\gamma_2 x) \\ n_3 \cosh(\gamma_3 x) \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

separando los senos y cosenos en forma de matrices de la siguiente manera

$$\begin{bmatrix} \bar{i}_1 \\ \bar{i}_2 \\ \bar{i}_3 \end{bmatrix} = \bar{M} \begin{bmatrix} \operatorname{senh}(\gamma_1 x) & 0 & 0 \\ 0 & \operatorname{senh}(\gamma_2 x) & 0 \\ 0 & 0 & \operatorname{senh}(\gamma_3 x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} + \bar{M} \begin{bmatrix} \operatorname{cosh}(\gamma_1 x) & 0 & 0 \\ 0 & \operatorname{cosh}(\gamma_2 x) & 0 \\ 0 & 0 & \operatorname{cosh}(\gamma_3 x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} \quad (3-20)$$

para quedar finalmente

$$\bar{i} = \bar{M} \operatorname{senh} \bar{k} + \bar{M} \operatorname{cosh} \bar{n} \quad (3-21)$$

en donde se han definido

$$\operatorname{senh} \bar{k} \triangleq \begin{bmatrix} \operatorname{senh}(\gamma_1 x) & 0 & 0 \\ 0 & \operatorname{senh}(\gamma_2 x) & 0 \\ 0 & 0 & \operatorname{senh}(\gamma_3 x) \end{bmatrix}; \quad \bar{k} \triangleq \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix}$$

$$\operatorname{cosh} \bar{n} \triangleq \begin{bmatrix} \operatorname{cosh}(\gamma_1 x) & 0 & 0 \\ 0 & \operatorname{cosh}(\gamma_2 x) & 0 \\ 0 & 0 & \operatorname{cosh}(\gamma_3 x) \end{bmatrix}; \quad \bar{n} \triangleq \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix}$$

la ecuación 3-21 da la solución de nuestro vector de corrientes (en función de las constantes arbitrarias), para obtener la solución del vector de voltajes derivamos la ec. 3-21 con respecto a "x", lo cual arroja lo siguiente

$$\frac{d\bar{i}}{dx} = \bar{M} \begin{bmatrix} \gamma_1 \operatorname{cosh}(\gamma_1 x) \\ \gamma_2 \operatorname{cosh}(\gamma_2 x) \\ \gamma_3 \operatorname{cosh}(\gamma_3 x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \\ k_3 \end{bmatrix} + \bar{M} \begin{bmatrix} \gamma_1 \operatorname{senh}(\gamma_1 x) \\ \gamma_2 \operatorname{senh}(\gamma_2 x) \\ \gamma_3 \operatorname{senh}(\gamma_3 x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \end{bmatrix} \quad (3-22)$$

o bien

$$\frac{d\bar{i}}{dx} = \bar{M} \cos \bar{\gamma} \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_3 \end{bmatrix} \bar{k} + \bar{M} \sin \bar{\gamma} \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_3 \end{bmatrix} \bar{n} \quad (3-23)$$

o sustituyendo

$$\bar{\gamma} = \frac{d}{dx} \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_3 \end{bmatrix}$$

tendremos

$$\frac{d\bar{i}}{dx} = \bar{M} \cos \bar{\gamma} \bar{\gamma} \bar{k} + \bar{M} \sin \bar{\gamma} \bar{\gamma} \bar{n} \quad (3-24)$$

si despejamos \bar{v} de 3-3 tendremos

$$\bar{v} = \bar{\gamma}^{-1} \frac{d\bar{i}}{dx} \quad (3-25)$$

si sustituimos 3-24 en 3-25

$$\bar{v} = \bar{\gamma}^{-1} \bar{M} \cos \bar{\gamma} \bar{\gamma} \bar{k} + \bar{\gamma}^{-1} \bar{M} \sin \bar{\gamma} \bar{\gamma} \bar{n} \quad (3-26)$$

los vectores \bar{k} y \bar{n} representan las constantes arbitrarias, las cualesvaluaremos en base a nuestras condiciones iniciales. Lo más común es poner para $x = 0$ los voltajes y corrientes de recepción (v_R o i_R respectivamente); al sustituir esas condiciones iniciales en la ecuación 3-21 tendremos

$$\bar{i}_R = \bar{M} \bar{n} \quad (3-27)$$

si resolvemos la ec. 3-27 para \bar{n}

$$\bar{n} = \bar{M}^{-1} \bar{l}_R \quad (3-28)$$

sustituyendo \bar{v}_R en la ec. 3-26

$$\bar{v}_R = \bar{Y}^{-1} \bar{M} \bar{y} \bar{k} \quad (3-29)$$

resolviendo la ec. 3-29 para \bar{k} tendremos

$$\bar{k} = \bar{Y}^{-1} \bar{M}^{-1} \bar{Y} \bar{v}_R \quad (3-30)$$

si sustituimos las constantes arbitrarias (ecos. 3-28 y 3-30) en la ec. 3-21 y 3-26 se tendrá la solución completa expresada por

$$\bar{l} = \bar{M} \bar{s} \bar{c} \bar{Y}^{-1} \bar{M}^{-1} \bar{Y} \bar{v}_R + \bar{M} \bar{c} \bar{s} \bar{M}^{-1} \bar{l}_R \quad (3-31)$$

$$\bar{v} = \bar{Y}^{-1} \bar{M} \bar{c} \bar{s} \bar{M}^{-1} \bar{Y} \bar{v}_R + \bar{Y}^{-1} \bar{M} \bar{s} \bar{c} \bar{Y}^{-1} \bar{l}_R \quad (3-32)$$

Es de hacer notar que las matrices $\bar{s} \bar{c} \bar{s}$, $\bar{c} \bar{s} \bar{c}$ y \bar{Y}^{-1} son matrices diagonales y que esto puede facilitar las operaciones al ejecutarlas. De una manera más corta — podemos escribir las ecs. 3-31 y 3-32 como sigue

$$\bar{v} = \bar{A} \bar{v}_R + \bar{B} \bar{l}_R \quad (3-33)$$

$$\bar{l} = \bar{C} \bar{v}_R + \bar{D} \bar{l}_R \quad (3-34)$$

en donde \bar{A} , \bar{B} , \bar{C} y \bar{D} son las constantes de la línea y son definidas como

$$\bar{A} \triangleq \bar{Y}^{-1} \bar{M} \bar{c} \bar{s} \bar{M}^{-1} \bar{Y} \quad ; \quad \bar{B} \triangleq \bar{Y}^{-1} \bar{M} \bar{s} \bar{c} \bar{Y}^{-1} \bar{M}^{-1} \quad (3-35)$$

$$\bar{C} \triangleq \bar{M} \bar{s} \bar{c} \bar{Y}^{-1} \bar{M}^{-1} \bar{Y} \quad ; \quad \bar{D} \triangleq \bar{M} \bar{c} \bar{s} \bar{M}^{-1}$$

3-4.- CIRCUITO "PI" EQUIVALENTE

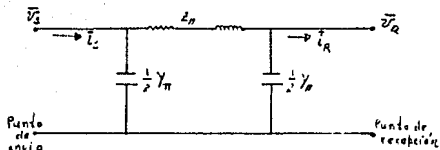


Fig. 3-2 Circuito "PI" equivalente (trifásico)

En base a la fig. 3-2 podemos establecer las siguientes ecuaciones.

$$\bar{V}_S = \bar{V}_R + \bar{Z}_n \left[\frac{1}{2} \bar{Y}_n \bar{V}_R + \bar{I}_R \right] \quad (3-36)$$

y reagrupando términos

$$\bar{V}_S = \left[\bar{I} + \frac{1}{2} \bar{Z}_n \bar{Y}_n \right] \bar{V}_R + \bar{Z}_n \bar{I}_R \quad (3-37)$$

para las corrientes tendremos

$$\bar{I}_S = \bar{I}_R + \frac{1}{2} \bar{Y}_n \bar{V}_R + \frac{1}{2} \bar{Y}_n \bar{V}_S \quad (3-38)$$

constituyendo la ec. 3-37 en la ec. 3-38

$$\bar{I}_S = \bar{I}_R + \frac{1}{2} \bar{Y}_n \bar{V}_R + \frac{1}{2} \bar{Y}_n \left[\left(\bar{I} + \frac{1}{2} \bar{Z}_n \bar{Y}_n \right) \bar{V}_R + \bar{Z}_n \bar{I}_R \right] \quad (3-39)$$

reagrupando términos quedará como sigue

$$\bar{I}_S = \left[\bar{Y}_n + \frac{1}{4} \bar{Y}_n \bar{Z}_n \bar{Y}_n \right] \bar{V}_R + \left[\bar{I} + \frac{1}{2} \bar{Y}_n \bar{Z}_n \right] \bar{I}_R \quad (3-40)$$

De las ecuaciones 3-37 y 3-40 las constantes de la línea quedarían como

$$\bar{A}_1 \triangleq \bar{I} + \frac{1}{2} \bar{Z}_n \bar{Y}_n \quad ; \quad \bar{B}_1 \triangleq \bar{Z}_n \quad (3-41)$$

$$\bar{C}_1 = \bar{Y}_n + \frac{1}{2} \bar{Y}_n \bar{Z}_n \bar{Y}_n \quad ; \quad \bar{D}_1 = \bar{I} + \frac{1}{2} \bar{Y}_n \bar{Z}_n$$

Para que la línea de la fig. 3-1 sea equivalente a la de la fig. 3-2 se debe cumplir que $\bar{A} = \bar{A}_1$, $\bar{B} = \bar{B}_1$, $\bar{C} = \bar{C}_1$ y $\bar{D} = \bar{D}_1$; por lo tanto

$$\bar{B} = \bar{E}_n$$

o bien

$$\bar{Z}_n = \bar{Y}' \bar{M} \bar{s} \bar{e} \bar{n} \bar{Y} \bar{M}' \quad (3-42)$$

y también

$$\bar{A} = \bar{A}_1 = \bar{I} + \frac{1}{2} \bar{Z}_n \bar{Y}_n \quad (3-43)$$

podemos despejar $\frac{1}{2} \bar{Y}_n$, quedándonos como sigue

$$\frac{1}{2} \bar{Y}_n = \bar{Z}_n^{-1} \bar{A} - \bar{Z}_n^{-1} \quad (3-44)$$

si sustituimos el valor de \bar{A} y de \bar{Z}_n en 3-44 tendremos

$$\frac{1}{2} \bar{Y}_n = [\bar{Y}' \bar{M} \bar{s} \bar{e} \bar{n} \bar{Y} \bar{M}']^{-1} [\bar{Y}' \bar{M} \bar{c} \bar{o} \bar{s} \bar{M}' \bar{Y}] - [\bar{Y}' \bar{M} \bar{s} \bar{e} \bar{n} \bar{Y} \bar{M}']^{-1} \quad (3-45)$$

efectuando la inversa de la matriz \bar{E}_n

$$\frac{1}{2} \bar{Y}_n = [\bar{M} \bar{Y}' \bar{s} \bar{e} \bar{n} \bar{M}' \bar{Y}] [\bar{Y}' \bar{M} \bar{c} \bar{o} \bar{s} \bar{M}' \bar{Y}] - [\bar{M} \bar{Y}' \bar{s} \bar{e} \bar{n} \bar{M}' \bar{Y}] \quad (3-46)$$

y efectuando operaciones quedará

$$\frac{1}{2} \bar{Y}_n = [\bar{M} \bar{Y}' \bar{s} \bar{e} \bar{n} \bar{M}' \bar{Y}] - [\bar{M} \bar{Y}' \bar{s} \bar{e} \bar{n} \bar{M}' \bar{Y}] \quad (3-47)$$

factorizando la ecuación anterior

$$\frac{1}{2} \bar{Y}_n = \bar{M} \bar{Y}' [\bar{s} \bar{e} \bar{n} (\bar{s} \bar{e} \bar{n}^{-1}) \bar{M}' \bar{Y}] \quad (3-48)$$

puesto que las matrices \bar{a}_{0n} y \bar{c}_{0n} son diagonales y — sus elementos funciones hiperbólicas, es posible escri— bir la ec. 3-48 como

$$\frac{1}{2} \bar{I}_R = \bar{M} \bar{Y}^{-1} \bar{t}_{an} \bar{M}^{-1} \bar{V} \quad (3-49)$$

en donde se ha definido la matriz \bar{t}_{an} de la siguiente manera

$$\bar{t}_{an} = \begin{bmatrix} \tanh\left(\frac{Y_1 X}{2}\right) & & & \\ & \tanh\left(\frac{Y_2 X}{2}\right) & & \\ & & \tanh\left(\frac{Y_3 X}{2}\right) & \\ & & & \tanh\left(\frac{Y_4 X}{2}\right) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cosh(Y_1 X) - 1}{\sinh(Y_1 X)} & & & \\ & \frac{\cosh(Y_2 X) - 1}{\sinh(Y_2 X)} & & \\ & & \frac{\cosh(Y_3 X) - 1}{\sinh(Y_3 X)} & \\ & & & \frac{\cosh(Y_4 X) - 1}{\sinh(Y_4 X)} \end{bmatrix} \quad (3-50)$$

3-5.- CIRCUITO "T" EQUIVALENTE

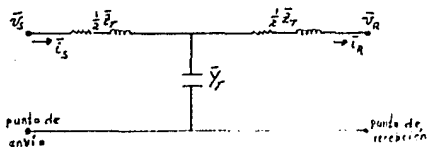


Fig. 3-3 Circuito "T" equivalente

De la Fig. 3-3 podemos escribir las siguientes ecuaciones

$$\bar{V}_S = \bar{V}_R + \frac{1}{2} \bar{Z}_T \bar{I}_R + \frac{1}{2} \bar{Z}_T \left[\bar{I}_R + \bar{Y}_T (\bar{V}_R + \frac{1}{2} \bar{Z}_T \bar{I}_R) \right] \quad (3-51)$$

reorganizando términos tendremos

$$\bar{V}_S = \left[\bar{I} + \frac{1}{2} \bar{Z}_T \bar{Y}_T \right] \bar{V}_R + \left[\bar{Z}_T + \frac{1}{4} \bar{Z}_T \bar{Y}_T \bar{Z}_T \right] \bar{I}_R \quad (3-52)$$

y para la corriente \bar{I}_R

$$\bar{i}_s = \bar{i}_R + \bar{y}_T (\bar{v}_R + \frac{1}{2} \bar{z}_T \bar{i}_R) = \bar{y}_T \bar{v}_R + (I + \frac{1}{2} \bar{y}_T \bar{z}_T) \bar{i}_R \quad (3-53)$$

De igual forma que para el circuito "PI", se tendrá para el circuito "T" las siguientes ecuaciones

$$\bar{y}_T = \bar{M} \bar{s} \bar{a} \bar{y}' \bar{M}'^{-1} \bar{y} \quad (3-54)$$

$$\frac{1}{2} \bar{z}_T = \bar{y}' \bar{M} \bar{y} \bar{a} \bar{M}'^{-1} \quad (3-55)$$

CAPITULO IV

GRADO DE COMPENSACION SERIE Y PARALELO

4-1.- INTRODUCCION

El grado de compensación en líneas de transmisión se puede obtener por el método de prueba y error, pero es muy ineficiente, pues involucra una tarea fácil, pero ardua. Esto obliga a pensar en métodos más sofisticados, pero más eficientes [9] , [10] .

Se obtiene una "buena" regulación de la L.T. si la compensación (serie y paralelo) es distribuida a lo largo de la línea, en lugar de concentrarla en sus terminales, aunque ésta última decisión es más económica. Si se opta por la primera, o sea, distribuir el grado de compensación en estaciones de compensación ubicadas a lo largo de la línea, es conveniente calcular el mínimo número de estaciones de compensación requeridas para obtener la regulación deseada.

4-2.- ESTACIONES DE COMPENSACION

El método que aquí se presenta para obtener el grado de compensación de la L.T. considera como modelo de las estaciones de compensación el de la fig. 4.1.

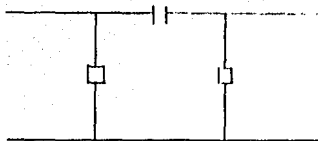


Fig. 4-1 Estación de compensación.

La combinación de capacitores serie y reactores (o capacitores) en paralelo dá una buena regulación de la línea, obviamente es más caro que el uso de capacitores serie únicamente; pero el suprimir los elementos en paralelo va en detrimento del buen funcionamiento de las estaciones de compensación.

4-3.- MODELO ANALIZADO

Para la deducción del método para obtener el grado de compensación analizaremos el siguiente circuito:

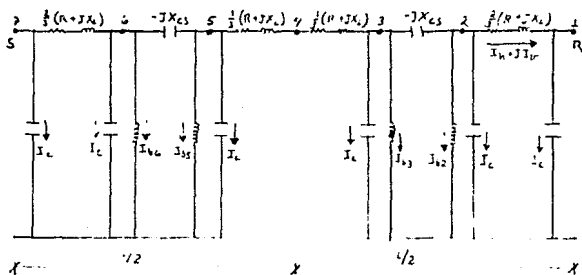


Fig. 4-2 Línea con dos estaciones de compensación.

Para nuestro análisis usaremos el circuito "pi" nominal de la L.T.

La nomenclatura utilizada en este desarrollo será la siguiente:

\hat{V} = cantidad compleja (fasor)

V_S = magnitud del voltaje de envío

V_R = magnitud del voltaje de recepción

δ = ángulo entre los fasores \hat{V}_R y \hat{V}_S

$\Delta V'$ = componente real (horizontal) de una caída de voltaje

$\Delta V''$ = componente imaginaria (vertical) de una caída de voltaje

V = voltaje nominal

$$e = \frac{V_S}{V_R}$$

$$h = 1 - e \cos \delta$$

$$v = e \sin \delta$$

Así,

$$\Delta V' = -h V \quad (4-1)$$

$$\Delta V'' = v V \quad (4-2)$$

serán las componentes horizontal y vertical respectivamente de la caída de potencial de la L.T. (suponiendo voltaje nominal en el punto de recepción).

4-4.- CAIDAS DE POTENCIAL EN EL CIRCUITO

Analizando el circuito de la fig. 4-2 vemos que las caídas de potencial parciales están dadas como sigue:

En la primera sección de la Línea (2-1)

$$\hat{I}_{21} = I_h + j I_v$$

$$\Delta V_{21}' = \frac{2}{3} K I_h - \frac{2}{3} X_L I_v \quad (4-3)$$

$$\Delta V_{21}'' = \frac{2}{3} X_L I_h + \frac{2}{3} K I_v \quad (4-4)$$

Supondremos todas las corrientes I_0 (ver circuito) - iguales y además I_0 e I_{b2} perpendiculares a V_R ; así, tendremos,

$$\hat{I}_{12} = I_h + j(I_v + I_c + I_{b2})$$

$$\Delta V_{12}' = X_{L2} (I_v + I_c + I_{b2}) \quad (4-5)$$

$$\Delta V_{12}'' = -X_{C2} I_h \quad (4-6)$$

en la siguiente sección de la línea (4-3)

$$\hat{I}_{43} = I_h + j(I_v + 2I_c + I_{b2} + I_{b3})$$

$$\Delta V_{43}' = \frac{1}{3} K I_h - \frac{1}{3} X_L (I_v + 2I_c + I_{b2} + I_{b3}) \quad (4-7)$$

$$\Delta V_{43}'' = \frac{1}{3} X_L I_h - \frac{1}{3} K (I_v + 2I_c + I_{b2} + I_{b3}) \quad (4-8)$$

Para encontrar la caída V_{41} supondremos lo siguiente:

4-4.a).- La suma de las corrientes inductivas de los reactores para lalo en cada estación de compensación debe ser igual a la corriente capacitiva de esa sección de L.T., esto es,

$$I_{L1} + I_{L2} + \dots + I_{Ln} = I_{Cn} \quad (4-9)$$

por consiguiente

$$\Delta V_{L1} + \Delta V_{L2} + \dots + \Delta V_{Ln} = \Delta V_{Cn}$$

4-4.b).- Solamente corriente activa circulará por los capacitores - serie, en otras palabras, los capacitores serie solamente causarán caídas de voltaje verticales. Matemáticamente

$$\Delta V_{C1} = \Delta V_{C2} = \dots = \Delta V_{Cn} \quad (4-10)$$

Dada la simetría del circuito vemos que

$$\Delta V_{C1} = \Delta V_{C2} = \dots = \Delta V_{Cn}$$

y además

$$\Delta V_{L1} + \Delta V_{L2} + \dots + \Delta V_{Ln} = \Delta V_{Cn}$$

Si introducimos las restricciones mencionadas (ec.4.9 y ec. 4-10) la caída ΔV_{41} quedará expresada por

$$\Delta V_{41} = \Delta V_{C1} + \Delta V_{L1} \quad (4-11)$$

$$\Delta V_{41} = \Delta V_{C2} + \Delta V_{L2} \quad (4-12)$$

Puesto que V_{41} es la mitad de la caída total de la línea (V_{71} o simplemente V) tendremos

$$(4-13)$$

$$(4-14)$$

4-5.- GRADO DE COMPENSACION SERIE

La ecuación 4-14 la podemos escribir como

$$(1-R)X_{L2} + R I_V = 0.5 \mathcal{V} \quad (4-15)$$

en donde

$$K = \text{grado de compensación serie} = \frac{X_{CB}}{X_L}$$

Notese que en el circuito X_L es la mitad de la reactancia serie total de la L.T. y X_{CB} es la mitad de la reactancia serie total de los capacitores (reactancia introducida artificialmente).

La caída total de la L.T. estará dada por

$$(1-R)X_{L1} I_V + R_t I_V = \mathcal{V} \quad (4-16)$$

(o sea, el doble de la ec. 4-15), en donde, X_{L1} y R_t son la reactancia y la resistencia totales de la L.T. respectivamente.

Puesto que la razón R_t/X_{L1} es muy pequeña en líneas de alto voltaje podemos despreciar el término $R_t I_V$ de la ec.4-16 sin cometer mucho error; así, tendremos

$$(1-k) X_{L2} I_V \cong \mathcal{V} \quad (4-17)$$

o bien

$$X_{L2} I_V \cong \mathcal{V}^2 \quad (4-18)$$

en donde hemos multiplicado la ecuación 4-17 por \underline{V} y sustituido X_{lt} por X'_L ; X'_L será la reactancia de la L.T. por unidad de longitud y \underline{L} la longitud total de la línea.

Si tomamos \underline{V} como referencia $I_R V$ será la potencia real (activa) \underline{P} ; así, resolviendo para k quedará el grado de compensación serie expresado por la siguiente ecuación:

$$k = 1 - \frac{\sigma V^2}{P X'_L L} \quad (4-19)$$

4-6.- GRADO DE COMPENSACION PARALELO

El grado de compensación paralelo está definido como la razón de la potencia reactiva inductiva de los reactores introducidos y la potencia capacitiva generada por la L.T., esto es,

$$k_P = \frac{\sum |Q_L|}{\sum |Q_C|} \quad (4-20)$$

Para las condiciones impuestas en el inciso 4-4.a; esto es, "La suma de corrientes inductivas de los reactores paralelos en cada estación de compensación debe ser igual a la corriente capacitiva de esa sección de línea". El grado de compensación paralelo quedará expresado por la siguiente ecuación:

$$k_P = \frac{1}{n-1} \quad (4-21)$$

en donde, n es el número de secciones en que hemos dividido la línea (para el circuito analizado $n = 3$); así, $n-1$ será el número de estaciones de compensación. De la ecuación 4-21 vemos que k_P depende únicamente del número de secciones en que hallamos dividido la línea.

La potencia de los reactores se puede calcular de la ec. 4-10, la cual expresa que únicamente corriente activa debe pasar por los capacitores serie. Así,

$$Q_{s2} = -(Q_c + Q_r) \quad (4-22)$$

en donde, Q_v es la potencia reactiva transmitida por la línea y Q_c es la potencia reactiva generada por la rama de la sección de la línea correspondiente.

Dada la simetría del circuito analizado tendremos en general

$$Q_{br} = -(Q_c + Q_v) \quad (4-23)$$

$$Q_{bs} = -(Q_c - Q_v) \quad (4-24)$$

en donde

Q_{br} = potencia del reactor en el punto de recepción (de la estación de compensación)

Q_{bs} = potencia del reactor en el punto de envío (de la estación de compensación)

4-7.- NUMERO DE ESTACIONES DE COMPENSACION

El grado de compensación serie de la línea es independiente del número de secciones de línea (o estaciones de compensación) que se elijan, no así el grado de compensación paralelo. Desde el punto de vista económico es ventajoso tener un mínimo número de estaciones de compensación, pero

desgraciadamente es la operación de la línea la que lo determina.

Analizando las elevaciones de voltaje en la línea podemos establecer un criterio para elegir el mínimo número de estaciones de compensación requeridas.

El grado de compensación serie se puede expresar como

$$k = \frac{(n-1) X_{cs}}{X_{ls}} \quad (4-25)$$

donde X_{cs} es la reactancia de los capacitores serie en cada estación de compensación y X_{ls} es la reactancia serie de cada sección de línea.

Considerando un grado de compensación tal que la reactancia de los capacitores serie de cada estación sea igual a la reactancia serie de cada sección de línea tendremos

$$k = 1 \quad (4-26)$$

Si analizamos las caídas verticales de tres cargas diferentes, o sea, con tres grados de compensación serie diferente de tal manera que se cumpla lo siguiente:

$$k_1 = k_2 = k_3 \quad (4-27)$$

donde k_0 es el caso particular descrito por la ec. 4-26.

Si ponemos como restricción que la componente vertical de las caídas de potencial a lo largo de la línea no exceda a la componente de $V_S - V_R$ donde V_S es el voltaje en el punto de envío y V_R es el voltaje en el punto de recepción; se debe cumplir que

$$k \leq k_0 \quad (4-28)$$

lo cual implica

$$r \geq \frac{k}{1-k} \quad (4-29)$$

en donde $\frac{k}{1-k}$ es el mínimo número de estaciones de compensación para lograr las condiciones establecidas.

4-8.- COMPENSACION PARALELO EN EL PUNTO DE RECEPCION

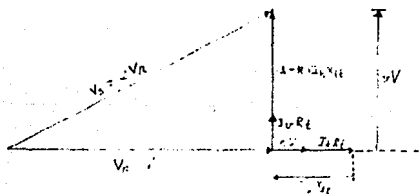


Fig. 4-3 Caídas de potencial

Analizando las caídas de potencial (fig. 4-3) se debe tener que la corriente I_V que pasa en la primera sección - de línea (ver fig. 4-2) debe ser capacitiva para producir - una caída horizontal negativa ($I_V X_{lt}$). La corriente I_V - puede despejarse de la ec. 4-13, y la tendríamos expresada por

$$I_V = \frac{P_r}{X_{lt}} I_r - \frac{hV}{X_{lt}} \quad (4-30)$$

La potencia reactiva capacitiva transmitida la podemos expresar por

$$Q_V = -I_V F \quad (4-31)$$

en donde definimos

$$F = \frac{I_r^2}{X_{lt}} + I_r \frac{hV}{X_{lt}} \quad (4-32)$$

por lo tanto podemos expresar la potencia reactiva del capacitor en el punto de recepción por la siguiente ecuación:

$$Q_r = |Q_c| + Q_V - Q_1 \quad (4-33)$$

en donde

Q_1 = potencia reactiva de la carga

Q_0 = potencia reactiva generada por una rama de la primera sección de línea.

CAPITULO V

COMPENSACION DE LA L.T.

5-1.- INTRODUCCION.

El uso de capacitores serie (compensación serie) en líneas de transmisión vino a ser otra forma de incrementar la capacidad de transmisión de las L.T. ya establecidas o en proyecto. Eléctricamente "hablando" el uso de capacitores serie transforma las líneas largas en líneas más "cortas". Al reducir la impedancia característica de la L.T. aumenta la capacidad de transmisión, así como su límite de estabilidad transitoria.

Para instalar capacitores serie se debe elaborar un estudio minucioso que incluya los siguientes factores:

- a).- Tipo de capacitores (de voltaje limitado o ilimitado). - Esto define la operación de los capacitores, es decir, si al ocurrir una falla estos soportarán o no la corriente de falla. Cabe recordar que el costo del capacitor es proporcional al voltaje que soportan.
- b).- Grado de compensación serie; este es determinado fundamentalmente por los aspectos económicos y de estabilidad.
- c).- Esquemas de compensación. La importancia de este factor reside en que nos da la impedancia tanto de prefalla como la de postfalla y además, influye en la confiabilidad del sistema.

5-2.- ESQUEMAS DE COMPENSACION

El como distribuir los capacitores serie es un factor que ayuda a decidir el uso de ellos en L.T., puesto que de

pendiendo del arreglo que tengamos, así será la impedancia de pre y postfalla. El buscar un determinado arreglo tiene mayor sentido en circuitos dobles o en líneas en paralelo que en circuitos simples; los primeros tienen más arreglos posibles que estos últimos. En un circuito de una sola línea, únicamente debemos decidir a que distancia colocaremos las estaciones de compensación.

La decisión de que arreglo elegir involucra la cantidad y la confiabilidad de los interruptores que se usen. Los capacitores pueden quedar como parte de la línea, esto es, "switchearlos" conjuntamente con la línea o dejarlos en operación, (a menos que la falla sea en un capacitor) si se decide por esta última opción se debe considerar su "contribución" a la corriente de falla.

En la búsqueda del "mejor" arreglo se debe cuidar que los cambios de la impedancia de transferencia no alteren el estado de la red y además que sea confiable, esto involucra el uso adecuado de los interruptores (cantidad y distribución) En la referencia [10] se tiene un completo estudio de algunos de los arreglos posibles, en el se analiza tanto los KVAR's requeridos como la impedancia de postfalla al "switchear" secciones de línea.

5-3.- IMPEDANCIA DE PRE Y POSTFALLA

En este inciso se analizará la impedancia de pre y postfalla al "switchear" una sección de línea de dos arreglos posibles, uno muy sencillo y otro más sofisticado, una buena referencia al respecto se tiene en [10].

En el arreglo mostrado en la fig. 5-1 no muestra uno sencillo y económico, pero poco confiable.

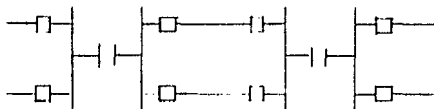


Fig. 5-1 Arreglo de capacitores

Este esquema tiene una impedancia dada por la siguiente ecuación

$$\frac{n}{2} X_L (1 - k) \quad (5-1)$$

cuando se tienen todas las secciones de la línea en servicio; en la ecuación 5-1, X_L es la reactancia de cada sección de línea y n es el número de secciones iguales en que se dividió la línea. Cuando una sección de línea sale de servicio se tiene una impedancia de

$$\frac{n}{2} X_L (1 - k) + \frac{X_L}{2} \quad (5-2)$$

o sea que aumenta su impedancia en $X_L/2$.

El circuito de la fig. 5-2 muestra un arreglo más confiable (obviamente más caro); este arreglo tiene una impedancia con todas sus secciones en servicio de

$$\frac{n}{2} X_L (1 - k) \quad (5-3)$$

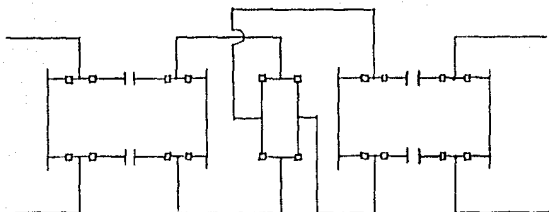


Fig. 5-2 Arreglo de capacitores.

y su impedancia al salir una sección de línea será de

$$\frac{\sqrt{L}}{2} X_L(1-k) + \frac{X_L}{2}(1-2k) \quad (5-4)$$

o sea, que tuvo un cambio de $(X_L/2)(1-2k)$, lo que implica que para una compensación del 50 % no se tendrá ninguna alteración en la reactancia de la línea al suceder ese cambio en la red; pero también indica que para grados mayores del 50 % se reduce la reactancia ante esa contingencia. Se puede decir, que alrededor de los esquemas mostrados anteriormente se encuentran los más recomendables.

5-4.- SOBREVOLTAJES A TIERRA EN LOS CAPACITORES SERIE

El voltaje en las terminales de los capacitores serie ($I X_{cs}$) es la diferencia de los voltajes a tierra de sus terminales. Debemos cuidar que el voltaje en los capacitores no exceda los límites especificados; esto es de esperarse cuando se tienen un alto grado de compensación y una carga máxima o bien cuando sucedan ciertas contingencias.

Cuando todas las secciones de la L.T. están en servicio, el voltaje se encuentra dentro de los rangos de trabajo, pero cuando sale una sección de línea se pueden tener series sobrevoltajes. Si una sección de línea sale de ser-

vicio, (ver figs. 5-3 y 5-4) la que permanece deberá llevar toda la corriente (el doble de la que llevaba antes de salir la sección de la línea), esto implica que el capacitor de esa sección debe generar cuatro veces la cantidad de reactivos que generaba antes de la contingencia — ($I^2 X_{ca}$), esta generación de reactivos incrementará el potencial de la terminal a de la fig. 5-4.

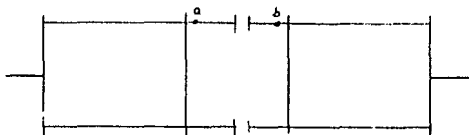


Fig. 5-3 Todas las secciones en servicio.

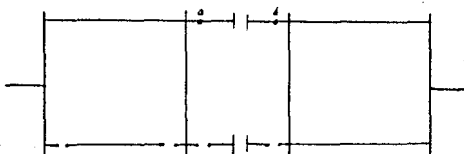


Fig. 5-4 Una sección de línea fuera de servicio.

Esos sobrevoltajes pueden evitarse distribuyendo los capacitores serie a lo largo de la línea. El conectar elementos reactivos (adecuadamente) en las terminales de los capacitores permite controlar esos sobrevoltajes. Por ejemplo, conectando un reactor en la terminal de mfc bajo potencial del capacitor aumenta ese potencial, disminuyendo así los sobrevoltajes. Esto justifica en parte el uso de las estaciones de compensación.

5-5.- RESONANCIA SUBSINCRONA

Un problema que han presentado los SEDP compensados es la tendencia a tener oscilaciones resonantes que pueden ocasionar fallas en las flechas de los rotores de conjuntos turbina-generador. Puesto que esas oscilaciones son producidas por corrientes transitorias de frecuencias más bajas de la nominal (frecuencia sincrónica) se le ha dado el nombre de Resonancia Subsincrónica (RSS).

Hasta la fecha se ha dado a conocer un solo caso de — falla de una flecha por RSS [21]. Análisis de oscilogramas de la corriente de línea tomados durante ese disturbio indican la presencia de magnitudes considerables de corrientes a frecuencias subsíncronas.

Cualquier cambio (disturbio), ya sea planeado o no, — provoca variaciones de la corriente a frecuencia sincrónica, esas variaciones pueden producir corrientes transitorias en la frecuencias naturales del sistema compensado, lo que provocaría severas oscilaciones (RSS). Para los SEDP sin — compensar esas corrientes transitorias son corrientes de — C.D. (componentes de C.D.) que se amortiguan en un tiempo — determinado por la razón de la inductancia a la resistencia de las trayectorias que siguen (constantes de tiempo L/R).

La magnitud de las oscilaciones producidas por las corrientes subsíncronas es independiente del campo magnético de excitación del generador, pero dependen de la energía — almacenada en los capacitores serie e inductores en el momento del disturbio. Esas corrientes interactúan con el — campo magnético principal del generador, provocando oscilaciones torsionales sobre el rotor; esas oscilaciones no causan daño, a menos que coincidan (o se aproximen) a una de

las frecuencias torsionales naturales del sistema turbina-generador. Cuando esto sucede los pares en la flecha pueden alcanzar niveles lo suficientemente grandes para dañar las.

El problema de RSS se ha atacado modelando las características eléctricas del sistema de transmisión y del generador por los métodos tradicionales. El sistema mecánico se ha modelado como un número de masas correspondiendo una para cada turbina, otra para el generador y otra para el excitador, conectadas por pequeñas flechas entre ellas, que se pueden considerar como resortes sujetos a torsión.

Este problema es muy complejo, ya que aparte de analizar la veracidad de los modelos utilizados (eléctrico y mecánico) se requiere analizar la magnitud y la frecuencia de los pares producidos por las corrientes subsíncronas. Esto puede no parecer tan difícil para expertos, pero si lo es, el hecho de como considerar el efecto acumulativo de éstos en la vida del generador. Para una consideración real se requeriría de un historial completo de esfuerzos torsionales a los cuales ha estado sujeto el generador.

La RSS se ha presentado (y es más factible) en líneas altamente compensadas acopladas a plantas termoeléctricas, al efectuar maniobras tales como: salida de líneas, "switches" de carga, etc. No se ha presentado en líneas compensadas acopladas a plantas hidroeléctricas.

No obstante, aún con el problema de RSS muchos autores consideran que la compensación serie de LT sigue siendo una buena alternativa para los fines que está destinada.

5.6.- CONCLUSIONES

El compensar adecuadamente las líneas de transmisión repercute tanto en el aspecto económico como en lo que respecta a la confiabilidad del sistema; en ese sentido se debe efectuar un análisis minucioso, ya que por un lado podemos caer en una sobreprotección, o bien en el otro extremo; lo cual sería muy arriesgado para la operación del sistema.

El mantener aproximadamente constante la impedancia de prefalla y postfalla es muy bueno, ya que al salir una sección de línea el sistema no se verá seriamente afectado, y ante un buen diseño de los capacitores podemos decir que no se verá afectado en ningún aspecto.

Es muy conveniente que al planear instalar capacitores serie se efectúen estudios para determinar si se tendrá RES y bajo que condiciones de operación es factible, con el objeto de tomar las correspondientes medidas preventivas.

CAPITULO VI

RESULTADOS

6-1.- INTRODUCCION

Se analiza como caso base una línea del sistema nacional, efectuando variaciones (indicadas en cada caso) con el objeto de ver los efectos en la operación de la línea. Se analizan los resultados manteniendo el voltaje constante en el punto de recepción, y también manteniéndolo constante en el punto de envío, o sea, suponiendo el punto de envío como una fuente de voltaje. - Los resultados se presentan en forma de gráficas.

6-2.- DATOS

Características de la línea

R = 0.02924	ohms/Km
X = 0.39005	ohms/Km
G = 0	
B = 4.2042 10 ⁻⁶	ohms/Km
f = 60.0	Hz
L = 314.0	Km
SIL = 525	W

Carga de diseño

V _L = 400	KV
P = 1000	Mw
f _p = 0.91(-)	

Restricciones

e = 1.05	
δ = 25°	(ángulo máx. de transmisión)

Base:

$$S = 1000 \text{ MVA}$$

$$V = 400 \text{ KV}$$

6.- RESULTADOS

Programa de computadora (apendice B)

$$\frac{k}{n \cdot l} = 42 \%$$

$$\frac{n \cdot l}{k} = 1$$

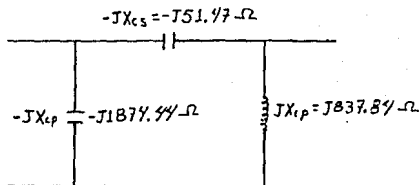
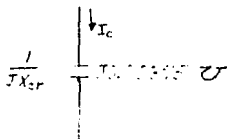


Fig. 6-1 Estación de compensación calculada

La estación de compensación queda ubicada a 157 Km del punto de recepción (a la mitad de la línea)

Compensación paralelo en el punto de recepciónReactivos

$$Q_R = -551.68 \text{ Mvar} = I_c^2 X_{cr}$$

6-4.- DIFERENTES CONDICIONES DE OPERACION DE LA LINEA

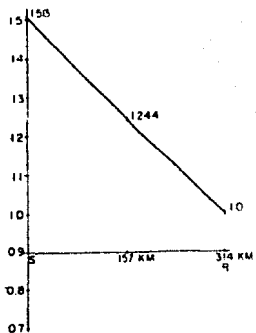
Descripción de los casos

- 6-4 1.- Las siguientes gráficas se obtuvieron manteniendo constante el voltaje en el punto de recepción — (1.0 p.u.) y una carga constante, con las variantes indicadas en cada caso. Gráficas de la fig.-- 6-2 a la 6-7.
- 6-4 2.- Las gráficas de la fig. 6-8 a la 6-11 se obtuie-
ron manteniendo constante el voltaje en el punto-
de recepción, variando la carga (indicada en cada
caso).
- 6-4.3.- Las gráficas de la fig. 6-12 a la 6-19 se obtu-
vieron manteniendo constante el voltaje en el pun-
to de envío (1.0 p.u.), variando la compensación
del punto de recepción, para controlar el voltaje
en ese punto. Manteniendo constante la corriente
en el punto de recepción, al valor indicado en ca
da caso.

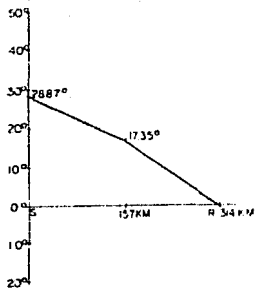
LÍNEA SIN COMPENSACION .

Como vemos en la gráfica 6-2 se tienen variaciones de la magnitud del voltaje de un 51 %, lo cual es intolerable en la operación de la línea. La variación del ángulo del voltaje no sufre un incremento excesivo, esto debido a que no se le puso ninguna restricción a la magnitud del voltaje.

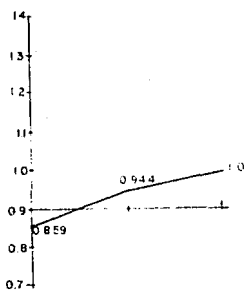
Este caso se hizo con fines comparativos ya que no se pueden permitir tales condiciones de operación de la línea.



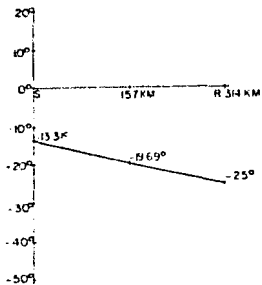
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje



Magnitud de corriente



d) Angulo de corriente

6.2 LINEA SIN COMPENSACION

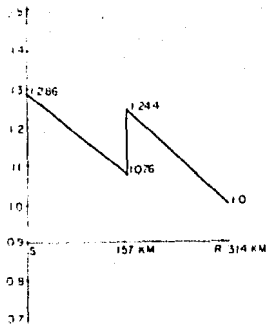
APLICACION DE LA COMPENSACION.

En las gráficas siguientes (6-3, 6-4 y 6-5) se definió la compensación, en la forma indicada en cada gráfica, con el objeto de ver por separado el efecto de los capacitores serie y el de la compensación paralelo, tanto la de las estaciones de compensación como la colocada en el punto de recepción.

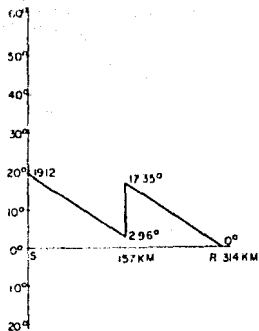
Al aplicar los capacitores serie calculados, (gráfica 6-3) vemos que disminuyen las elevaciones de la magnitud y del ángulo del voltaje. Por lo que respecta al ángulo, ya se encuentra en un valor aceptable (incluso menor que la restricción propuesta de 25°); pero la magnitud aún tiene elevaciones del 29 % los cuales todavía son intolerables en la operación de la línea.

Cuando se conecta la estación de compensación completa (gráfica 6-4) se tienen elevaciones de voltaje del 27 % esto, debido a que no se han cumplido las restricciones — que se pusieron en el desarrollo del método (inciso 4-4).

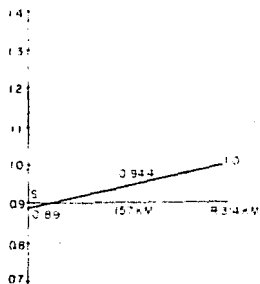
Una vez conectada toda la compensación (gráfica 6-5) vemos cumplidas las restricciones de operación de la línea, tanto de la magnitud como del ángulo del voltaje. El cambio con la gráfica anterior es drástico (lo es todavía — más con el caso sin compensación), tal parece que la compensación paralelo en el punto de recepción fuera la que controlase las elevaciones de potencial, pero de hecho, — es toda la compensación la que lo lleva a cabo.



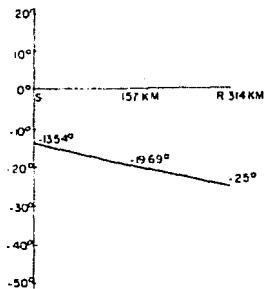
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje

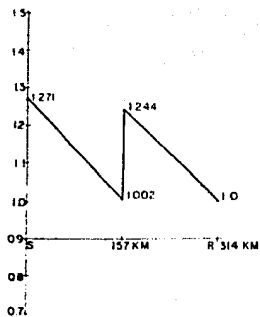


c) Magnitud de corriente

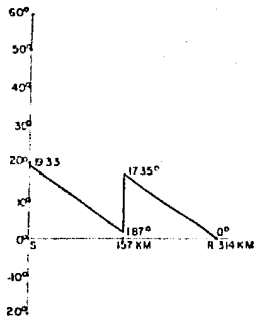


d) Angulo de corriente

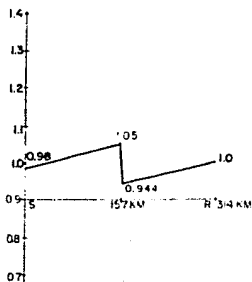
6-3 LINEA CON COMPENSACION SERIE UNICAMENTE



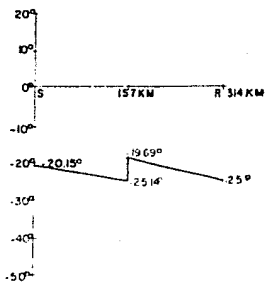
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje

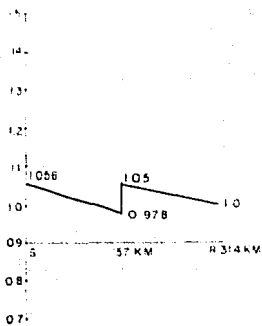


c) Magnitud de corriente

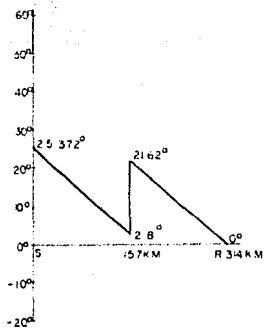


d) Angulo de corriente

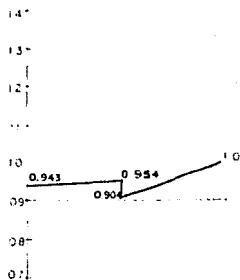
6-4 LINEA CON LAS ESTACIONES DE COMPENSACION



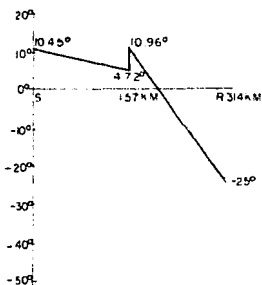
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje



c) Magnitud de corriente

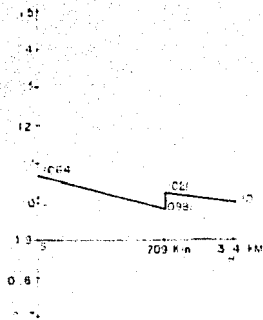


d) Angulo de corriente

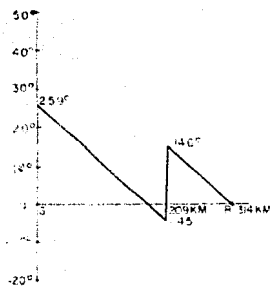
6-5 LINEA CON ESTACIONES DE COMPENSACION Y COMPENSACION EN EL PUNTO DE RECEPCION

VARIACION DE LA UBICACION DE LAS ESTACIONES
DE COMPENSACION.

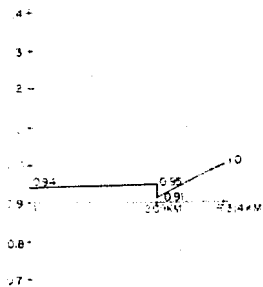
En las gráficas 6-6 y 6-7 se muestran los resultados -
obtenidos al colocar las estaciones de compensación a dife-
rente distancia de la calculada para su ubicación. Se co-
locaron a un tercio y a dos tercios, de la longitud de la -
línea, del punto de recepción, lo cual es una variación con
siderable. Se observa en las gráficas que no se tuvieron -
variaciones de voltaje muy grande, o sea, de un 5 % que fue
la restricción que se puso en la magnitud de voltaje, se in
crementó al 8 %. Se pueden controlar estas variaciones -
recalculando los elementos de compensación paralelo, para -
la ubicación deseada.



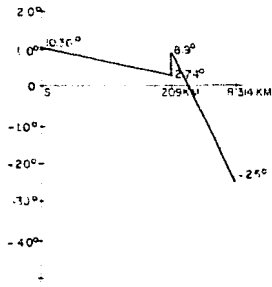
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje

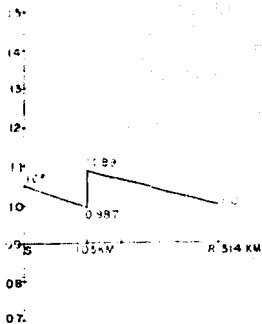


c) Magnitud de corriente

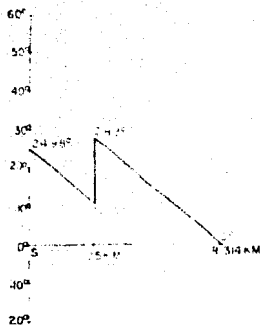


d) Angulo de corriente

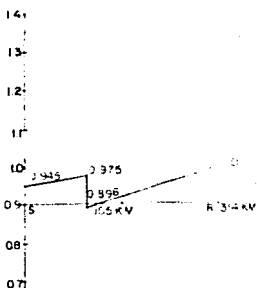
6-6 LINEA CON TODA LA COMPENSACION, CON DIFERENTE DISTANCIA DE UBICACION DE LA ESTACION DE COMPENSACION



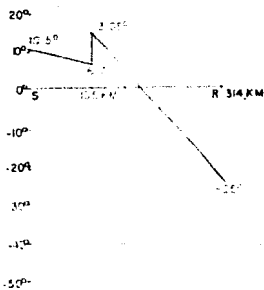
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje



c) Magnitud de corriente



d) Angulo de corriente

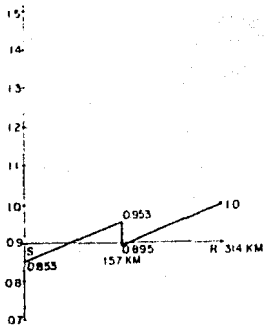
6-7 LINEA CON TODA LA COMPENSACION, CON DIFERENTE DISTANCIA DE UBICACION DE LA ESTACION DE COMPENSACION

VARIACION DE CARGA.

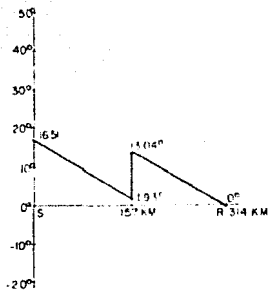
La compensación fue diseñada para una carga de 1,000 Mw, en los siguientes casos se tienen variaciones de un - 50 % menos de carga y un 20 % más (gráficas 6-8, 6-9, -- 6-10 y 6-11).

Se observa que aún cuando la carga disminuya a la mi tad no se tienen variaciones de la magnitud del voltaje - mayores de 3 %, en otras palabras, se tiene una buena - regulación de la línea.

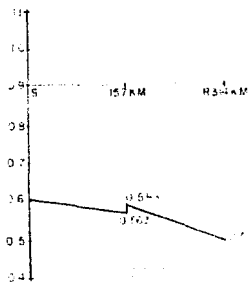
Cuando se tiene una sobrecarga del 20% no tienen el gaciones de voltaje de 14 %, las cuales pueden tolerarse - en el lapso que se efectua una acción correctiva.



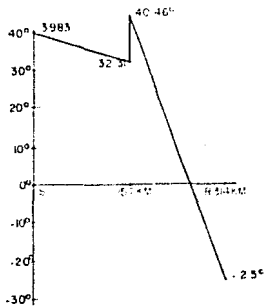
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje

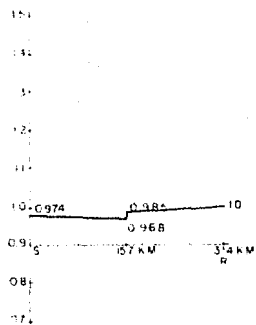


c) Magnitud de corriente

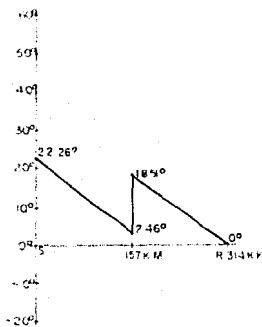


d) Angulo de corriente

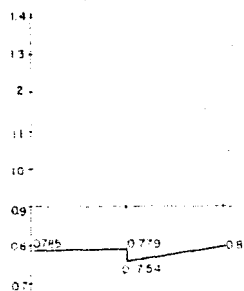
6-8 LINEA CON TODA LA COMPENSACION, CON UNA CARGA DE 500 MW



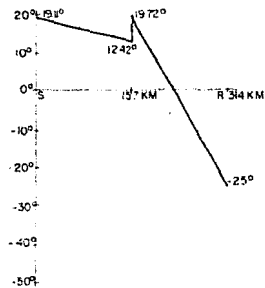
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje

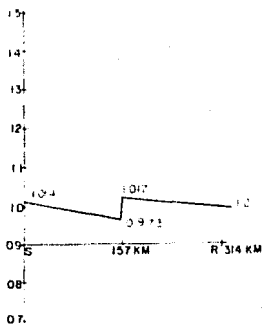


c) Magnitud de corriente

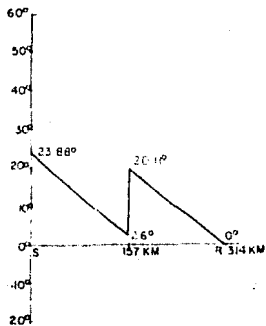


d) Angulo de corriente

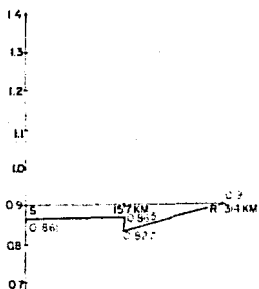
6-9 LINEA CCN TODA LA COMPENSACION, CON UNA CARGA DE 600 MW



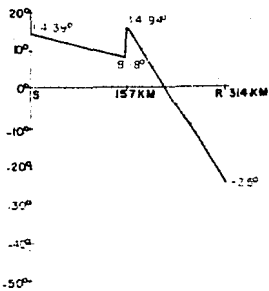
a) Magnitud de voltaje



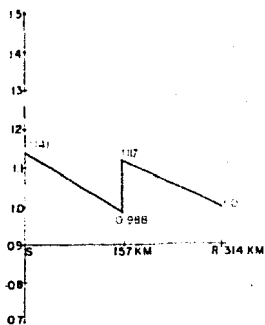
b) Angulo de voltaje



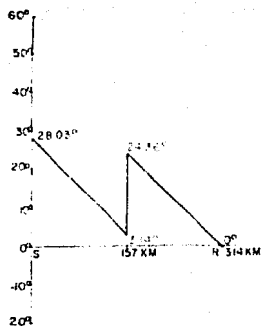
c) Magnitud de corriente



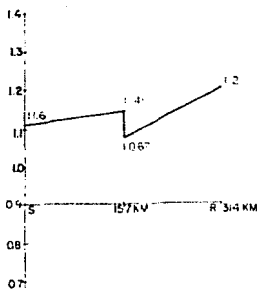
d) Angulo de corriente



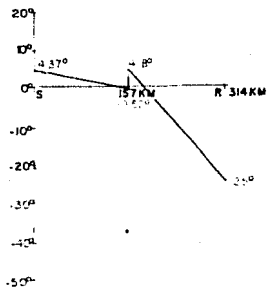
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje



c) Magnitud de corriente



d) Angulo de corriente

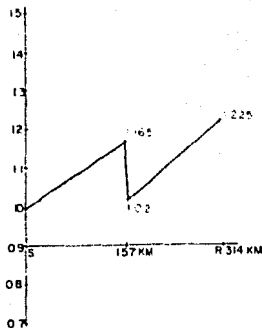
6-II LINEA CON TODA LA COMPENSACION, CON UNA CARGA DE 1200 MW.

CASOS MANTENIENDO FIJO EL VOLTAJE EN EL
PUNTO DE ENVIO.

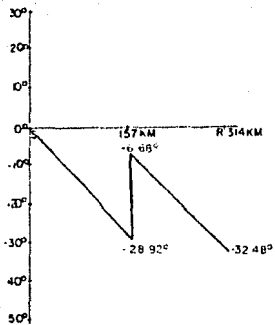
En la gráfica 6-12 se observan variaciones del 22 % de la magnitud del voltaje; esto debido a que la compensación fue diseñada para mantener fijo el voltaje en el punto de recepción, pero esto puede ajustarse a límites permisibles controlando la compensación paralelo colocada en el punto de recepción (ver gráfica 6-13). El nuevo valor de esa compensación fue calculado para mantener el voltaje nominal (aproximadamente) en ese punto.

En la gráfica 6-14 se puede observar el efecto que tiene el quitar las ramas paralelo de las estaciones de compensación.

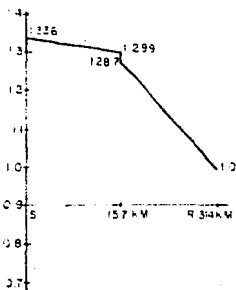
De las gráficas 6-15 en adelante se analizan los efectos que tienen al variar la carga y la ubicación de las estaciones de compensación, con el valor de la compensación paralelo en el punto de recepción, mostrado en la gráfica 6-13.



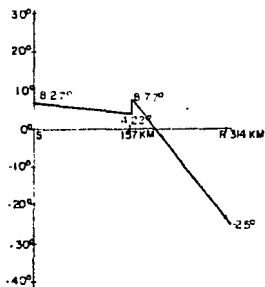
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje

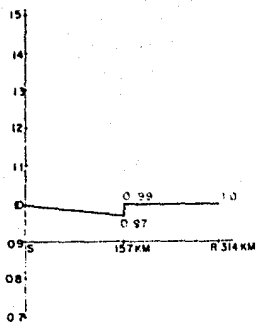


c) Magnitud de corriente

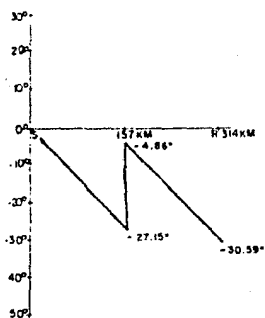


d) Angulo de corriente

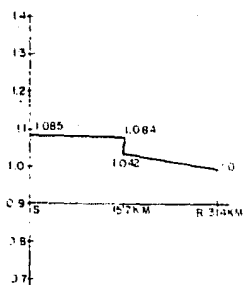
6-12 LINEA CON TODA LA COMPENSACION



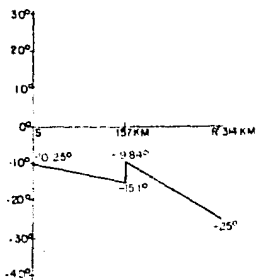
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje

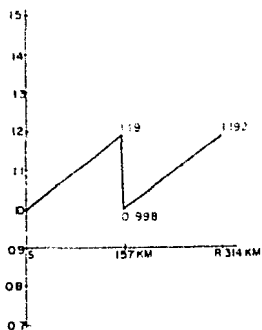


c) Magnitud de corriente

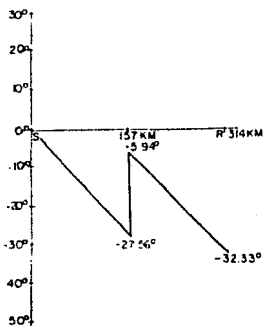


d) Angulo de corriente

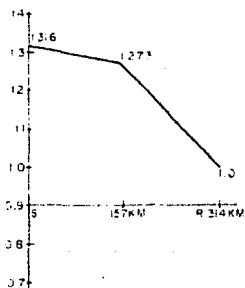
6-13 LINEA CON DIFERENTE COMPENSACION EN EL PUNTO DE RECEPCION
(suceptancia del capacitor JO.00125 MHOS)



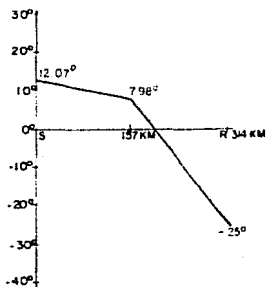
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje

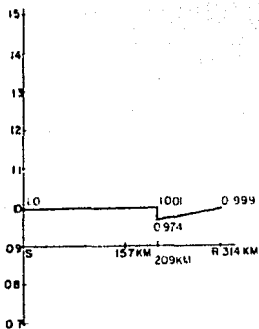


c) Magnitud de corriente

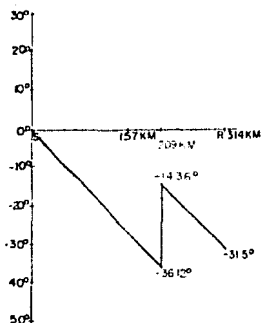


d) Angulo de corriente

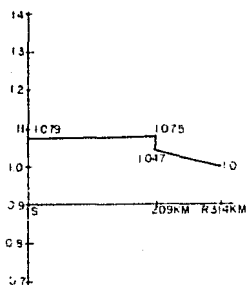
6-14 LINEA SIN COMPENSACION PARALELO (ramas paralelo de la estacion de compensacion)



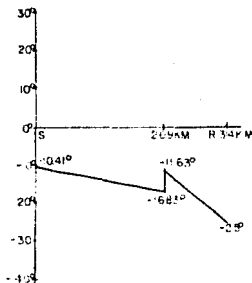
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje

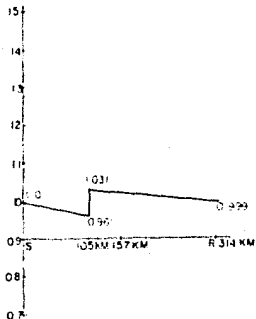


c) Magnitud de corriente

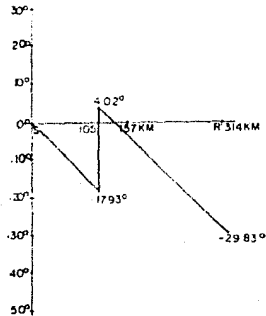


d) Angulo de corriente

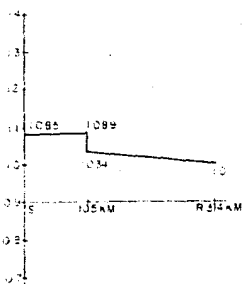
6-15 LINEA CON DIFERENTE COMPENSACION EN EL PUNTO DE RECEPCION (suceptancia del capacitor 10.00125 Mhos) VARIANDO LA UBICACION DE LA ESTACION DE COMPENSACION



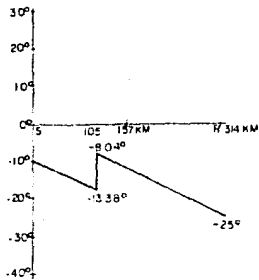
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje

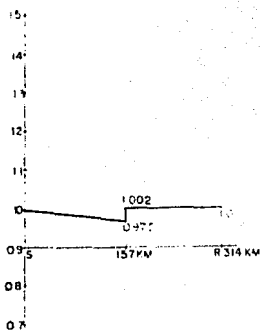


c) Magnitud de corriente

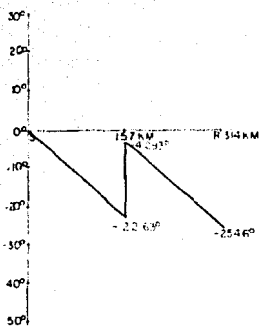


d) Angulo de corriente

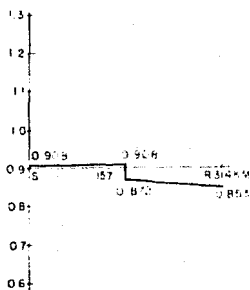
6-16 LINEA CON DIFERENTE COMPENSACION EN EL PUNTO DE RECEPCION (suceptancia del capacitor J.00025 Mhos) VARIANDO LA UBICACION DE LA ESTACION DE COMPENSACION.



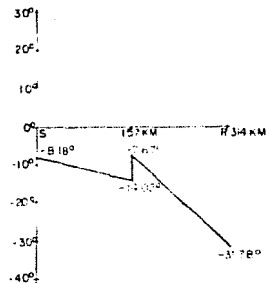
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje

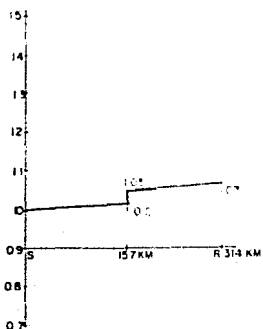


c) Magnitud de corriente

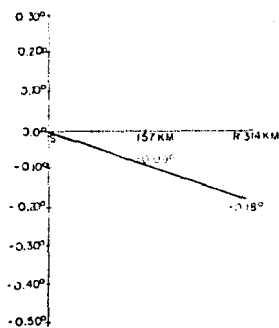


d) Angulo de corriente

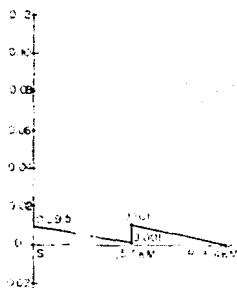
6-17 LINEA CON DIFERENTE COMPENSACION EN EL PUNTO DE RECEPCION
(suceptancia del capacitor J 0.00125 Mhos.)



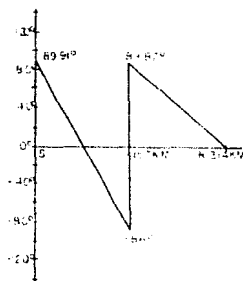
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje

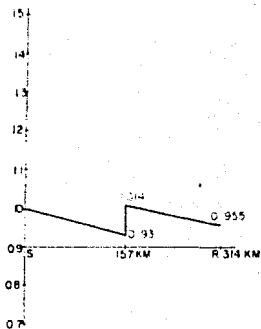


c) Magnitud de corriente

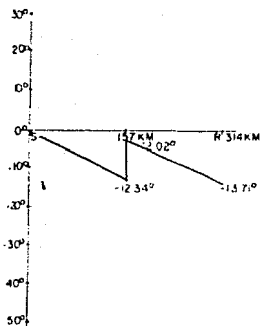


d) Angulo de corriente

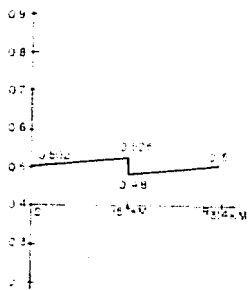
6-18 LINEA EN VACIO SIN COMPENSACION EN EL PUNTO DE RECEPCION



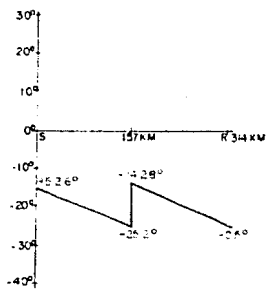
a) Magnitud de voltaje



b) Angulo de voltaje



c) Magnitud de corriente



d) Angulo de corriente

6-19 LINEA SIN COMPENSACION EN EL PUNTO DE RECEPCION.

CAPITULO VII

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En este trabajo se ha cubierto el t6pico de la compen-
saci6n serie y paralelo de l6neas de transmisi6n. La ---
compensaci6n m6s satisfactoria fu6 lograda con el uso de ---
las estaciones de compensaci6n descritas en el desarrollo,
incluyendo compensaci6n paralelo en el punto de recepci6n---
(reactivos capacitivos), para control del voltaje en ese ---
punto.

En l6neas no muy largas (aprox. 350 Km.) una de las ---
ramas paralelo de las estaciones de compensaci6n queda ---
formada por un capacitor; en longitudes m6s grandes las ---
dos ramas quedan formadas por reactores, ya que en ese ---
tipo de l6neas los reactivos capacitivos generados por ---
6stos son muy altos, y hay necesidad de "cancelarlos" ---
para lograr un buen control de las ca6das de potencial a---
lo largo de la l6nea, evitando as6, serios sobrevoltajes---
en su operaci6n, sobre todo en bajas cargas.

El n6mero de estaciones de compensaci6n debe esta---
blecerse en base a la m6s alta carga supuesta.

La ubicaci6n de las estaciones de compensaci6n se ---
consider6 sim6trica a lo largo de la l6nea, pero esto no---
necesariamente debe hacerse, sino adaptarla a la distar---
cia m6s conveniente, ya que variar su ubicaci6n hasta un ---
30% no provoca alteraciones significativas con las esta---
ciones calculadas por el m6todo. (ver gr6ficos)

La ubicación de las estaciones puede hacerse en subestaciones intermedias, cercanas a la distancia calculada, o si no las hay, ubicar las estaciones; pero, se pueden utilizar, además se su objetivo, para efectuar transecciones de la línea, lo cual disminuiría en gran parte el desbalance de la misma.

Por lo que respecta a la carga, vemos que calculamos las estaciones de compensación para una carga determinada y variamos la carga hasta un 20 % sin obtener sobrevoltajes excesivos. Para disminuciones de carga mayores a este porcentaje podemos "switcher" parte de los elementos de las estaciones de compensación, o en algunos casos únicamente controlando la compensación en el punto de recepción, es suficiente para tener una operación aceptable de la línea.

Normalmente la capacidad de transmisión de las líneas largas se ve limitada por el criterio de estabilidad transitoria, a diferencia de las líneas cortas que su limitación es el de estabilidad en estado estable (o límite térmico de los conductores); pero cuando se tienen líneas largas con compensación serie, estas tienden a parecer como líneas "cortas", puesto que su reactancia ha sido disminuida, por lo tanto se puede pensar en que estas tengan las mismas limitaciones que las líneas cortas.

Cabe recordar, que por el método propuesto para calcular las estaciones de compensación requeridas y que se cumplan plenamente las restricciones establecidas, se debe calcular dicha compensación para cada carga establecida; esto no es complejo o difícil de llevar a cabo, dada la sencillez de los cálculos requeridos para ello. Este método se antoja muy útil para analizar las muchas al-

ternativas que existen en el diseño de compensación de una línea de transmisión; aunque, por no tratar el problema muy a fondo, no es recomendable para dar la solución final; pero sí ayuda a eliminar muchas alternativas, o bien, para darnos lineamientos en la operación de la línea.

En general podemos decir que la compensación (serie y paralelo) es una buena solución al problema de la transmisión de la energía eléctrica, y resulta ser mejor (al menos económicamente) que construir líneas de transmisión no compensadas.

El problema de la resonancia subsíncrona es un aspecto que debe estudiarse a fondo para proteger adecuadamente al sistema.

A P E N D I C E A

PROGRAMA DE COMPUTACION DIGITAL PARA OBTENER LOS PARÁMETROS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN:

CARACTERÍSTICAS

- 1.- Puede manejar:
 - 1.a).- "N" Fases
 - 1.b).- "N" Subconductores por fase
 - 1.c).- "N" Hilos de guarda
 - 1.d).- Cualquier configuración de la línea.
- 2.- Considera efecto de tierra (Teoría de Carson)
- 3.- Utiliza el método de triangulización para reducir las matrices.

FORMA DE ALIMENTAR LOS DATOS

- 1.- Lee todos los datos en forma libre
- 2.- Lee los datos en 10 instrucciones de lectura (READ'S)
- 3.- Cada "READ" debe contener lo siguiente:

(COLOCADOS EN ESE ORDEN)

- N, NS, H
- EMGC, EMGH

- REXC, REXH
- RT
- F, S
- RESC, RESH
- IDET
- X (I), Y(I), I=1, NSH
- S 1, S 2, S 3
- ICC

(LA DEFINICION DE CADA VARIABLE SE ENCUENTRA AL PRINCIPIO DEL LISTADO DEL PROGRAMA)

NOTAS

1.- El programa está adaptado para una computadora HP-2000 (Tecnológico Regional de Morelia, Mich.) — Actualmente se encuentra como programa de biblioteca.

2.- Todas las instrucciones de lectura y parte de las de escritura (READ'S y WRITE'S) tienen la siguiente forma: READ (LI,... , WRITE (LO,...

En esa computadora se utilizó una subrutina de biblioteca con el objeto de que el programa pida — los datos con letrecos que escribe en pantallas — (o teletipos).

3.- Los "WRITE'S" de escritura de resultados tienen como salida la impresora.
WRITE (C,...

4.- Las coordenadas de todos los conductores deben llevar el siguiente orden:

4.a).- Fases ("H" fases, ejem. A, B, C)

4.b).- Subconductores de las fases (NS de "A", NS de
"B", NS de "C")

4.c).- Hilos de guarda.


```

0001 FTM4.L
0002 PPROGRAM B1B2B
0003 C .....
0004 C *
0005 C * PPROGRAMA PARA OBTENER LOS PARAMETROS DE LA LINEA DE *
0006 C * TRANSMISION. SE PUEDEN CONSIDERAR LOS EFECTOS DE LOS *
0007 C * HILOS DE GUARDA Y CORRECCIONES POR EFECTO DE TIERRA *
0008 C * (TEORIA DE CARSON). *
0009 C *
0010 C * .....
0011 C
0012 C DEFINICION DE LAS VARIABLES
0013 C
0014 C N = NUMERO DE FASES
0015 C NS = NUMERO DE SUBCONDUCTORES POR FASE
0016 C M = NUMERO DE HILOS DE GUARDA
0017 C RMCX = RADIO MEDIO GEOMETRICO DE LOS CONDUCTORES
0018 C RMGX = RADIO MEDIO GEOMETRICO DE LOS HILOS DE GUARDA
0019 C REXC = RADIO EXTERIOR DE LOS CONDUCTORES
0020 C REXM = RADIO EXTERIOR DE LOS HILOS DE GUARDA
0021 C PT = RESISTIVIDAD DE LA TIERRA
0022 C F = FRECUENCIA DE TRANSMISION
0023 C S = LONGITUD DE LA LINEA
0024 C FESC = RESISTENCIA DE LOS CONDUCTORES
0025 C RESM = RESISTENCIA DE LOS HILOS DE GUARDA
0026 C IDET = INDICADOR DEL EFECTO DE TIERRA
0027 C (IDET=1 CONSIDERA, IDET=0 NO CONSIDERA)
0028 C X(1),Y(1) = VECTORES DE COORDENADAS
0029 C S1,S2,S3 = LONGITUD DE LAS SECCIONES DE LINEA
0030 C (CONSIDERANDO DOS TRANSPOSICIONES)
0031 C ICC = INDICADOR DEL ORDEN DE LA CORRECCION DE CARSON
0032 C NSM = N + 3*NS + M
0033 C NMS,NIJ,DII,R,RZ,P1,K1,K2,K3,K4,COR1,COR2,COR3,COR4,
0034 C COX1,COX2,COX3,COX4,TETA,RIJC,XIJC,ZR = VARIABLES
0035 C AUXILIARES
0036 C ZA,P = MATRICES AUXILIARES
0037 C DELTA = MATRIZ DE CORRECCIONES DE CARSON
0038 C F1,F2,F3 = FACTORES DE TRANSPOSICION
0039 C Z = MATRIZ DE IMPEDANCIAS
0040 C PAUX = MATRIZ DE POTENCIALES
0041 C C = MATRIZ DE CAPACITANCIAS
0042 C YM = MATRIZ DE ADMITANCIAS
0043 DIMENSION X(11),Y(11),IP(5),PAUX(3,3),C(3,3),PIA(3,3)
0044 COMPLEX P(11,11),ZA(11,11),DELTA(11,11),Z(3,3),YM(3,3),PH(3,3)
0045 EQUIVALENCE (IP,LI),(IP(2),LO)
0046 C LECTURA DE LOS PARAMETROS GENERALES
0047 CHLL RMPAR(IP)
0048 WRITE(LO,1)
0049 1 FORMAT(2X,"NECESITO EL NO. DE FASES, NO. DE SUBCONDU. POR FASE,
0050 *Y EL NO. DE HILOS DE GUARDA")
0051 READ(LI,*)M,NS,M
0052 WRITE(LO,2)
0053 2 FORMAT("DAME EL RADIO MEDIO GEOMETRICO DE LOS CONDUCTORES Y DE
0054 LOS HILOS DE GUARDA")
0055 READ(LI,*)RMCX,RMGX
0056 WRITE(LO,3)
0057 3 FORMAT(2X,"NECESITO EL RADIO EXTERIOR DE LOS CONDUCTORES E HILOS
0058 DE GUARDA")

```

```

0059      PENDING * PENC PESH
0060      WRITE(LO,4)
0061 4      FORMAT(2X,'RESISTIVIDAD DE LA TIERRA')
0062      PENDING * FT
0063      WRITE(LO,5)
0064 5      FORMAT(2X,'FRECUENCIA Y LONGITUD DE LA LINEA')
0065      PENDING * F,S
0066 6      FORMAT(2X,'LONG. DE C.M. DE LAS 3 SECCIONES')
0067      WRITE(LO,7)
0068 7      FORMAT(2X,'RESISTENCIA DE LOS CONO E HILOS DE GUARDA')
0069      PENDING * PESC,PESH
0070      WRITE(LO,8)
0071 8      FORMAT(2X,'SI QUIERES EFECTO DE TIERRA METE UN UNO.SI40 UN CERO')
0072      PENDING * IDDET
0073      RD=0.0953
0074      F1=0.3219E-03
0075 9      FORMAT(2X,'SI QUIERES CORRECCIONES DE CARSON METE EL ORDEN DE LA
0076      *CORRECCION')
0077      NSH = N + N*NS3 + H
0078 C      LECTURA DE LAS COORDENADAS DE LOS CONDUCTORES
0079      WRITE(LO,10)
0080 10     FORMAT(2X,'COORDENADAS , INICIANDO POR LAS FASES, LUEGO LOS SUBCON-
0081     DUCTORES DE CADA FASE Y DESPUES LA DE LOS HILOS DE GUARDA')
0082      READ(LI,*)X(I),Y(I),I=1,NSH
0083 11     WRITE(LO,6)
0084      READ(LI,*)S1,S2,S3
0085      IF(S1.EQ.0.0) GO TO 700
0086      WRITE(LO,9)
0087      READ(LI,*)ICC
0088 C
0089 C      ESCRIBE LOS DATOS DE ENTRADA
0090      WRITE(6,100)
0091      WRITE(6,130)M,NS,H
0092      WRITE(6,140)RMGC,RNGH
0093      WRITE(6,150)REXC,REXH
0094      WRITE(6,160)RT,RESC,RESH
0095      WRITE(6,170) F,S
0096      WRITE(6,171)
0097      WRITE(6,175)(X(I),Y(I),I=1,NSH)
0098      WRITE(6,180)ICC
0099 C      CALCULA LAS DISTANCIAS ENTRE CONDUCTORES Y ENTRE CONDUCTORES Y
0100 C      SUS IMAGENES
0101      NMS = NSH - N
0102      DO 21 I=1,NSH
0103          DO 21 J=1,NSH
0104              HIJ=SQRT((X(J)-X(I))**2+(Y(J)-Y(I))**2)
0105              IF(I-J) 19,12,19
0106 12          IF(J.GT.NMS) GO TO 13
0107              DIJ=RMGC
0108              GO TO 20
0109 13          DIJ=RMGH
0110              GO TO 20
0111 19          DIJ=SQRT((X(J)-X(I))**2+(Y(J)-Y(I))**2)
0112 20          ZAC(I,J)=CMPLX(HIJ,DIJ)
0113 21          CONTINUE
0114      DE=2160.0*SQRT(FT/F)
0115      PI=4*ATAN(1.0)
0116      W=2*PI*F
0117 C
0118 C      CALCULA LA MATRIZ DE POTENCIALES

```

```

C119      DO 30 I=1,NSH
C120      DO 30 J=1,NSH
C121      IF(I-J) 24,24,26
C122      24  IF(J.GT.NHS) GO TO 25
C123      R=REXC
C124      GO TO 27
C125      25  R=REXH
C126      GO TO 27
C127      P=AINAG(Z(I,J))
C128      27  PZ=REAL(Z(I,J))
C129      P1=1.183*ALOG(RZ/R)
C130      P(I,J)=CMPLX(P1,0.0)
C131      30  CONTINUE
C132      C
C133      C  CLASIFICA EL ORDEN DE LA CORRECCION DE CARSON QUE SE PIDE
C134      K1=0
C135      K2=0
C136      K3=0
C137      K4=0
C138      ICC=IABS(ICC)
C139      DO 31 I=1,NSH
C140      DO 31 J=1,NSH
C141      31  DELTA(I,J)=CMPLX(0.0,0.0)
C142      IF(ICC.EQ.0.OR.ICC.GT.4) GO TO 41
C143      IF(ICC.EQ.4)GO TO 32
C144      IF(ICC.EQ.3)GO TO 33
C145      IF(ICC.EQ.2)GO TO 34
C146      IF(ICC.EQ.1)GO TO 35
C147      32  K4=1
C148      33  K3=1
C149      34  K2=1
C150      35  K1=1
C151      C
C152      C  CALCULA LA MATRIZ DE CORRECCIONES DE CARSON (DELTA)
C153      DO 40 I=1,NSH
C154      DO 40 J=1,NSH
C155      IF(I-J)36,37,38
C156      37  CDR1=1.E-04*U*(-K1+2.399+1.E-03*(Y(I)+SQRT(F/RT)))
C157      CDR2=1.E-04*U*(K2+2.717+1.E-06*(Y(I)+2)*(F/RT))*(3.36+ALOG(SQRT(
C158      1RT/F)/Y(I)))
C159      CDR3=1.E-04*U*(K3+5.084+1.E-10*(Y(I)+3)*(F/RT)+SQRT(F/RT))
C160      CDR4=1.E-04*U*(-K4+3.322+1.E-13*(Y(I)+4)*(3.541+ALOG(SQRT(RT/F)/
C161      Y(I)))
C162      COX1=1.E-04*U*(K1+2.399+1.E-03*(Y(I)+SQRT(F/RT)))
C163      COX2=1.E-04*U*(-K2+9.271+1.E-07*(Y(I)+2)*(F/RT))
C164      COX3=1.E-04*U*(K3+5.084+1.E-10*(Y(I)+3)*(F/RT)+SQRT(F/RT))
C165      COX4=1.E-04*U*(-K4+3.322+1.E-13*(Y(I)+4)*(3.541+ALOG(SQRT(RT/F)/
C166      Y(I)))
C167      GO TO 39
C168      38  TETA=ATAN2((X(J)-X(I))/(2.0*Y(I)))
C169      CDR1=1.E-04*U*(-K1+1.299+1.E-03*SQRT(F/RT)+REAL(Z(I,J))*COS(TETA))
C170      CDR2=1.E-04*U*(K2+6.785+1.E-07*(F/RT)+(REAL(Z(I,J))+2)*COS(TETA)+
C171      1)*(3.661+ALOG(SQRT(RT/F)/REAL(Z(I,J))))
C172      CDR3=1.E-04*U*(K3+2.951+1.E-07*(F/RT)+REAL(Z(I,J))+2)*TETA+
C173      1SIN(2*TETA)
C174      CDR4=1.E-04*U*(K4+6.355+1.E-11*(F/RT)+SQRT(F/RT)*(REAL(Z(I,J))+3)
C175      1+COS(J*TETA))
C176      COX1=1.E-04*U*(K1+2.399+1.E-03*SQRT(F/RT)+REAL(Z(I,J))*COS(TETA))
C177      COX2=1.E-04*U*(-K2+2.318+1.E-07*(F/RT)+(REAL(Z(I,J))+2)*COS(2
C178      1TETA))

```

```

0179      COX3=1.E-04*V*(K3+6.355*1.E-11*(F/RT)**SQRT(F/RT)*(REAL(Z(1,J))**3)
0180      1=CO5(3+TETA))
0181      CO/4=1.E-04*V*(K4+9.02*1.E-13*(F/RT)**2)*(REAL(Z(1,J))**4)+TETA*
0182      15*1/(4*TETA))
0183      39 RIJG=CO1+CO2+CO3+CO4
0184      XIJG=COX1+COX2+COX3+COX4
0185      40 DELTA(1,J)=CMPLX(RIJG,XIJG)
0186      41 CONTINUE
0187      F1=51/S
0188      F2=62/S
0189      F3=63/S
0190      IF>IDET ME.0) GO TO 50
0191      RD=0.0
0192      C  CALCULA LA MATRIZ DE IMPEDANCIAS PRIMITIVAS
0193      50 DO 85 I=1,MSH
0194          DO 85 J=1,MSH
0195              IF(I=J) G5=71.65
0196              71 IF(I.GT.MSH) GO TO 72
0197                  ZR=(RESC+RD)*S
0198                  GO TO 73
0199              72 ZR=(RESH+RD)*S
0200                  GO TO 73
0201              65 ZR=RD*S
0202              73 IF>IDET.GE.1) GO TO 75
0203                  ZI=M*FK*S*(ALOG(2.*S/RIJG(ZA(1,J)))-1.)
0204                  GO TO 80
0205              75 ZI=M*FK*S*ALOG(DE/AIMAG(ZA(1,J)))
0206                  ZA(1,J)=CMPLX(ZR,ZI)
0207              80 ZA(1,J)=ZA(1,J)+DELTA(1,J)
0208              85 CONTINUE
0209      C
0210      C  PREGUNTA SI HAY HILOS DE GUARDA
0211      C
0212      IF(H LE.0) GO TO 86
0213      C  ELIMINA LOS HILOS DE GUARDA
0214      CALL DIAG(ZA,HMS,MSH)
0215      CALL DIAG(P,HMS,MSH)
0216      86 CONTINUE
0217      C
0218      C  HACE CEROS EN LOS VOLTAJES DE LOS SUBCONDUCTORES Y AJUSTA
0219      C  EL VECTOR DE CORRIENTES
0220      C
0221      CALL TRANS(ZA,H,HMS,MS)
0222      CALL TRANS(P,H,HMS,MS)
0223      C
0224      C
0225      C  ELIMINA LOS SUBCONDUCTORES
0226      C
0227      CALL DIAG(ZA,H,MSH)
0228      CALL DIAG(P,H,MSH)
0229      C
0230      C  CONSIDERA TRANSPOSICIONES
0231      DO 87 I=1,N
0232          DO 87 J=1,N
0233              PH(I,J)=P(I,J)
0234              Z(I,J)=ZA(I,J)
0235      87 CALL TRASP(F1,F2,F3,Z,H)
0236      CALL TRASP(F1,F2,F3,PH,H)
0237      DO 90 I=1,N
0238          DO 90 J=1,N

```

```

C239 90 PAUX(I,J)=REAL(PN(I,J))
C240 CWLL INVER(PAUX,C.N)
C241 IF(F1 EQ F2.AND.F2.EQ.F3)GO TO 95
C242 IF(F1 EQ 1.0) GO TO 93
C243 IF(F1 EQ 0.0 OR F2 EQ 0.0 OR F3 EQ 0.0) GO TO 94
C244 WRITE(6,500)
C245 S4=S1+S2
C246 WRITE(6,510)S1,S4
C247 GO TO 96
C248 93 WRITE(6,520)
C249 GO TO 96
C250 94 WRITE(6,530)S1
C251 GO TO 96
C252 95 WRITE(6,540)
C253 96 CONTINUE
C254 WRITE(6,600)
C255 WRITE(6,200)((C(I,J),J=1,N),I=1,N)
C256 DO 97 I=1,N
C257 DO 97 J=1,N
C258 C(I,J)=C(I,J)*S
C259 97 YN(I,J)=CNPLX(0.0,W=C(I,J))
C260 WRITE(6,630)
C261 WRITE(6,200)(YN(I,J),J=1,N),I=1,N)
C262 GO TO 11
C263 100 FORMAT(20X," DATOS GENERALES ",//)
C264 130 FOPRAT(10X,"NUMERO DE FASES",20X,I2,/,10X,"NUMERO DE SUBCOND. POR
C265 1FASE",8X,I2,/,10X,"NUMERO DE HILOS DE GUARDA",10X,I2)
C266 140 FORMAT(10X,"RNG DE LOS CONDUCTORES",10X,F10.5,5X,"PIES",/,10X,"RNG
C267 1DE LOS HILOS DE GUARDA",14X,F10.5,5X,"PIES")
C268 150 FORMAT(10X,"RADIO EXTERIOR DE LOS CONDUCTORES",7X,F10.5,5X,"PIES"
C269 1/,10X,"RADIO EXTERIOR DE LOS HILOS DE GUARDA",3X,F10.5,5X,"PIES")
C270 160 FORMAT(10X,"RESISTIVIDAD DE LA TIERRA",13X,F10.5,5X,"OHMS/M",
C271 1/,10X,"RESISTENCIA DE LOS CONDUCTORES",19X,F10.5,5X,"OHMS/MILLA",
C272 2/,10X,"RESISTENCIA DE LOS HILOS DE GUARDA",6X,F10.5,5X,"OHMS/MILL-
C273 3")
C274 170 FORMAT(10X,"FRECUENCIA DE TRANSMISION",15X,F10.5,5X,"CICLOS/SEC",
C275 1/,10X,"LONGITUD DE LA LINEA",20X,F10.5,5X,"MILLAS",//)
C276 171 FORMAT(10X,"COORDENADAS DE LOS CONDUCTORES (FASES,SUBCOND.,HILOS D
C277 1E GUARDA)",/,23X,"X",16X,"Y",//)
C278 175 FORMAT(20X,F6.2,10X,F6.2)
C279 180 FORMAT(//,20X,"CORRECCION DE CARSON",10X,I3,//)
C280 200 FORMAT(3(3X,F10.5,2X,F10.5,4X))
C281 300 FOPRAT(2X,BF10.5)
C282 400 FORMAT(2X,16F6.3)
C283 410 FORMAT(2X,16F6.4)
C284 420 FOPRAT(2X,16F6.5)
C285 450 FOPRAT(2X,3F10.6)
C286 460 FOPRAT(2X,3F10.8)
C287 500 FORMAT(//,30X,"LINEA CON DOS TRANSPOSICIONES A DISTANCIAS DIFERENL
C288 15",//)
C289 510 FORMAT(20X,"PRIMERA TRANSPOSICION A",7X,F10.2,3X,"MILLAS",/,20X,
C290 1"SEGUNDA TRANSPOSICION A",7X,F10.2,3X,"MILLAS",//)
C291 520 FORMAT(//,30X,"LINEA NO TRANSPUESTA",//)
C292 530 FORMAT(//,20X,"LINEA CON UNA TRANSPOSICION A",F10.2,3X,"MILLAS",
C293 1//)
C294 540 FOPRAT(//,30X,"LINEA SIMETRICAMENTE TRANSPUESTA",//)
C295 600 FORMAT(//,20X,"MATRIZ DE IMPEDANCIAS DE LA LINEA (MHMS)",//)
C296 650 FOPRAT(//,20X,"MATRIZ DE ADMITANCIAS DE LA LINEA (MICROHMS)",//)
C297 700 END
C298 SUBROUTINE TRANS(Z,M,NMS,NS)

```

```

0299      CGMPLEX Z(1,1)
0300      I=N-1
0301      KI=N+MS
0302      DO 150 I=1,N
0303      DO 200 J=K,KI
0304      DO 200 IJ=1,NMS
0305              Z(I,J)=Z(I,J)-Z(I,IJ)
0306 200      CONTINUE
0307      K=I+MS
0308      KI=I+MS
0309 150      CONTINUE
0310      K=N+1
0311      KI=N+MS
0312      DO 300 I=1,N
0313      DO 350 J=K,KI
0314      DO 350 IJ=1,NMS
0315              Z(IJ,J)=Z(IJ,J)-Z(IJ,I)
0316 350      CONTINUE
0317      K=K+MS
0318      KI=KI+MS
0319 300      CONTINUE
0320      RETURN
0321      END
0322      SUBROUTINE DIAG(Z,H,MSH)
0323      COMPLEX Z(1,1)
0324      K = MSH
0325      5  IF(K.LE.N)GO TO 40
0326      DO 10 I=1,K
0327              Z(K,I)=Z(K,I)/Z(K,K)
0328 10      CONTINUE
0329      KI = K
0330 15  IF(KI.LE.1)GO TO 30
0331      KI = KI - 1
0332      DO 20 J=1,K
0333              Z(KI,J)=Z(KI,J)-Z(K,J)+Z(KI,K)
0334 20      CONTINUE
0335      GO TO 15
0336 30  K = K - 1
0337      GO TO 5
0338 40  CONTINUE
0339      RETURN
0340      END
0341      SUBROUTINE TRASP(F1,F2,F3,Z,H)
0342      COMPLEX Z(3,3),ZS1,ZS2,ZS3,ZK1,ZK2,ZK3
0343      ZS1=F1+Z(1,1)+F2+Z(2,2)+F3+Z(3,3)
0344      ZS2=F1+Z(2,2)+F2+Z(3,3)+F3+Z(1,1)
0345      ZS3=F1+Z(3,3)+F2+Z(1,1)+F3+Z(2,2)
0346      ZK1=F1+Z(1,2)+F2+Z(2,3)+F3+Z(1,3)
0347      ZK2=F1+Z(1,3)+F2+Z(1,2)+F3+Z(2,3)
0348      ZK3=F1+Z(2,3)+F2+Z(1,3)+F3+Z(1,2)
0349      Z(1,1)=ZS1
0350      Z(1,2)=ZK1
0351      Z(1,3)=ZK2
0352      Z(2,1)=ZK1
0353      Z(2,2)=ZS2
0354      Z(2,3)=ZK3
0355      Z(3,1)=ZK2
0356      Z(3,2)=ZK3
0357      Z(3,3)=ZS3
0358      RETURN

```

```

0359      END
0360      SUBROUTINE INVER(A, AI, M)
0361      DIMENSION A(3,3), AI(3,3)
0362      DO 10 J=1, M
0363      DO 10 K=1, M
0364      IF (J-I) > 1, 2, 1
0365      1 AI(J, I) = 0.0
0366      GO TO 10
0367      2 AI(J, I) = 1.0
0368      10 CONTINUE
0369      DO 30 I=1, M
0370      14 T = A(I, I)
0371      DO 15 K=1, M
0372      A(I, K) = A(I, K) / T
0373      15 AI(I, K) = AI(I, K) / T
0374      DO 25 J=1, M
0375      IF (J-I) 17, 25, 17
0376      17 T = A(I, J)
0377      DO 20 K=1, M
0378      A(J, K) = A(J, K) - A(I, K) * T
0379      20 AI(J, K) = AI(J, K) - AI(I, K) * T
0380      25 CONTINUE
0381      30 CONTINUE
0382      RETURN
0383      END
0384 *

```

PMG DE LOS CONDUCTORES	.04157	PIES	
PMGDE LOS HILOS DE GUARDA	.02330	PIES	
RADIO EXTERIOR DE LOS CONDUCTORES	.05246	PIES	
RADIO EXTERIOR DE LOS HILOS DE GUARDA	.03125	PIES	97
RESISTENCIA DE LA TIERRA	100.00000	OHMS-M	
RESISTENCIA DE LOS CONDUCTORES	.03260	OHMS/MILLA	
RESISTENCIA DE LOS HILOS DE GUARDA	6.30000	OHMS/MILLA	
FRECUENCIA DE TRANSMISION	60.00000	CICLOS/SEG	
LONGITUD DE LA LINEA	135.10001	MILLAS	

COORDENADAS DE LOS CONDUCTORES (FASES, SUBCOND., HILOS DE GUARDA)

X	Y
.00	90.00
35.00	90.00
70.00	90.00
1.50	90.00
36.50	90.00
71.50	90.00
10.25	112.00
53.25	112.00

CORRECCION DE CARSON 0

LINEA SIMETRICAMENTE TRANSPUESTA

MATRIZ DE IMPEDANCIAS DE LA LINEA (OHMS)

40.71084	210.99173	31.53570	88.52281	31.53570	88.5229
31.53570	88.52281	40.71083	210.99173	31.53570	88.5228
31.53570	88.52281	31.53570	88.52281	40.71084	210.9917

MATRIZ DE ADMITANCIAS DE LA LINEA (MICROMHS)

.00000	1167.08276	.00000	-153.10310	.00000	-153.1051
.00000	-153.10513	.00000	1167.08252	.00000	-153.1050
.00000	-153.10510	.00000	-153.10507	.00000	1167.0825

RESUMEN.

En el presente trabajo se analiza la compensación serie y paralelo para obtener mayor capacidad de transmisión de energía por las líneas de transmisión, y por consiguiente un mejor aprovechamiento del derecho de vía.

Se presenta un método para obtener tanto el valor como la ubicación de los elementos de compensación de una manera rápida y confiable, conociendo los mínimos parámetros de un sistema eléctrico de potencia.

Los resultados obtenidos se presentan de una manera gráfica, para un rápido análisis de los mismos.

A P E N D I C E B

PROGRAMA DE COMPUTADORA DIGITAL PARA CALCULAR LA —
COMPENSACION DE LINEAS DE TRANSMISION.

DESCRIPCION DEL PROGRAMA

El programa calcula los valores de los elementos de las estaciones de compensación (XCS, XLPE, XLPH), así como el de la compensación el punto de recepción. Determina el número mínimo de estaciones y también su ubicación (de una manera simétrica).

Las ecuaciones programadas son las descritas en el — desarrollo del método. (Cap. IV)

Finalmente calcula los voltajes en las terminales de los capacitores serie y en el punto de envío. Estos cálculos los efectúa en base a modelos de circuitos "Pi", — tanto de las secciones de línea como de las estaciones de compensación, de tal forma que analiza circuitos "Pi" en cascada.

FORMA DE ALIMENTAR LOS DATOS

- 1.- Lee los datos en 4 instrucciones de lectura (READ'S) a formato libre.
- 2.- Cada READ debe contener lo siguiente

(COLCADO EN ESE ORDEN)

- ES, XS, GP, BP
- P, ANFP, VR
- LOET
- E, ANTRA

(LA DEFINICION DE LAS VARIABLES SE ENCUENTRA AL PRINCIPIO DEL PROGRAMA).

NOTAS

Iguals a las tres primeras del programa del apéndice A.

SIB29 T=0000 IS DN CR00015 USING 00024 BLKS R=0000

```

0001 FTM4.L
0002 ***** PROGRAM SIB29 *****
0003 C
0004 C
0005 C * PROGRAMA PARA CALCULAR EL GRADO DE COMPENSACION SERIE
0006 C * Y PARALELO DE UNA LINEA DE TRANSMISION
0007 C
0008 C *****
0009 C
0010 C
0011 C
0012 C
0013 C      RG = RESISTENCIA SERIE DE LA LINEA (OHMS/KM)
0014 C      XS = REACTANCIA SERIE DE LA LINEA (OHMS/KM)
0015 C      CP = CONDUCTANCIA PARALELO DE LA LINEA (MHOS/KM)
0016 C      BP = SUCCEPTANCIA PARALELO DE LA LINEA (MHOS/KM)
0017 C      P = POTENCIA REAL DE CARGA (MW)
0018 C      ANFP = ANGULO DEL FACTOR DE POTENCIA DE LA CARGA (GRADOS)
0019 C      VR = VOLTAJE NOMINAL (KV)
0020 C      LONT = LONGITUD TOTAL DE LA LINEA (KM)
0021 C      E = RAZON MAX. DE VOLTAJES EN LA LINEA
0022 C      ANTRA = ANGULO MAX. DE TRANSMISION (GRADOS)
0023 C      K = GRADO DE COMPENSACION SERIE
0024 C      HESGO = NUMERO DE ESTACIONES DE COMPENSACION
0025 C      LONGE = LONGITUD DE CADA SECCION DE LINEA (KM)
0026 C      XCS = REACTANCIA DE LOS CAPACITORES SERIE
0027 C           EN CADA ESTACION DE COMPENSACION
0028 C      XLPE = REACTANCIA DE LA RAMA IZQUIERDA DE LA
0029 C           ESTACION DE COMPENSACION
0030 C      XLPP = REACTANCIA DE LA RAMA DERECHA DE LA
0031 C           ESTACION DE COMPENSACION
0032 C      QCST = POTENCIA REACTIVA TOTAL DE LOS CAPACITORES SERIE
0033 C      QCPT = POTENCIA REACTIVA TOTAL DE LA COMPENSACION PARALELO
0034 C      QK = POTENCIA REACTIVA DE LA COMPENSACION
0035 C           EN EL PUNTO DE RECEPCION
0036 C      DIMENSION VSM(10), ANVS(10), ANIS(10), IP(5)
0037 C      REAL LONT, K, LONGE, ISN(10)
0038 C      COMPLEX S, VR, CIR, VS(10), CIS(10), Z, Y, A, B, C, D, AP, BPP, CP, DP,
0039 C      EQUIVALENCE (IP, LI), (IP(2), LO)
0040 C      CALL RMPAR(IP)
0041 C
0042 C      LECTURA DE DATOS
0043 C      WRITE(LI, 10)
0044 C      FORMAT(3X, "DAME RESISTENCIA, X, G, SUSEPTANCIA")
0045 C      READ(LI, *) PS, XS, CP, BP
0046 C      WRITE(LI, 20)
0047 C      FORMAT(4X, "DAME P, ANG. DE FP Y VR")
0048 C      READ(LI, *) P, ANFP, VR
0049 C      WRITE(LI, 30)
0050 C      FORMAT(3X, "DAME LA LONGITUD DE LA LINEA")
0051 C      READ(LI, *) LONT
0052 C      WRITE(LI, 40)
0053 C      FORMAT(2X, "DAME E Y EL ANG. DE TRANSMISION")
0054 C      READ(LI, *) E, ANTRA
0055 C      WRITE(LO, 100)
0056 C      WRITE(LO, 200) RS, XS, BP
0057 C      WRITE(LO, 210) LONT
0058 C      VFI=CWBSI.VP

```

```

0059      VPITE=LO,220)P,ANFP,VRI
0060      WFITE=LO,11V
0061      WPITE=LO,230)E,ANTRA
0062      C
0063      C      INICIO DEL CALCULO
0064      C
0065      C      APLICACION DEL METODO PARA CALCULAR EL GRADO DE COMPENSA
0066      C      CION Y EL NUMERO DE ESTACIONES DE COMPENSACION
0067      C
0068      C      CALL CORPE(LONT,RS,XS,OP,VRI,P,ANFP,E,ANTRA,X,NESCO,LONSE
0069      C      I,XCS,OCST,OCPT,XLPP,XLPE,OX)
0070      C
0071      C      WRITE(LO,120)
0072      C      WFITE=LO,240)X,NESCO,LONSE
0073      C      WPITE=LO,130)
0074      C      WFITE=LO,250)XCS,XLPE,XLPR
0075      C      WFITE=LO,270)OCST
0076      C      WRITE(LO,280)OCPT
0077      C      WRITE(LO,260)OX
0078      C
0079      C      CALCULA LA CORRIENTE EN EL PUNTO DE RECEPCION Y TRANSFER
0080      C      NA LAS CANTIDADES PA RA MAHEJRALAS POR FASE
0081      C
0082      C      PI=4.0*ATAN(1.0)
0083      C      Q=P*TAN(ANFP*PI/180)
0084      C      QT=Q*OX
0085      C      S=CMPLX(P,QT)
0086      C      S=S/3.0
0087      C      VP=VP*SQRT(3.0)
0088      C      CIR=CONJG(S/VRI)
0089      C
0090      C      CALCULA LOS PARAMETROS DE LA LINEA EN LAS SECCIONES
0091      C
0092      C      Z=CMPLX(RS,XS)
0093      C      Y=CMPLX(OP,BP)
0094      C      Z=Z+LONSE
0095      C      Y=Y+LONSE
0096      C
0097      C      CALCULA LAS CONSTANTES A,B,C,D, DEL CIRCUITO PI DE LAS
0098      C      SECCIONES DE LA LINEA Y AP,BBP,CP,DP,DF, DE LAS ESTACIONES
0099      C      DE COMPENSACION
0100      C      BPR=1.0/XLPP
0101      C      BPE=1.0/XLPE
0102      C      CALL HBCD(Z,Y,XCS,BPR,BPE,A,B,C,D,AP,BBP,CP,DP)
0103      C
0104      C      CALCULA LOS VOLTAJES Y LAS CORRIENTES ANTES Y DESPUES
0105      C      DE LAS ESTACIONES DE COMPENSACION
0106      C      VS(1)=VR
0107      C      CIS(1)=CIR
0108      C      NN=2+NESCO
0109      C      DO 50 I=2,NN+2,2
0110      C      CALL CIRPI(A,B,C,D,VS(I-1),CIS(I-1),VS(I),CIS(I))
0111      C      IF(1.GT.NN) GO TO 60
0112      C      CALL CIRPI(AP,BBP,CP,DP,VS(I),CIS(I),VS(I+1),CIS(I+1))
0113      C      CONTINUE
0114      C      DO 70 I=1,NN+2
0115      C      VSXX=CMBS(VS(I))
0116      C      VYY=AIMAG(VS(I))
0117      C      XYY=REAL(VS(I))
0118      C      YYY=VY*XXX

```

```

0113 VSAXX=ATAN(YXX)
0120 VSAHX=VSAXX*180./PI
0121 VSM(I)=CMPLX(VSMX,VSAHX)
0122 70 CONTINUE
0123 WRITE(LO,140)
0124 WRITE(LO,145)
0125 140 FORMAT(5X,'VOLT. EN LAS TERMINALES DE LOS CAP SERIE',/)
0126 145 FORMAT(7X,'FORMA RECTANGULAR',18X,'FORMA POLAR',/)
0127 WRITE(LO,300)(VSC(I),VSM(I),I=1,NM*2)
0128 100 FORMAT(30X,'DATOS GENERALES',/)
0129 110 FORMAT(30X,'RESTRICCIONES',/)
0130 120 FORMAT(//,30X,'RESULTADOS',/)
0131 130 FORMAT(10X,'PARAMETROS DE LAS EST. DE COMP.',/)
0132 200 FORMAT(20X,'DATOS DE LA LINEA',//,5X,'RESISTENCIA SERIE',
0133 112X,F10.5,5X,'OHMS/KM',/,5X,'REACTANCIA SERIE',14X,F10.5,
0134 25X,'OHMS/KM',/,5X,'SUCEPTANCIA PARALELO',10X,F10.5,5X,
0135 37X,'MVA')
0136 210 FORMAT(5X,'LONGITUD DE LA LINEA',10X,F10.5,5X,'KM',/)
0137 220 FORMAT(5X,'POTENCIA DE CARGA',13X,F10.5,5X,'MW',/,
0138 15X,'ANGULO DE FACTOR DE POTENCIA',2X,F10.5,5X,'GRADOS',/,
0139 25X,'VOLTAJE NOMINAL',15X,F10.5,5X,'KV',/)
0140 230 FORMAT(7,5X,'RAZON DE VOLTAJES MAX. EN LOS CAP SERIE'
0141 1,5X,FS.2,/,5X,'ANGULO MAX. DE TRANSMISION',14X,FS.2,
0142 25X,'GRADOS',/)
0143 240 FORMAT(10X,'GRADO DE COMPENSACION SERIE',13X,FS.3,/,
0144 110X,'NUM. DE ESTACIONES DE COMPENSACION',9X,I2,/,
0145 210X,'LONGITUD DE CADA SECCION DE LINEA',5X,FS.2,/)
0146 250 FORMAT(10X,'REACTANCIA CAP.',26X,F10.5,3X,'OHMS',
0147 1/,10X,'REAC. IND. IZQUIERDA',21X,F10.5,3X,'OHMS',
0148 2/,10X,'REAC. IND. DERECHA',21X,F10.5,3X,'OHMS',/)
0149 260 FORMAT(10X,'REACTIVOS A INT. EN RECEPCION',12X,F10.5,
0150 13X,'MVAR',/)
0151 270 FORMAT(10X,'REACTIVOS DE LOS CAP SERIE',14X,F10.5,
0152 23X,'MVAR',/)
0153 280 FORMAT(10X,'REACTIVOS DE LOS FACTORES PARALELO',
0154 16X,F10.5,3X,'MVAR')
0155 300 FORMAT(4X,F10.5,2X,F10.5,10X,F10.5,2X,F10.5)
0156 END
0157 SUBROUTINE COMPE(LONT,RS,XS,BP,VNOM,P,AMFP,E,ANTRA,K,
0158 1 NESCO,LONSE,KCSGE,QCST,QCTL,XLPP,XLPE,QK)
0159 PE=L LONT./JX./JY./K./LONSE
0160 PI=4.0/ATAN(1.0)
0161 FCCR=180./PI
0162 PST=PS=LONT
0163 XST=XS=LONT
0164 BFT=BF=LONT
0165 VFASE=VNOM/SQRT(3.0)
0166 Q=P/TAN(CANFP/FCCR)
0167 JY=P/1000.0/(SQRT(3.0)*VNOM)
0168 JX=VFASE/XST/1000.0
0169 QY=3.0*JY*VFASE/1000.0
0170 VY=E*SIN(ANTRA/FCCR)
0171 VY=1.0 - E*COS(ANTRA/FCCR)
0172 RAFX=PST/XST
0173 KAL=JY/JX
0174 PAFK=(P/RFX + PAF*VY
0175 E=1.0 - (VY*VNOM*2)/(P*XST)
0176 ESCO=(2/1.0 - X
0177 NESCO=INT(ESCO)
0178 NESCO=ESCO + 1

```

```

0179      LOUSE=LOHT/(HESCO+1)
0180      MCEC=E*HON
0181      XCSSE=NSTA*(HESCO
0182      OCTL=2.0*(X**2+Y**2)+XCSSE-1.0E-10
0183      QTL=HON**2-BST
0184      QLT=OCTL/(2.0*(HESCO+1))
0185      QCS=QTL*Q
0186      QCPA=QLT+QTRA
0187      NLPP=HON**2/QLPA
0188      QLPE=QLT-QTRA
0189      XLPE=HON**2/QLPE
0190      QY=ABS(OLT) - P*(RARK)*TAN(HFP/FCR)
0191      QCS7=HESCO*QCSSE
0192      FFCR=3.0*(X**2+Y**2)*PST
0193      RETURN
0194      END
0195      SUBROUTINE ABCD(Z,Y,XFS,EPF,BPE,A,B,C,D,AP,BP,CP,DP)
0196      COMPLEX Z,Y,ZP,YPR,YPE,A,B,C,D,AP,BP,CP,DP
0197      ZP=CNPLX(0.0,-XFS)
0198      YP=CNPLX(0.0,-BPE)
0199      YPE=CNPLX(0.0,-BPE)
0200      A=Z*Y/2.0 + 1.0
0201      B=A
0202      C=Y*(1.0 + Z*Y/4.0)
0203      D=A
0204      AP=1.0 + ZP*YPR
0205      BP=ZP
0206      CP=YPE + YPR + YPE*ZP*YPP
0207      DP=1.0 + YPE*ZP
0208      RETURN
0209      END
0210      SUBROUTINE CIPP(A,B,C,D,VR,CIR,VS,CIS)
0211      COMPLEX A,B,C,D,VR,CIR,VS,CIS
0212      VS=VR + B*CIR
0213      CIS=C*VR + D*CIR
0214      RETURN
0215      END
0216

```

DATOS GENERALES

DATOS DE LA LINEA

RESISTENCIA SERIE	02724	OHMS/KM
REACTANCIA SERIE	37005	OHMS/KM
SUCEPTANCIA PARALELO	42042E-05	MHOS/KM
LONGITUD DE LA LINEA	314 00000	KM
POTENCIA DE CARGA	1000.00000	MW
ANGULO DE FACTOR DE POTENCIA	25 00000	GRADOS
VOLTAJE NOMINAL	400.00000	KV

RESTRICCIONES

RAZON DE VOLTAJES MAX EN LOS CAP. SERIE	1.05
ANGULO MAX. DE TRANSMISION	25.00 GRADOS

RESULTADOS

GRADO DE COMPENSACION SERIE	.420
NUN. DE ESTACIONES DE COMPENSACION	1
LONGITUD DE CADA SECCION DE LINEA	157.0

PARAMETROS DE LAS EST. DE COMP.

REACTANCIA CAP.	51.47583	OHMS
REAC. IND IZQUIERDA	-1874.4421	OHMS
REAC IND DERECHA	837.83369	OHMS
REACTIVOS DE LOS CAP. SERIE	-321.72400	MVAR
REACTIVOS DE LOS REACTORES PARALELO	-211.21899	MVAR
REACTIVOS A 147 EN EXCEPCION	-551.66626	MVAR

VOLT. EN LAS TERMINALES DE LOS CAP SER.

FORMA RECTANGULAR		FORMA POLAR	
220.82000	00000	220.82000	225.35397
89.14700	242.40408	225.60229	11.01609
225.67207	220.31335	104.48065	243.83231

BIBLIOGRAFIA

- 1.- EHV Transmission Line Reference Book
Projet EHV General Electric Company-
Edinon Electric Institute 1968
- 2.- Analysis of Faulted Power Systems
Paul Anderson
IOWA State University Press. 1973
- 3.- Electromagnetic and Electrostatic Transmission
Line Parameters by Computer Digital.
M.H. Hesse
IEEE Trans. PAS-82 June-1963
- 4.- Electric Energy System Theory: An Introduction
Olle I. Elgerd
Mc. Graw Hill 1971
- 5.- Electric Power Transmission
J. Zaborszky and J. Rittenhouse
The Rensselaer Bookstore Troy, N.Y.
- 6.- Elements of Power System Analysis
W.D. Stevenson
Mc. Graw Hill
- 7.- Development of Equivalent Pi and T matrix circuits
for long Untransposed Transmission Lines.
W.I. Bowman and J.M. Mc. Namee
PAS-IEEE Jun./1964
- 8.- Application of matrix methods to the solution
of travelling-wave phenomena in polyphase systems
L.M. Wedepohl
Proc. IEEE Vol. 110 N°. 12 Dec.- 1963

- 9.- Series Capacitors for transmission Circuits
E.C. Starr and R.D. Evans
AIEE May/1942
- 10.- The use of series capacitors to obtain maximum
EHV Transmission Capability
G.D. Drewer, H.W. Rustebakke, F.A. Gibley,
- 11.- Some considerations on series and shunt compen-
sation in Extra High Voltage Transmission Lines
Z. Kicinaki and A. Ostromecki
SEPE S.A. Argentina (CIGRE)
- 12.- Series capacitor installations in the B.C.
Hydro 500 KV system
J.L. Batho, J.E. Hardy and N. Tolmunen
IEEE PAS Jan/1977
- 13.- 500 KV Series capacitor installations in Ca-
lifornia.
J.A. Mameatis, W.N. Rothenbuhler
IEEE PAS May/1970.
- 14.- The first 275 KV series capacitor application
in Japan its installation and field tests.
Tsunchisa Fujita, Taunero Ushio
IEEE PES Jul/1975
- 15.- Series capacitors in power systems.
G. Jancke, E. Fahlen and O. Nerf
IEEE PES Feb/1974
- 16.- Power System Analysis
Charles A. Gross
John Wiley Sons, Inc. 1979
- 17.- Circuit Analysis of A.C. Power Systems Vol. I
Edith Clarke
General Electric Company.

- 18.- Aplicación de compensadores reactivos estáticos conectados en derivación conjuntamente con capacitores conectados en serie a la línea para incrementar la capacidad de transmisión de las líneas en C.A.
H.L. Thanawala, W.O. Kelham, W.P. Williams.
División de Transmisión de Potencia, GEC Switchgear Limited Stafford (Reino Unido).
- 19.- Application of series capacitors and protection of associated transmission lines.
M. Chama and H. Schilde
ELECTRA
- 20.- The prediction and control of self-Excited oscillations due to series capacitors in power systems.
L.A. Kilgore, L.C. Elliott and E.R. Taylor Jr.
IEEE Pas-90 N°. 3 May/June 1971.
- 21.- Experience with 500 KV subsynchronous resonance and resulting turbine generator shaft damage at Mohave Generating Station.
M.C. Holl
Subsynchronous Resonance Symposium
IEEE P E S July/1975
- 22.- Analysis and Control of Subsynchronous Resonance Winter Meeting and Telsa Symposium
IEEE PES 1976.