

TRANSITORIOS EN LINEAS DE TRANSMISION

CRUZ HENRY, y
GAVIDIA CARLOS

ORBE PATRICIO

R E S U M E N

El desarrollo de los sistemas de potencia tanto en tamaño como en complejidad impone la necesidad de despejar las fallas en el menor tiempo posible y que el diseño del aislamiento dependa de los transitorios producidos por maniobra y por falla.

En el presente estudio se obtienen las formas de onda de voltaje y corriente y sus respectivos espectros de frecuencia inmediatamente después de la iniciación del transitorio en la línea de transmisión.

Debido a la complejidad de las soluciones analíticas se han utilizado soluciones aplicables al computador digital, así como al modelo analógico.

Como modelo digital se utiliza una línea de transmisión trifásica y transpuesta, se incluye su naturaleza distribuida y se consideran los parámetros R, L y C invariantes con la frecuencia, el sistema es de doble fuente terminal, sus impedancias internas se representan con parámetros inductivos concentrados.

El modelo analógico representa una línea de transmisión trifásica, consta de dos secciones de circuitos equivalentes π que representa 100 Km de línea, cada uno y una sección π que representa 200 Km de línea, para las pruebas las etapas se conectan en serie. La línea de transmisión trabaja en vacío y se alimenta desde una barra infinita.

Se realizan los siguientes estudios de simulación:

- a) Energización de la línea: Se realiza el cierre de las fases en forma simultánea y no simultánea.
- b) Fallas en la línea: Se simulan fallas sólidas de cualquier tipo.
- c) Energización de la línea en condiciones de falla: Se realiza el cierre de las fases en forma simultánea y no simultánea, en una línea en

condiciones de falla.

S I M B O L O G I A

A_1, B_1, C_1, D_1	= Matrices que definen la sección de línea antes del punto de falla.
A_2, B_2, C_2, D_2	= Matrices que definen la sección de línea después del punto de falla.
A_f, B_f, C_f, D_f	= Matrices que definen la discontinuidad producida por la falla.
a'	= Frecuencia real.
E_{ff}	= Transformada de voltaje de la fuente de superposición.
$F(n)$	= Coeficientes complejos en las series de Fourier.
f_0	= Frecuencia nominal del sistema en Hertz.
$f(\omega)$	= Transformada de Fourier de $f(t)$.
$f(\omega - ja')$	= Transformada modificada de Fourier de $f(t)$.
$h(t)$	= Función paso unitaria.
\bar{I}^c, \bar{V}^c	= Transformadas de corrientes y voltajes modales.
\bar{I}^f, \bar{V}^f	= Transformadas de corrientes y voltajes de fase.
\bar{I}_{ff}	= Transformada de corriente de falla.
$\bar{I}_{Rf}, \bar{V}_{Rf}$	= Transformadas de corrientes y voltajes de superposición en el extremo receptor.
$\bar{I}_{Sf}, \bar{V}_{Sf}$	= Transformadas de corrientes y

	voltajes de superposición en el extremo transmisor.
I_{SS}, V_{SS}	= Transformadas de corrientes y voltajes de prefalla en el extremo transmisor.
L	= Longitud de la línea.
$P(\omega - ja')$	= parte real de $f(\omega - ja')$
Q, S	= Matrices de vectores característicos de corriente y voltaje.
s	= Frecuencia compleja.
\bar{V}_{fs}	= Transformada del voltaje de prefalla en el punto de falla.
\bar{V}_R, \bar{V}_S	= Transformadas de los voltajes en los extremos receptor y transmisor.
X	= distancia desde el punto de falla al extremo transmisor.
Y^f, Z^f	= Matrices de admitancia shunt e impedancia serie por unidad de longitud en componentes de fase.
Y_0, Y_1, Y_2	= Admitancias shunt de secuencias cero, positiva y negativa por unidad de longitud.
Z_0	= Matriz de impedancia característica en componentes simétricas.
Z_R, Z_S	= Impedancias internas de las fuentes colocadas en los extremos receptor y transmisor.
Z_0, Z_1, Z_2	= Impedancias serie de secuencias cero, positiva y negativa por unidad de longitud.
Z_{th0}, Z_{th1}	= Impedancias Thevenin vistas del punto de falla de secuencias cero y positiva.
γ	= Matriz diagonal de constantes de propagación.
σ	= Factor sigma.

$\phi(n)$	= Angulo de fase de las series de Fourier.
Ω	= Frecuencia angular de truncamiento.
ω	= Frecuencia angular.
ω_0	= Frecuencia angular nominal del sistema.

I N T R O D U C C I O N

Ultimamente, la ingeniería de sistemas de potencia ha dedicado un gran esfuerzo a la búsqueda de respuestas más rápidas del sistema de protección, en consecuencia las formas de onda de voltajes y corrientes transitorios causados por maniobra y por falla han cobrado importancia.

En las referencias 1 y 2 se describe el uso de computadoras digitales para la simulación dinámica de la protección utilizando un modelo de sistema de potencia simple, en el primer estudio se representa a la línea como una combinación de una resistencia e inductancia en serie y el segundo estudio se extiende a tomar en cuenta la naturaleza distribuida de los parámetros.

En la referencia 3 se estudian los sobrevoltajes de maniobra utilizando como método de solución la transformada modificada inversa de Fourier, considera los parámetros R, L y C de la línea en forma invariante con la frecuencia.

En la referencia 4 se presenta los resultados en el T.N.A. de un estudio de los sobrevoltajes transitorios causados únicamente por cortocircuitos monofásicos en una línea de transmisión.

En la parte digital se utiliza la transformada modificada inversa de Fourier como método de solución del fenómeno transitorio, debido a que permite la evaluación del problema a través de una amplia variación de frecuencias.

El modelo analógico es otro de los métodos usados para la investigación de estos fenómenos y es sumamente útil cuando se trata de analizar líneas de considerable longitud o sistemas complejos de transmisión.

Para la obtención del espectro de frecuencias de los voltajes y corrientes transitorios se utiliza la transformada rápida directa de Fourier.

1.- MODELO DE UNA LINEA EN ESTADO TRANSITORIO

1.1. RELACIONES FUNDAMENTALES

Una sección de línea multiconductor puede ser definida por su matriz impedancia serie por unidad de longitud Z^f y por su matriz admitancia shunt por unidad de longitud Y^f .

Las ecuaciones diferenciales de voltaje y corriente del sistema en estado estático son:

$$\frac{\partial^2 \bar{V}^f}{\partial X^2} = Z^f Y^f \bar{V}^f \quad \frac{\partial^2 \bar{I}^f}{\partial X^2} = Y^f Z^f \bar{I}^f \quad (1)$$

La teoría de los modos naturales de propagación permite desacoplar las ecuaciones anteriores

$$\frac{\partial^2 \bar{V}^C}{\partial X^2} = S^{-1} Z^f Y^f S \bar{V}^C \quad \frac{\partial^2 \bar{I}^C}{\partial X^2} = Q^{-1} Y^f Z^f Q \bar{I}^C \quad (2)$$

Un caso particular dentro del análisis modal constituye el sistema de componentes simétricas aplicable a líneas trifásicas transpuestas, en donde se tiene las siguientes definiciones de matriz de constantes de propagación y matriz de impedancia característica.

$$\gamma = \begin{vmatrix} \sqrt{z_0} \cdot y_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{z_1} \cdot y_1 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{z_2} \cdot y_2 \end{vmatrix} \quad (3)$$

$$Z_0 = \begin{vmatrix} \sqrt{z_0} / y_0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{z_1} / y_1 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{z_2} / y_2 \end{vmatrix} \quad (4)$$

1.2. FUNCIONES DE TRANSFERENCIA

Una línea de transmisión fallosa básicamente es una red de secciones en cascada, las matrices de transferencia representan la discontinuidad producida por la falla y las secciones de línea ubicadas

entre la falla y las barras extremas (Fig. 1).

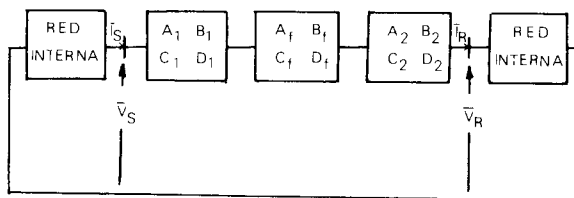


Fig. 1. Modelo de la línea en estado transitorio

En base a la Fig. 1 se puede derivar la siguiente expresión:

$$\begin{vmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_f & B_f \\ C_f & D_f \end{vmatrix} \begin{vmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{vmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= \text{Cos h}(\gamma X) \\ B_1 &= \text{Sen h}(\gamma X) \cdot Z \\ C_1 &= Z_0^{-1} \cdot \text{Sen h}(\gamma X) \\ D_1 &= \text{Cos h}(\gamma X) \end{aligned} \quad (6)$$

Las submatrices que definen la matriz de transferencia que representa la sección de línea después del punto de falla se encuentran por sustitución de la longitud $(L-X)$, y la matriz que define la discontinuidad originada por la falla se formula de acuerdo al tipo de falla simulada.

1.3. PRINCIPIO DE SUPERPOSICION

Al usar la técnica de inversión, que permite pasar desde el dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, el punto crítico del proceso es tener condiciones iniciales diferentes de cero. Este problema se elimina cuando se aplica el principio de superposición al ocurrir una falla en la línea.

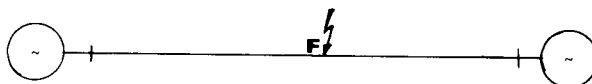


Fig. 2. Diagrama Unifilar

Considerando el sistema de la Fig. 2, en estado estático antes de ocurrir la falla, las fuentes originales actúan provocando un voltaje sinusoidal de prefalla, V_{fS} , en el punto F (Fig. 3)

$$V_{fS}(t) = V_{fS} \cdot \text{Sen}(\omega_0 t + \beta)$$

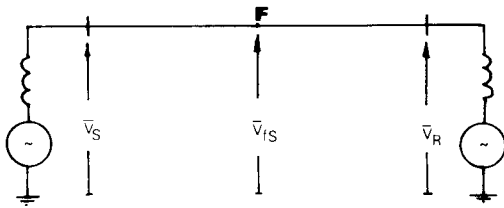


Fig. 3. Circuito con fuentes originales

Al ocurrir la falla en el punto F para $t \geq 0$, se cortocircuitan las fuentes originales y actúa una fuente de voltaje ficticia aplicada al punto de falla, de igual magnitud y signo contrario al voltaje de prefalla (Fig. 4).

$$E_{ff}(t) = -V_{fS} \text{ Sen } (\omega_0 t + \beta) h(t)$$

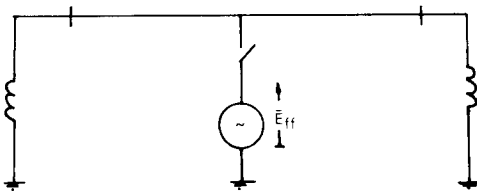


Fig. 4. Circuito con fuente ficticia

Para $t \geq 0$, los voltajes trifásicos de las fuentes en función del tiempo son los siguientes:

$$\begin{aligned} E_{ffa}(t) &= -V_{fS} \text{ Sen } (\omega_0 t + \beta) \\ E_{ffb}(t) &= -V_{fS} \text{ Sen } (\omega_0 t + \beta - 120^\circ) \\ E_{ffc}(t) &= -V_{fS} \text{ Sen } (\omega_0 t + \beta + 120^\circ) \end{aligned} \quad (7)$$

Si a las ecuaciones anteriores se les aplica la transformada directa se obtienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} E_{ffa}(s) &= -V_{fS} \frac{(\omega_0 \cdot \text{Cos } \beta + s \cdot \text{Sen } \beta)}{s^2 + \omega_0^2} \\ E_{ffb}(s) &= -V_{fS} \frac{(\omega_0 \cdot \text{Cos}(\beta - 120^\circ) + s \cdot \text{Sen}(\beta - 120^\circ))}{s^2 + \omega_0^2} \\ E_{ffc}(s) &= -V_{fS} \frac{(\omega_0 \cdot \text{Cos}(\beta + 120^\circ) + s \cdot \text{Sen}(\beta + 120^\circ))}{s^2 + \omega_0^2} \end{aligned}$$

$s = j\omega$ en la transformada de Fourier

$s = a' + j\omega$ en la transformada modificada de Fourier.

Las fuentes originales actúan en forma permanente (Fig. 3), mientras que la fuente ficticia actúa desde el instante de ocurrencia de la falla (Fig. 4).

La superposición de las dos soluciones anteriores permite la solución del fenómeno transitorio.

1.4. ESTADO ESTÁTICO

El vector voltaje V_{fS} se evalúa en base al conocimiento de los voltajes de prefalla de las barras terminales.

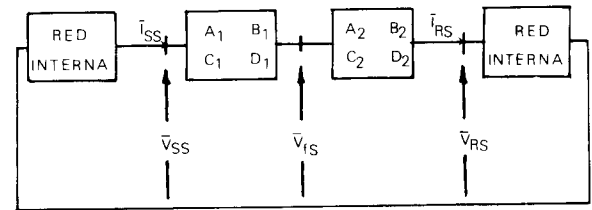


Fig. 5. Esquema de una línea de doble terminal

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{SS} \\ \bar{I}_{SS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{RS} \\ \bar{I}_{RS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{RS} \\ \bar{I}_{RS} \end{bmatrix} \quad (9)$$

La corriente en el extremo transmisor antes de la falla está dada por:

$$\bar{I}_{SS} = (C - D B^{-1} A) \bar{V}_{RS} + D B^{-1} \bar{V}_{SS} \quad (10)$$

y el voltaje de prefalla en el punto de falla

$$\bar{V}_{fS} = (A_2 - B_2 B^{-1} A) \bar{V}_{RS} + B_2 B^{-1} \bar{V}_{SS} \quad (11)$$

Debido a que se tiene un sistema balanceado las ecuaciones de estado estático se evalúan a la frecuencia nominal y únicamente para secuencia positiva.

Los vectores de voltaje y corriente considerados - en forma fasorial se convierten directamente al dominio del tiempo sin utilizar la transformación inversa de Fourier (integral).

1.5. ESTADO FALLOSO

De igual manera que en el estado estático se utiliza componentes simétricas para obtener redes desacopladas e independientes, en último término los valores de voltaje y corriente son transformados a componentes de fase.

A continuación se presenta como ejemplo las ecuaciones para la falla monofásica, las ecuaciones para los otros tipos de falla se pueden hallar

siguiendo un procedimiento similar.

1.5.1. FALLA MONOFASICA

Falla en la fase 'a'

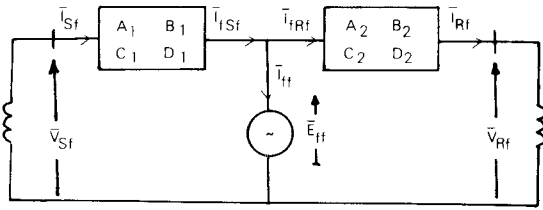


Fig. 6. Esquema de la línea con los valores de su perposición.

Condiciones de borde:

$$\bar{I}_{ffb} = 0 \quad (i)$$

$$\bar{I}_{ffc} = 0 \quad (ii)$$

$$\bar{V}_{ffa} = \bar{I}_{ffa} \quad (iii)$$

$$\begin{vmatrix} \bar{I}_{ff0} \\ \bar{I}_{ff1} \\ \bar{I}_{ff2} \end{vmatrix} = \frac{1}{3} \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \bar{I}_{ffa} \\ \bar{I}_{ffb} \\ \bar{I}_{ffc} \end{vmatrix} \quad (12)$$

Si a la expresión 12 se le aplica las condiciones de borde (i), (ii), se obtiene la siguiente relación:

$$\bar{I}_{ff0} = \bar{I}_{ff1} = \bar{I}_{ff2} \quad (13)$$

Por otra parte

$$\begin{vmatrix} \bar{V}_{ffa} \\ \bar{V}_{ffb} \\ \bar{V}_{ffc} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \bar{V}_{ff0} \\ \bar{V}_{ff1} \\ \bar{V}_{ff2} \end{vmatrix} \quad (14)$$

En la expresión 14 se reemplaza la condición de borde (iii) y se obtiene

$$\bar{E}_{ffa} = \bar{V}_{ff0} + \bar{V}_{ff1} + \bar{V}_{ff2} \quad (15)$$

La impedancia Thevenin vista desde el punto de fa

lla es:

$$z_{th} = - \left| (C_1 + D_1 Z_S^{-1}) (A_1 + B_1 Z_S^{-1})^{-1} + (C_2 + D_2 Z_R^{-1}) (A_2 + B_2 Z_R^{-1})^{-1} \right|^{-1} \quad (16)$$

En componentes simétricas se tiene redes desacopladas e independientes, por lo tanto se cumple que:

$$\bar{V}_{ff0} = z_{th0} \cdot \bar{I}_{ff0}$$

$$\bar{V}_{ff1} = z_{th1} \cdot \bar{I}_{ff1} \quad (17)$$

$$\bar{V}_{ff2} = z_{th2} \cdot \bar{I}_{ff2}$$

además,

$$z_{th1} = z_{th2} \quad (18)$$

Utilizando las expresiones 13, 15, 17 y 18 se obtienen las transformadas de voltajes de superposición en el punto de falla.

$$\bar{V}_{ff0} = \frac{z_{th0}}{z_{th0} + 2 z_{th1}} \bar{E}_{ffa}$$

$$\bar{V}_{ff1} = \frac{z_{th1}}{z_{th0} + 2 z_{th1}} \bar{E}_{ffa} \quad (19)$$

$$\bar{V}_{ff2} = \frac{z_{th2}}{z_{th0} + 2 z_{th1}} \bar{E}_{ffa}$$

Los valores anteriores se utilizan para obtener las transformadas de los voltajes y corrientes en el extremo transmisor a base de las siguientes ecuaciones matriciales:

$$\bar{V}_{sf} = (A_1 + B_1 Z_S^{-1})^{-1} \bar{V}_{ff} \quad (20)$$

$$\bar{I}_{sf} = - Z_S^{-1} \cdot \bar{V}_{sf} \quad (21)$$

Las transformadas de los voltajes y corrientes en componentes simétricas se cambian a componentes de fase.

1.6. ENERGIZACION DE LA LINEA

La energización de la línea en vacío se realiza desde una barra infinita. A continuación se presenta como ejemplo el análisis matemático para el cierre simultáneo en las tres fases.

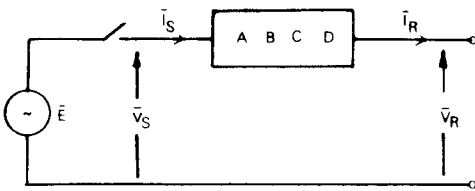


Fig. 7. Circuito básico

Condiciones de borde:

$$\bar{V}_S = 0 \quad \text{para } t < 0 \quad (i)$$

$$\bar{V}_S = \bar{E} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (ii)$$

$$\bar{I}_R = 0 \quad (iii)$$

$$\bar{V}_S = A \bar{V}_R + B \bar{I}_R \quad (22)$$

$$\bar{I}_S = C \bar{V}_R + D \bar{I}_R$$

Si se reemplaza las condiciones (ii) e (iii) en las ecuaciones anteriores, la transformada de voltaje en el extremo receptor está dada por:

$$\bar{V}_R = A^{-1} \bar{E} \quad (23)$$

y la transformada de la corriente en el extremo transmisor

$$\bar{I}_S = C A^{-1} \bar{E} \quad (24)$$

1.7. ENERGIZACION DE LA LINEA EN CONDICIONES DE FALLA

La energización de la línea en condiciones de falla se realiza desde una barra infinita. Como ejemplo se presenta el análisis matemático para el cierre simultáneo de las tres fases cuando ocurre una falla trifásica en la línea.

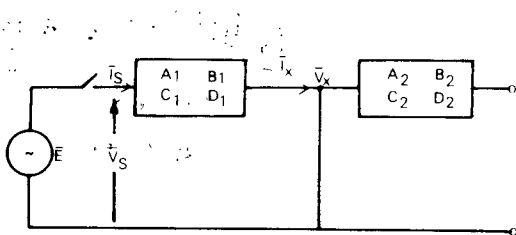


Fig. 8. Circuito básico

Condiciones de borde:

$$\bar{V}_S = 0 \quad \text{para } t < 0 \quad (i)$$

$$\bar{V}_S = \bar{E} \quad \text{para } t \geq 0 \quad (ii)$$

$$\bar{V}_X = 0 \quad (iii)$$

$$\bar{V}_S = A_1 \bar{V}_X + B_1 \bar{I}_X \quad (25)$$

$$\bar{I}_S = C_1 \bar{V}_X + D_1 \bar{I}_X$$

Si las condiciones (ii) e (iii) se reemplazan en las ecuaciones anteriores se obtiene la transformada de la corriente en el extremo transmisor.

$$\bar{I}_S = D_1 B_1^{-1} \bar{E} \quad (26)$$

1.8. TECNICA DE TRANSFORMACION DE LA FRECUENCIA

Una vez obtenidas las transformadas de voltajes y corrientes en el extremo transmisor o receptor en componentes de fase, es necesario transformarlas a funciones de tiempo.

La ocurrencia de un disturbio en la línea provoca una serie de ondas viajeras, tal fenómeno representa una amplia variación de frecuencias y es necesario evaluar las ecuaciones del sistema sobre un completo espectro de frecuencias del disturbio para obtener la respuesta transitoria correcta.

La transformada inversa de Fourier indicada en la ecuación 27 es la base del método para determinar las formas de onda de corrientes y voltajes transitorios.

$$f(t) = \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{\infty} f(\omega) \cdot \exp(j\omega t) \cdot d\omega \quad (27)$$

Varios autores⁷ han desarrollado la técnica de la transformada modificada de Fourier que permite evaluar la integral por métodos numéricos.

$$f(t) = \frac{\exp(a't)}{\pi} \int_0^{\Omega} \sigma P(\omega - ja') \cos(j\omega t) d\omega \quad (28)$$

El factor σ , indicado en la ecuación 29 sirve para amortiguar las oscilaciones de Gibbs durante la integración

$$\sigma = \frac{\text{Sen}(\pi\omega/\Omega)}{\pi\omega/\Omega} \quad (29)$$

La frecuencia real a' es constante y se introduce para asegurar la estabilidad numérica cuando la integral se evalúa digitalmente, la frecuencia de truncamiento Ω debe tener un valor suficientemente alto.

1.9. ESPECTRO DE FRECUENCIA

Los voltajes y corrientes transitorios se consideran funciones periódicas y pueden expresarse por series de Fourier

$$f(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} F(n) \cdot \exp(j2\pi \cdot n \cdot f_0 \cdot t)$$

El período de la función es $T = 1/f_0$, $F(n)$ son los coeficientes complejos de Fourier.

Para el procesamiento digital es necesario tomar un número finito de muestras.

$$f(k) = \Delta f \sum_{n=0}^{N-1} F(n) e^{j2\pi nk/N} \quad (30)$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1$$

donde:

$$t = k \cdot \Delta t$$

$$f = n \cdot \Delta f$$

$$\Delta f = 1/T$$

El gráfico de la magnitud de los coeficientes complejos $F(n)$ versus la frecuencia se denomina espectro de amplitud de la función $f(t)$.

Si $F(n) = a(n) + jb(n)$

$$F(n) = \sqrt{a^2(n) + b^2(n)} \quad \text{para } f = n \cdot f_0 \quad (31)$$

El gráfico del ángulo de fase $\phi(n)$ versus la frecuencia f se denomina espectro de fase de la función $f(t)$.

$$\phi(n) = \text{arctag.} \left(\frac{b(n)}{a(n)} \right) \quad \text{para } f = n \cdot f_0 \quad (32)$$

2. MODELO ANALOGICO

El modelo analógico es uno de los medios usados para la investigación de los fenómenos transito-

rios y es una representación a escala de un sistema.

La parte principal de este estudio se realiza en un modelo⁵ que simula la línea de transmisión del estudio de prefactibilidad del Proyecto Jubones - Paute.

En el modelo utilizado no se consideran capacitores serie, reactores en paralelo, ni transformadores.

Las observaciones se realizan a través de oscilogramas, de tal manera que, sea muy fácil la visualización y comparación de los fenómenos.

La línea artificial del modelo consta de dos secciones π que representan 100 Km cada una, una sección π que representa 200 Km, el voltaje nominal utilizado es de 10 voltios A.C. fase-neutro.

En la Fig. 9 se muestran los parámetros de los circuitos equivalentes π .

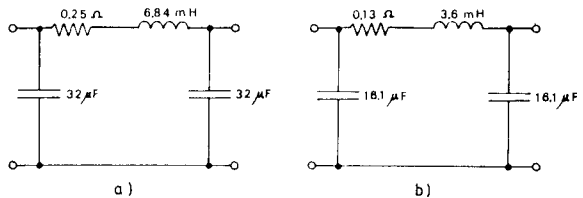
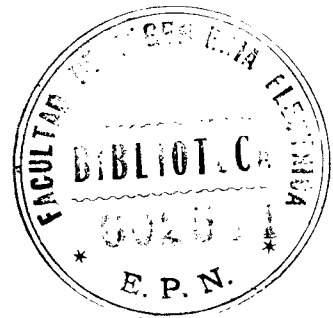


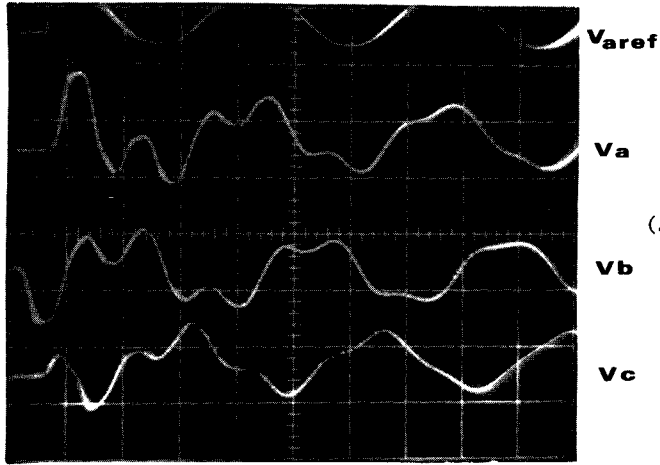
Fig. 9. Secciones del modelo de línea de transmisión que representan a) 200 Km, b) 100 Km.

La tolerancia de los elementos es del orden del 2%.

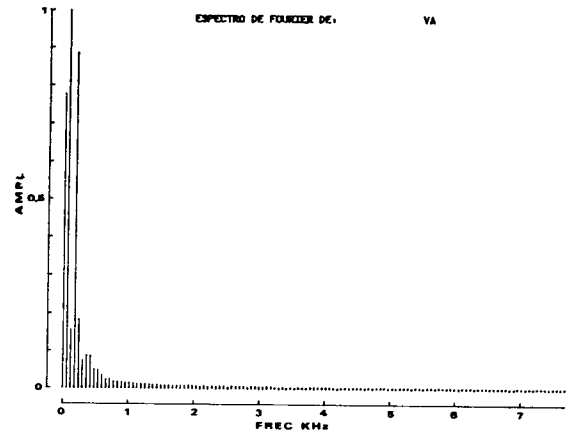


3. RESULTADOS

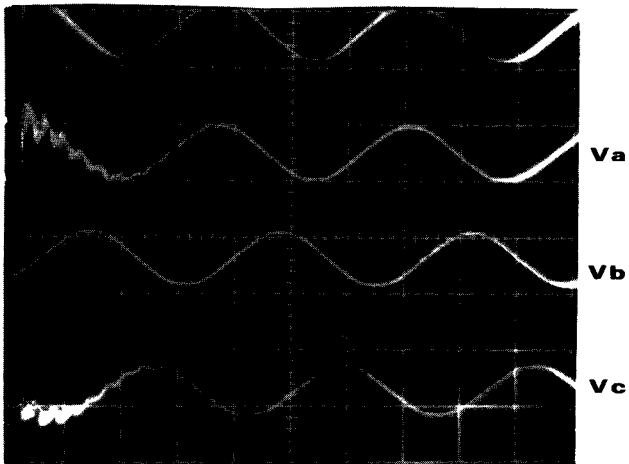
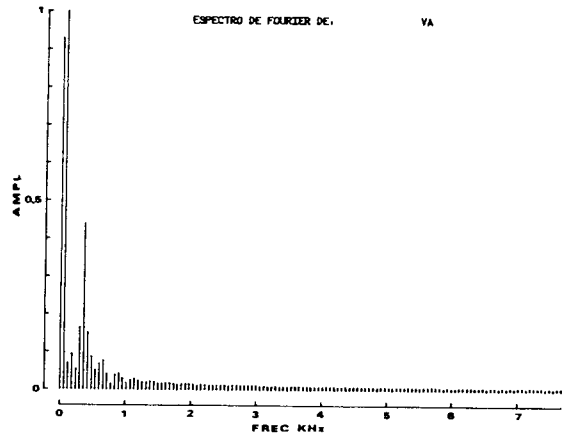
3.1. ENERGIZACION DE LA LINEA (Modelo analógico)



Esc. Hor.: 5 ms/div.
Esc. Vert: 2 p.u./div.



Esc. Hor.: 5 ms/div.
Esc. Vert: 2 p.u./div.



Esc. Hor.: 5 ms/div.
Esc. Vert: 2 p.u./div.

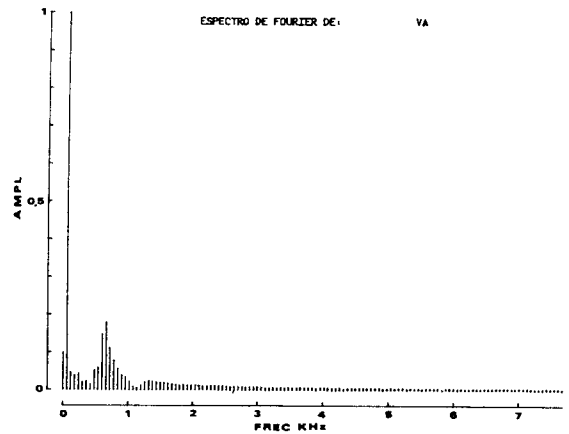
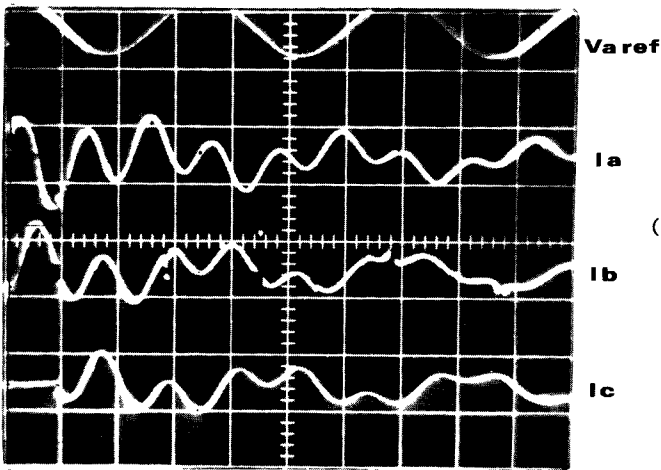
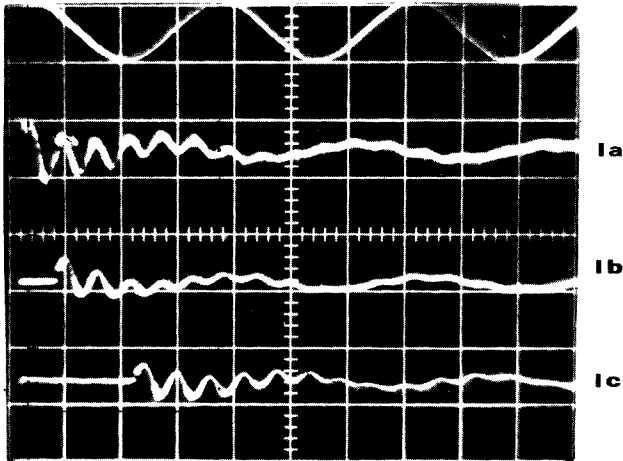
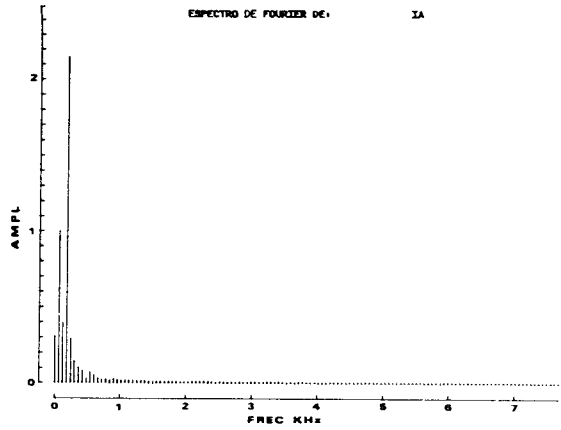


Fig. 10. Efecto de la longitud de la línea en los voltajes del extremo receptor
Lado izquierdo: formas de onda
Lado derecho: espectros de frecuencia de la fase a.
Longitud de la línea: a) 400 Km , b) 200 Km , c) 100 Km.



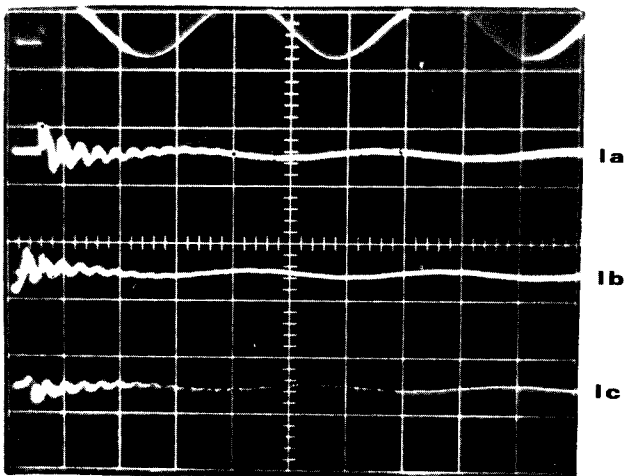
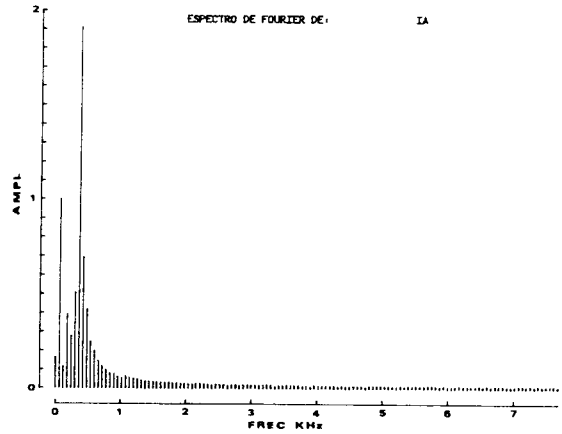
Esc. Hor.: 5 ms/div.
Esc. Vert: 1.43 k.A./div.

(a)



Esc. Hor.: 5 ms/div.
Esc. Vert: 1.43 k.A./div.

(b)



Esc. Hor.: 5 ms/div.
Esc. Vert: 1.43 k.A./div.

(c)

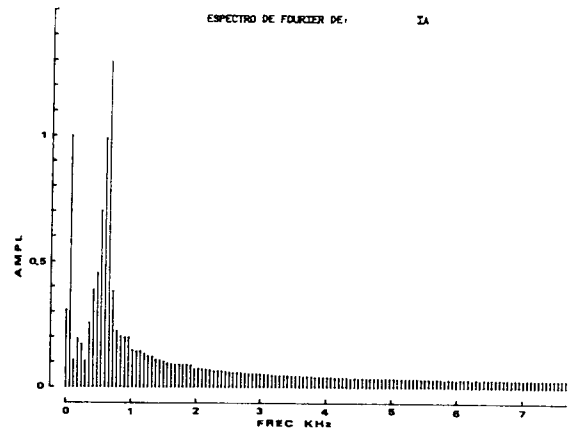
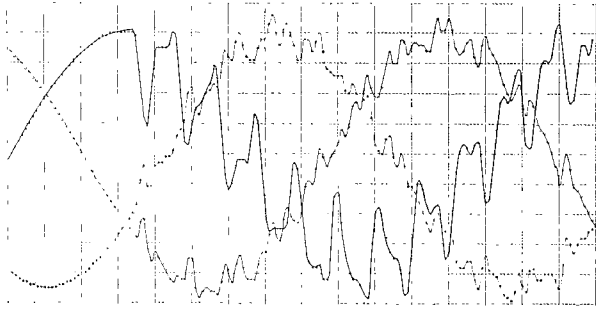
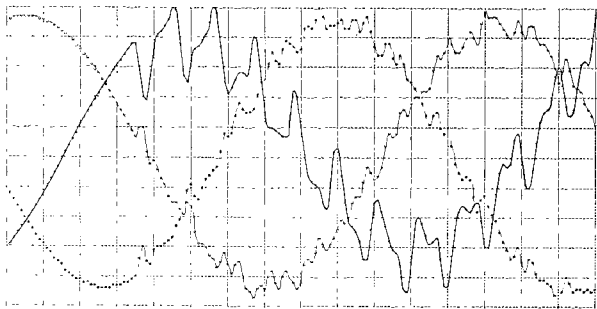
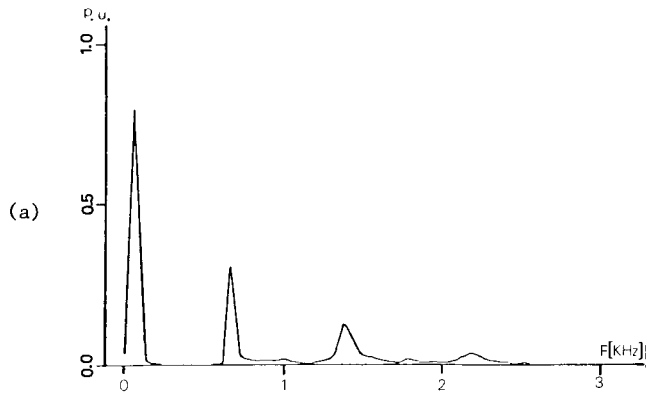


Fig. 11. Efecto de la longitud de la línea en las corrientes del extremo transmisor.
Lado izquierdo: formas de onda (Modelo analógico)
Lado derecho : espectros de frecuencia de la fase a (Tektronix 4051)
Longitud de la línea: a) 400 Km
b) 200 Km
c) 100 Km

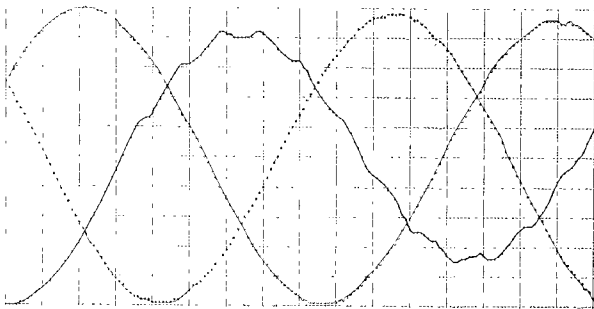
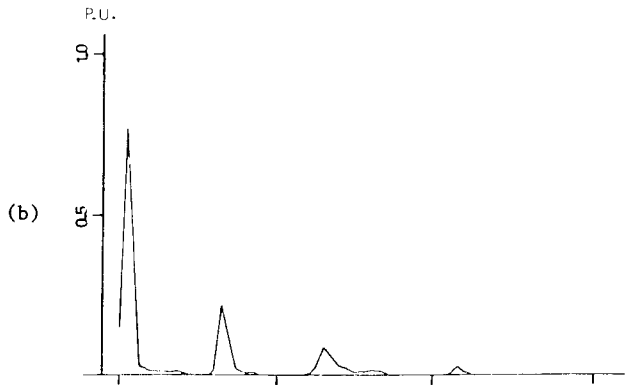
3.2. FALLA MONOFASICA EN LA FASE A (Modelo digital)



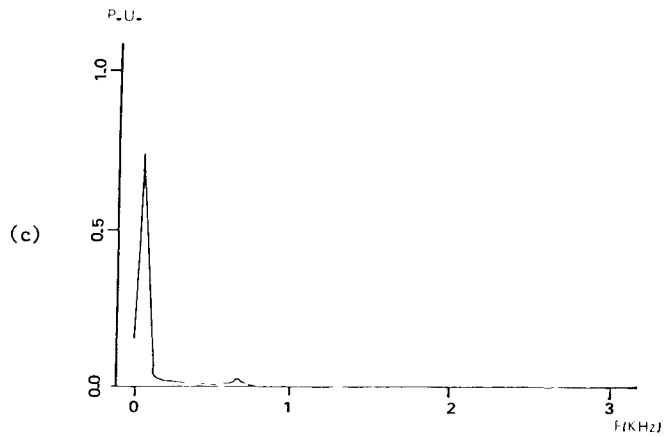
Esc. Hor.: 1.302 mseg/div.
Esc. Vert: 0.234 p.u./div.



Esc. Hor.: 1.302 mseg/div.
Esc. Vert: 0.22 p.u./div.



Esc. Hor.: 1.302 mseg/div.
Esc. Vert: 1.995 p.u./div.



Fif. 12. Efecto del ángulo de iniciación de la falla en los voltajes del extremo transmisor
lado izquierdo: formas de onda
lado derecho : espectros de frecuencias de la fase fallosa
ángulo de falla: a) 90° ; b) 45°; c) 0°

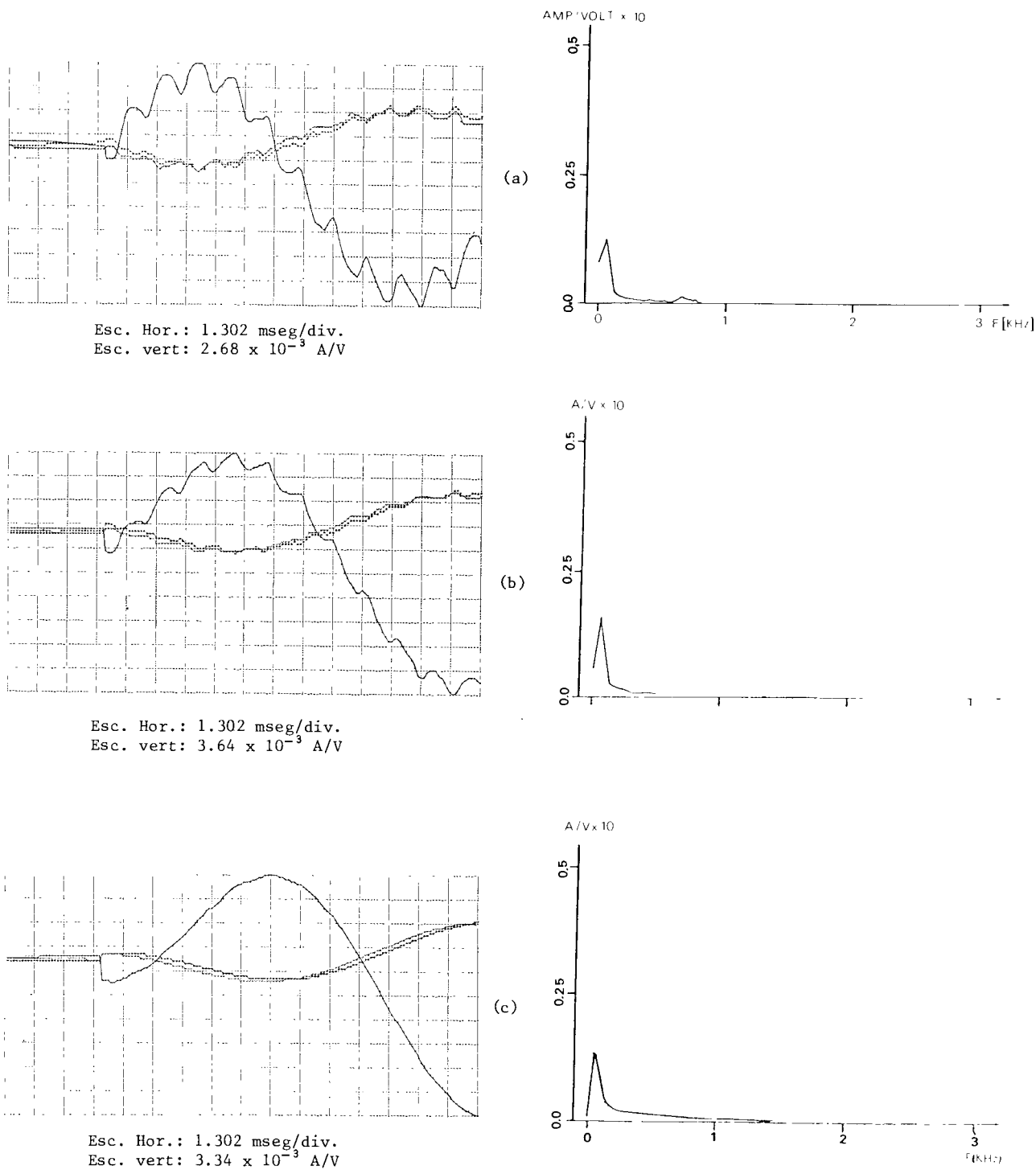
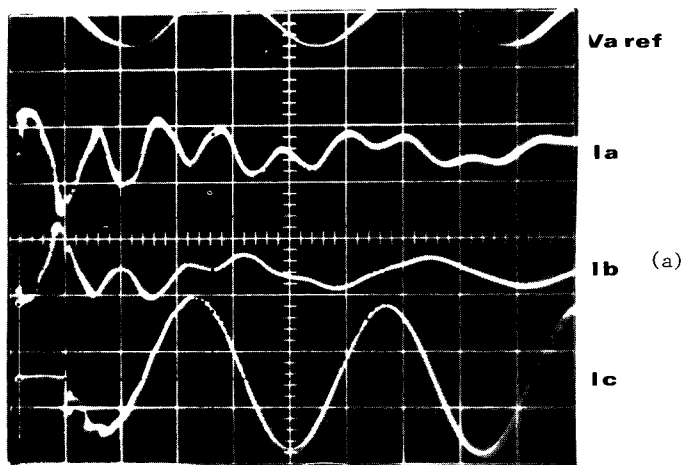
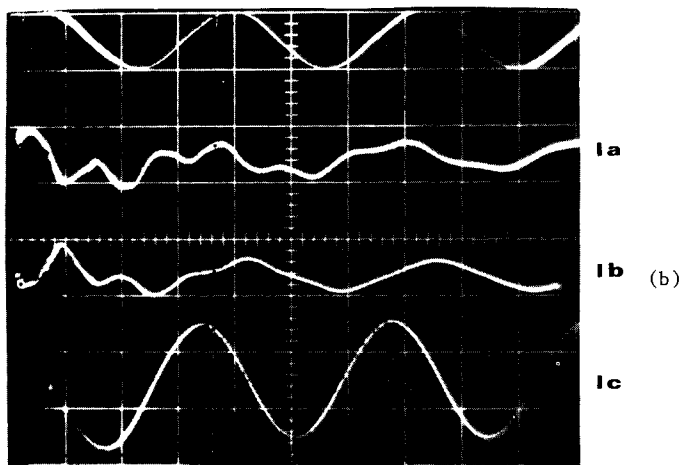
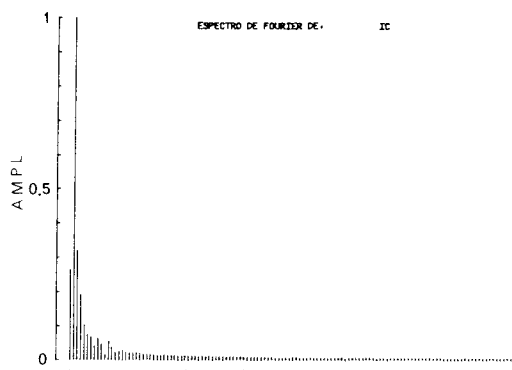


Fig. 13. Efecto del ángulo de iniciación de la falla en las corrientes en el extremo transmisor
 Lado izquierdo: formas de onda
 lado derecho : espectros de frecuencia de la fase fallosa
 ángulo de falla a) 90°; b) 45° ; c) 0°

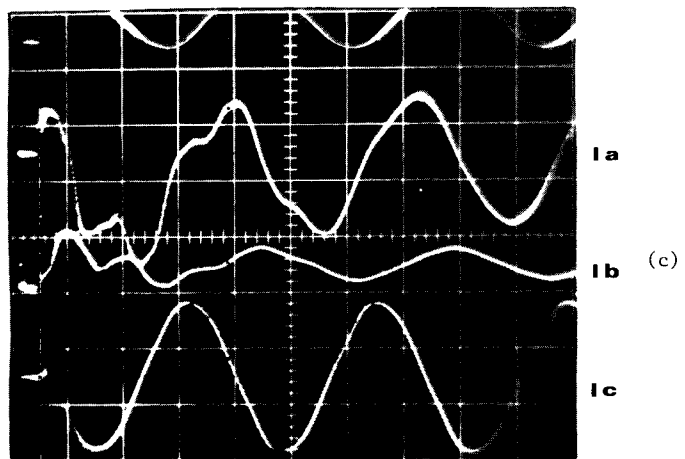
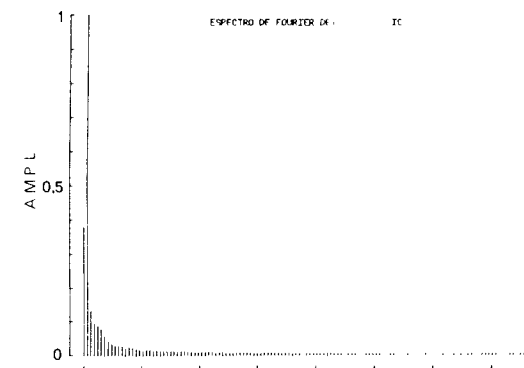
3.3. ENERGIZACION DE LA LINEA EN CONDICIONES DE FALLA MONOFASICA EN FASE C (Modelo analógico)



Esc. Hor.: 5 ms/div.
Esc. Vert: Ia = Ib : 1.43 kA/div.
Ic : 1.43 kA/div.



Esc. Hor.: 5 ms/div.
Esc. Vert: Ia = Ib : 1.43 kA/div.
Ic : 3.58 kA/div.



Esc. Hor.: 5 ms/div.
Esc. Vert: Ia = Ib : 1.43 kA/div.
Ic : 14.43 kA/div.

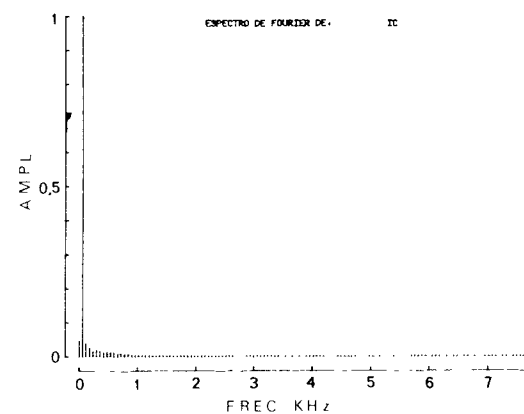


Fig. 14. Efecto de la localización de la falla en las corrientes del extremo transmisor.
Lado izquierdo: formas de onda Lado derecho: espectros de frecuencia en la fase fallosa.
Ubicación de la falla: a) 200 Km ; b) 100 Km ; c) 0 Km.

En las figuras 10 y 11 los oscilogramas de los voltajes y corrientes transitorios se obtienen cuando la línea de transmisión trabaja en vacío y se realiza el análisis para un ángulo de cierre cercano al pico de la onda de voltaje en la fase 'a', en la energización simultánea de las tres fases de la línea.

En los resultados se observa que, conforme disminuye la longitud de la línea, aumentan las oscilaciones lo cual se puede atribuir al número de reflexiones sucesivas que aumentan al disminuir la longitud de la línea, se puede notar también que los sobrevoltajes y corrientes transitorios aparecen más rápidamente cuando la línea es más corta, ya que el tiempo de propagación también disminuye.

En cuanto a las oscilaciones se puede apreciar que su atenuación es menor para una línea de menor longitud.

En el caso de las corrientes transitorias se observa además, una reducción apreciable en cuanto a su magnitud al disminuir la longitud de la línea, este hecho se debe a que al estar la línea en vacío la única corriente transitoria que existe es debido a la corriente de carga de la línea, la misma que se reduce al disminuir la longitud de la línea.

En el correspondiente análisis de los espectros de frecuencia, tanto para los voltajes como para las corrientes, se llega a las siguientes conclusiones:

Conforme disminuye la longitud de la línea, un grupo de componentes armónicas se desplazan hacia la derecha (componentes de alta frecuencia), encontrándose para cada caso, una frecuencia predominante, en el análisis de los espectros correspondientes a las corrientes se nota que la amplitud de esta frecuencia predominante toma valores mayores a la amplitud de la componente fundamental.

En las figuras 12 y 13 se muestran formas de onda y espectros de frecuencia, al ocurrir una falla monofásica en la línea, en la fase 'a', y conforme disminuye el ángulo de iniciación de falla se pueden anotar las siguientes características.

Menor distorsión de las formas de onda de voltaje y corriente, la amplitud de voltaje correspondiente a la componente de continua aumenta, mientras que la amplitud de la corriente de la componente de continua decrece. Existe disminución de las am

plitudes de voltaje a la frecuencia fundamental y predominante.

El peor de los casos, desde el punto de vista de ondas viajeras, es el instante que corresponde a voltaje máximo en la fase fallosa, el caso opuesto ocurre cuando la falla se aplica a voltaje cero, en este caso, hay poca distorsión debido a que no existe un cambio grande y repentino de voltaje en el punto de falla.

En la Fig. 14 se muestran los oscilogramas correspondientes a las corrientes transitorias que ocurren en el cierre simultáneo de las tres fases de la línea con falla monofásica.

Conforme el punto de falla se acerca a la fuente se observa que la amplitud de las componentes de alta frecuencia sufren una mayor atenuación.

CONCLUSIONES.-

Las formas de onda de los voltajes y corrientes transitorias con sus respectivos espectros de frecuencias proporcionan una valiosa información al sistema de protección.

El estudio de los sobrevoltajes de maniobra es de gran importancia en el diseño del aislamiento del sistema.

Ha sido común estudiar el fenómeno transitorio originado por una falla en la línea de transmisión por medio del método de ondas viajeras, en el presente estudio se muestra un método diferente que es la transformada modificada de Fourier.

Se considera que este trabajo debe ser continuado con estudios que incluyan la dependencia de los parámetros R, L y C con la frecuencia y la no transposición de la línea en el modelo digital y estudios que tomen en cuenta la carga y la impedancia interna de la fuente en el modelo analógico.

APENDICE.-

a) Línea trifásica representada en el modelo analógico.

Potencia a transmitirse	1000 Mw
Voltaje de transmisión		345 KV
Número de circuitos		2

Longitud de la línea 200 Km
 Conductores ACSR, 954 MCM

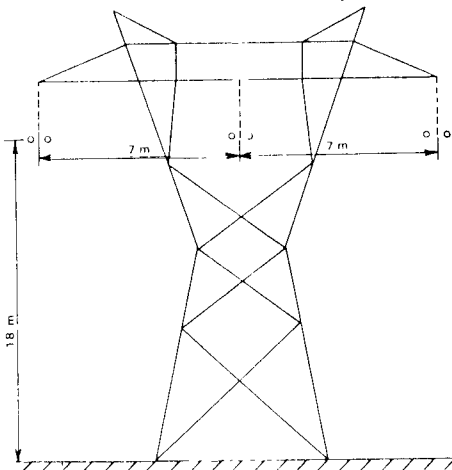


Fig. A-1. Disposición de los conductores en las torres.

b) Sistema simulado en el modelo digital.

- Frecuencia nominal: 60 Hz
- Impedancia interna de la fuente en extremo transmisor: $j20$ ohms.
- Impedancia interna de la fuente en el extremo receptor: $j 20$ ohms.
- Diferencia de fase entre los voltajes terminales = 0°
- Parámetros de la línea
 - Modo de fase.-
 - $z = 0.041 + j0.528$ ohms/milla
 - $y = j 7.86$ micro-siemens/milla
 - Modo de tierra.-
 - $z = 0.449 + j 2.02$ ohms/milla
 - $y = j 4.25$ micro-siemens/milla
- Longitud de la línea = 100 millas.

REFERENCIAS.-

1. Humpage, W.D., Wong, K.P., Al-Dabbagh, M.H., & Mukhtar, E.S., "Dynamic Simulation of High Speed Protection", PROC. IEE, 1974, Vol. 121, No. 6, PP. 474-480.
2. Kothari, G.C., Parthasarathy, K., Ashok Kumar, B.S., & Khincha, M.E., "Computer aided analysis of high-speed protective Relays", PROC. IEE, 1974, Vol. 121, No. 7, PP. 687 - 694.
3. Battisson, M.J., Day, S.J., Mullinex, N., Parton, K.C., & Reed, J.R., "Calculation of switching Phenomena in Power Systems", PROC. IEE,

Vol. 114, No. 4, April 1967, PP. 478-486.

4. Kimbark, E.W. & Legate, A.C. "Fault surge versus switching surge a study of transient over voltages caused by line to ground faults", IEEE Trans. Vol. PAS-87, No. 9, September 1968 PP. 1762-1769.
5. Rodas R., "Estudio de una Línea de Transmisión mediante un modelo", Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 1969.
6. Bickford, J.P., "Computation of Power Systems Transients", IEE Monograph Series 18, 1976.
7. Day, S.J., Mullinex, N. & Reed, J.R., "Developments in obtaining Transient Response using Fourier Transforms: Gibbs phenomena and Fourier Integrals", Internat. J. Elect. Engng. Educ., 1965, Vol. 3, PP. 501-506.
8. Day, S.J., Mullinex, N. & Reed, J.R., "Developments in obtaining Transient Response using - Fourier Transforms: Use of the modified Fourier Transform", Internat. J. Elect. Engng. Educ., 1966, No. 4, PP. 31-40.
9. Rodas, M., "La Transformada Rápida de Fourier", Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, 1977.
10. Maury, E., "Synchronous closing of 525 & 765 KV. circuit breakers: a means of reducing switching surges on unloaded lines" CIGRE, Rept 143, 1966.
11. Swift, G.W., "The spectra of Fault-Induced Transients", IEEE Trans., Vol. PAS-98, No. 3, May/June 1979, PP. 940-947.
12. Johns, A.T., & Aggarwal, R.K., "Digital Simulation of Faulted E.H.V. Transmission lines with particular reference to very-high speed Protection", PROC. IEE, Vol. 123, No. 4, April 1976, PP. 353-359.
13. Gavidia C.A., "Estudio de los fenómenos transitorios producidos por corto-circuitos en un modelo de Línea de Transmisión", Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Noviembre 1981.
14. Cruz H.E., "Simulación Digital de una Línea

de Transmisión en condiciones de Falla", Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, Noviembre 1981.

tá energizada y en estado estacionario o de la energización de una línea con la presencia previa de una falla monofásica.

ORBE, PATRICIO. Ingeniero Eléctrico, E.P.N. - 1972, Master of Science, University of Manchester Institute of Science and Technology 1976. En el campo de la docencia, desde 1970 colabora con el Departamento de Potencia de la Escuela Politécnica Nacional, donde actualmente es Profesor Principal a tiempo completo. Fue Jefe del Departamento de Potencia y Coordinador del Área de Sistemas Eléctricos de Potencia. En la Profesión libre ha sido colaborador de varias compañías consultoras y constructoras. Autor de varios trabajos de transitorios en Sistemas de Potencia. Miembro del CIEEPI y del IEEE.



GAVIDIA, CARLOS. Nació en Riobamba, el 25 de Agosto de 1955, obtuvo el título de Bachiller Técnico en Electricidad en el Instituto Técnico Superior Carlos Cisneros. Se recibió de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional de Quito - en Diciembre de 1981. En 1979 colaboró en la Escuela Politécnica Nacional y en la Empresa Eléctrica Riobamba S.A. En 1980 prestó sus servicios en la Fábrica TUBASEC C.A. como Jefe del Departamento de Producción. Miembro del CIEEPI y del IEEE.

Discusión

MENA, ALFREDO. Este artículo une los resultados obtenidos en las tesis de Ingeniería de los señores Cruz y Gavidia y pretende dar una base matemática y física a los efectos transitorios en líneas de transmisión. Si bien hay que reconocer el esfuerzo realizado por los autores en la presentación del trabajo, que será de utilidad para fines didácticos especialmente, hay que anotar algunos aspectos de fondo y forma:

- No se demuestra que el modelo físico de línea utilizado sea apropiado para pruebas transitorias. En otras palabras los resultados observados en los oscilogramas no necesariamente representan los que podrían esperarse en una línea real. (Para fines demostrativos si es suficiente la aproximación).
- Los espectros de frecuencia se han obtenido al simular el primer ciclo como repetitivo, o sea no consideran la atenuación de las componentes. De lo que se observa en los oscilogramas la atenuación es muy rápida de tal modo que en el segundo o tercer ciclo ya ha desaparecido gran parte del transitorio original.
- Los ejemplos escogidos no permiten comparar los resultados del modelo matemático con los del modelo físico, a más de que las líneas simuladas son diferentes. Hubiera sido interesante poner los parámetros del modelo en el programa que resuelve el modelo matemático.
- El concepto de falla (Figs. 12, 13, 14) no está bien definido; no se sabe si se trata de una falla que ocurre en una línea que es