



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES

“ ARAGON ”

67

ESTUDIO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNETICOS  
EN REDES DE DISTRIBUCION

Sist. 29241

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

**AUDENCIO OCTAVIO LOMELI ESCOBAR**

SAN JUAN DE ARAGON, EDO. DE MEXICO

1985



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**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 esta 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.

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

"ESTUDIO DE TRANSITORIOS ELECTROMAGNETICOS"

EN REDES DE DISTRIBUCION

INSTITUTO VENEZOLANO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

Dedico el presente trabajo  
con todo cariño y admiración.

A mis padres.

Ranulfo Lomeli Salmerón.

Jovita Escobar Domínguez.

Por su apoyo moral y económico  
durante toda mi carrera.

A mis hermanos.

Rey, Blanca, Martha, Fito

Ceci, Rocio y Dulce.

Por su motivación

A mi novia

Norma

Por su comprensión y paciencia



Por sus apoyos y motivaciones  
agradecimientos infinitos.

A mis asesores.

Ing. Jaime Carrillo Corona.

Ing. Abel Domínguez Bordes.

A mis tios

Isauro y Magdalena

Al Instituto de Investigaciones  
Eléctricas y CONACYT.

A todos mis compañeros y amigos  
de la E.N.E.P. Aragón y del IIE.

# INDICE

	PAG.
INTRODUCCION	
CAPITULO 1: TRANSITORIOS EN CIRCUITOS SIMPLES-----	1
1.1 TRANSITORIOS DE CIERRE CON EXCITACION DE CORRIENTE DIRECTA. -----	1
1.1.1 Circuito RL Serie. -----	2
1.1.2 Circuito RC Serie. -----	5
1.1.3 Circuito RLC Serie y Paralelo. -----	7
1.1.3.1 Circuito RLC serie. -----	10
1.1.3.2 Circuito RLC paralelo. -----	18
1.2 TRANSITORIOS DE CIERRE CON EXCITACION DE CORRIENTE ALTERNA. -----	20
1.2.1 Analisis del Circuito RL Serie. -----	20
1.2.2 Analisis del Circuito RC Serie. -----	24
1.2.3 Analisis del Circuito RLC Serie. -----	26
1.2.4 Analisis del Circuito LC Serie. -----	31
CAPITULO 2: TRANSITORIOS NORMALES Y ANORMALES -----	35
2.1 TRANSITORIOS NORMALES EN LA APERTURA DE INTERRUPTORES. -----	36

2.1.1 Transitorios Producidos Por la Desconexión de Resistencias. -----	40
2.2 TRANSITORIOS ANORMALES. -----	48
2.2.1 Supresión de Corrientes. -----	48
2.2.2 Desconexión de Capacitancias. -----	55
2.2.3 Reignición de Corrientes. -----	57
2.2.4 Corrientes de Magnetización (Inrush). ----	62
<b>CAPITULO 3: TRANSITORIOS DE TENSION EN REDES DE DISTRIBUCION.-----</b>	<b>67</b>
3.1 TRANSITORIOS DE TENSION PRODUCIDOS POR FALLAS. -----	68
3.1.1 Tensión a Frecuencia Fundamental. -----	68
3.1.2 Tensión a Frecuencia Natural. -----	73
3.2 TRANSITORIOS PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFERICAS. -----	73
3.2.1 Efecto de las Descargas Atmosféricas en los Sistemas de Protección. -----	79
3.3 TRANSITORIOS DE TENSION PRODUCIDOS POR MANIOBRA. -----	80
3.3.1 Sobretensiones Debido al Cierre de los Sistemas con Carga atrapada. -----	83
3.3.2 Desenergización de una Línea con Múltiples reencendidos. -----	85

3.3.3 Desenergización de una Línea con una Falla de Fase a Tierra. -----	86
---	----

<b>CAPITULO 4: ANALISIS DIGITAL DE LOS TRANSITORIOS EN REDES DE DISTRIBUCION. -----</b>	<b>88</b>
---	-----------

4.1 MODELACION DE LOS ELEMENTOS PARA LA SIMULACION DIGITAL. -----	89
--	----

4.1.1 Modelación de una Línea de distribución. --	89
---	----

4.1.2 Modelación de Fuentes. -----	96
------------------------------------	----

4.1.3 Modelación de Interruptores. -----	97
--	----

4.1.4 Modelación de transformadores. -----	98
--	----

4.2 SIMULACION DIGITAL. -----	98
-------------------------------	----

4.2 1 Transitorios en Circuitos Simples. -----	99
--	----

4.2.2 Tensión Transitoria de Restablecimiento. -	102
--	-----

4.2.3 Transitorios Debidos a Maniobra. -----	104
--	-----

4.2.4 Transitorios Debidos a una falla de Fase a Tierra. -----	109
---	-----

<b>CAPITULO 5: EFECTO DE LOS TRANSITORIOS DE TENSION EN EQUIPOS DE DISTRIBUCION. -----</b>	<b>112</b>
--	------------

5.1 RESPUESTA DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION ANTE LA APLICACION DE IMPULSOS DE TENSION. -----	112
---	-----

5.2 RESPUESTA DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION ANTE LA APLICACION DE IMPULSOS PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFERICAS. -----	120
5.3 COMPORTAMIENTO DE LOS FUSIBLES DE PROTECCION PRIMARIA ANTE LA APLICACION DE IMPULSOS DE TENSION. -----	123
5.4 COMPORTAMIENTO DE LOS INTERRUPTORES BAJO LA TENSION TRANSITORIA DE RESTABLECIMIENTO. ---	125
CONCLUSIONES -----	128
BIBLIOGRAFIA -----	131

## INTRODUCCION

Durante los últimos años el fenómeno de los transitorios electromagnéticos en los sistemas de potencia han constituido una parte importante en el diseño de los sistemas de protección, debido a esto algunas instituciones se han dedicado a estudiarlo.

El propósito de este trabajo es dar una idea clara al lector de que es un transitorio, cuando y donde se presenta, cuales son los parámetros que influyen en dicho fenómeno y como se puede controlar para tener un servicio continuo y eficiente. En el capítulo 1 se analizan varios circuitos simples excitados con corriente directa y corriente alterna se obtienen los parámetros que influyen en la respuesta de cada una de las configuraciones, solo se profundiza en el análisis del circuito RLC serie graficandose la respuesta para observar su comportamiento con respecto al tiempo y así apreciar sus grados de amortiguamiento.

En el capítulo 2 se hace un estudio de los transitorios normales y anormales en configuraciones de circuitos simples, con un análisis matemáticos poco profundo para la determinación de la Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR), y así reducir la sobretensión producida por el

transitorio de apertura de los interruptores. Dentro de los transitorios anormales se estudia el fenómeno de supresión de corrientes, transitorios debido a la desconexión de capacitancias y brevemente el fenómeno de las corrientes de magnetización (inrush).

En el capítulo 3 se realiza un estudio de los transitorios de tensión en las redes de distribución, con la finalidad de conocer el comportamiento de estos sistemas bajo condiciones de falla, descargas atmosféricas y operaciones de maniobra (swicheo).

En el capítulo 4 se modela una línea de distribución bajo el principio de un arreglo común utilizado en México. Se efectúan algunas simulaciones con el programa EMTF (ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM), con él se obtienen las gráficas correspondientes para cada una de ellas y se observa el comportamiento de los sistemas sometidos a varias condiciones.

En el capítulo 5 se realiza un análisis matemático para saber cual es la respuesta de los transformadores de distribución ante la aplicación de impulsos de tensión, se menciona el comportamiento de los fusibles de distribución ante la aplicación de impulsos de tensión, además se realiza un estudio de la TTR para obtener la ecuación que la describe.

## CAPITULO 1

### TRANSITORIOS EN CIRCUITOS SIMPLES

Un transitorio electromagnético es un fenómeno que se produce cuando un circuito eléctrico sufre un cambio repentino en sus condiciones de operación (cierre o apertura de un interruptor).

Es importante hacer notar que este fenómeno aparece únicamente cuando el circuito contiene elementos almacenadores de energía como son: LOS INDUCTORES y CAPACITORES, ya que si el circuito es puramente resistivo los transitorios no se presentan. Además dicho fenómeno o período de transición tiende a cero en un tiempo relativamente corto y el circuito pasa a su estado estable o régimen permanente.

En éste capítulo se analizan los circuitos RL, RC Y RLC con una fuente de excitación de C.D. y los circuitos RL, RC, RLC y LC con una fuente de excitación de C.A.

#### 1.1 TRANSITORIOS DE CIERRE CON EXCITACION DE C.D.

En esta sección se analiza la respuesta transitoria y permanente de los circuitos mencionados anteriormente, con un



grado de complejidad sencillo para mayor comprensión del fenómeno transitorio.

### 1.1.1 Circuito RL serie.

El circuito RL serie se muestra en la fig. 1.1, el interruptor S se encuentra abierto, lo cual indica que no circula corriente a través de los elementos del circuito. En el instante  $t=0$  el interruptor S cierra y a partir de este momento empieza a circular la corriente a través de la resistencia y la inductancia.

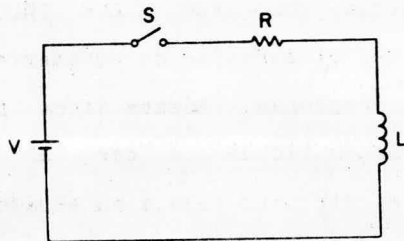


Fig. 1.1 Circuito RL serie

Aplicando la ley de tensiones de Kirchhoff al circuito, se obtiene:

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1.1)$$

La ecuación diferencial 1.1 representa el comportamiento del circuito RL, para obtener la solución de dicha ecuación

existen varios métodos, aquí se utiliza el método de la transformada de Laplace.

Aplicando dicho método a la ec. 1.1 toma la siguiente forma.

$$SLI(s) + RI(s) = \frac{V}{S} \quad (1.2)$$

Despejando  $I(s)$  se tiene:

$$I(s) = \frac{V}{LS} \left[ \frac{1}{S + (R/L)} \right] \quad (1.3)$$

La ec. 1.3 representa la corriente que circula a través de los elementos del circuito RL serie (fig. 1.1), esta corriente esta expresada en el dominio de Laplace. Para obtener la representación de la corriente en el dominio del tiempo es necesario aplicar la transformada inversa de Laplace.

Para poder aplicar la transformada inversa de Laplace es necesario expandir en fracciones parciales la ec. 1.3 lo cual conduce a la ec.

$$\frac{V}{LS} \left[ \frac{1}{S + (R/L)} \right] = \frac{V}{L} \left[ \frac{A}{S} + \frac{B}{S + (R/L)} \right] \quad (1.4)$$

Como se puede observar el segundo miembro de la ec. 1.4 contiene dos constantes que son: A y B, para encontrar el

valor de éstas se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned} A + B &= 0 \\ A(R/L) &= 1 \end{aligned} \quad (1.5)$$

Resolviendo las ecs. 1.5 los valores de A y B son:

$$\begin{aligned} A &= L/R \\ B &= - (L/R) \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores de A y B en la ec. 1.4 se tiene:

$$I(s) = \frac{V}{R} \left[ \frac{1}{s} - \frac{1}{s + (R/L)} \right] \quad (1.6)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace a la ec. 1.6 se obtiene la siguiente expresión.

$$i(t) = \frac{V}{R} \left[ 1 - e^{-(R/L)t} \right] \quad (1.7)$$

La ec. 1.7 representa la corriente que fluye a través de los elementos del circuito de la fig. 1.1 en cualquier instante. Dicha ecuación se representa gráficamente en la fig. 1.2, en la cual se observan los estados transitorio y permanente.

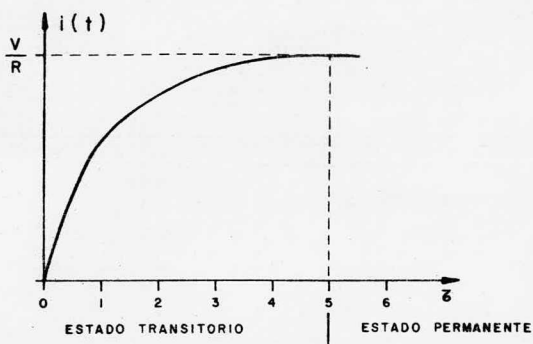


fig. 1.2 Representación de la ec. 1.7

La relación  $L/R$  es conocida como la constante de tiempo ( $\tau$ ) del circuito. Así para  $t = \tau$  la corriente  $i(t)$  alcanza el 63% de su valor final y generalmente para un tiempo de  $t = 5\tau$  se considera que la corriente se encuentra en su estado estable, ya que prácticamente alcanza su valor del 100%

### 1.1.2 Circuito RC serie

El circuito RC serie se muestra en la fig.1.3 y su análisis es análogo al del circuito RL.

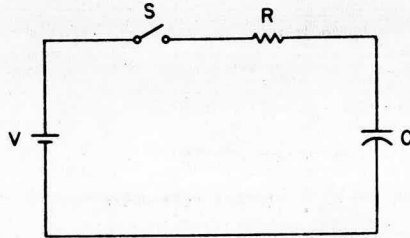


Fig. 1.3 circuito RC serie

La ecuación que rige el comportamiento del circuito de la fig. 1.3 es:

$$V = Ri + \frac{1}{C} \int i \, dt \quad (1.8)$$

Aplicando la transformada de Laplace se tiene:

$$\frac{V}{s} = RI(s) + \frac{1}{Cs} I(s) \quad (1.9)$$

De la cual

$$I(s) = \frac{V}{R} \left[ \frac{1}{s + (1/RC)} \right] \quad (1.10)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace se llega a:

$$i(t) = \frac{V}{R} e^{-(1/RC)t} \quad (1.11)$$

La ec. 1.11 representa la respuesta de la corriente en el tiempo del circuito RC serie con excitación de C.D.

La figura 1.4 es la representación gráfica de la ec. 1.11, la cual ilustra los dos tipos de respuesta.

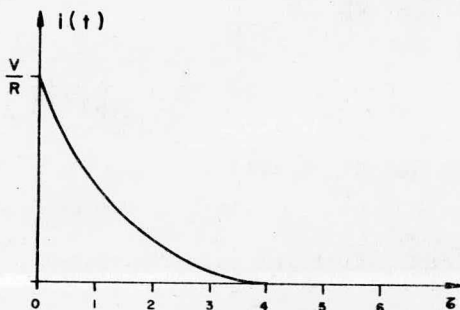


Fig 1.4 Representación de la ec. 1.11

Para el circuito RC la constante de tiempo esta dada por  $\tau = RC$ . En la fig. 1.4 se aprecia que el estado transitorio está presente hasta  $4\tau$ . Se considera que el circuito RC alcanza su estado estable en un tiempo de  $t=4\tau$ .

### 1.1.3 Circuitos RLC serie y paralelo.

Estos circuitos son importantes para este estudio, ya que para el análisis de los transitorios en las redes eléctricas en los sistemas de potencia, éstas pueden reducirse a un

circuito RLC serie o paralelo equivalente, o en algunos casos a un número mínimo de estos.

Los circuitos RLC se muestran en la fig. 1.5.

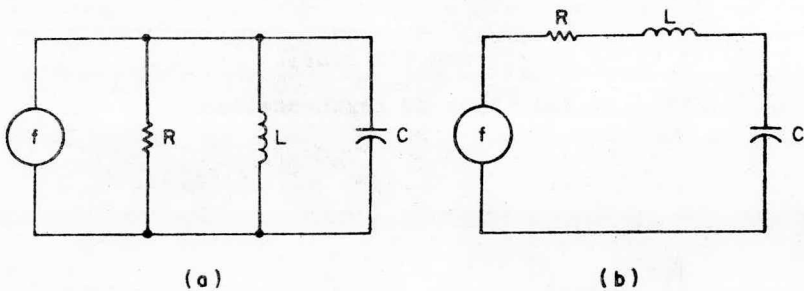


Fig. 1.5 Circuito RLC a) Paralelo, b) Serie.

La ecuación general que rige el comportamiento de estos circuitos es la siguiente.

$$-\frac{d^2\phi}{dt^2} + K_1 \frac{d\phi}{dt} + \frac{\phi}{LC} = K_2 \frac{d\psi}{dt} \quad (1.12)$$

Donde  $\phi$  y  $\psi$  serán la corriente o tensión según el circuito de que se trate, es decir si el circuito es el paralelo,  $\phi$  será la tensión y  $\psi$  la corriente, además  $K_1$  y  $K_2$  serán  $(1/RC)$  y  $(1/C)$  respectivamente.

Si el circuito es el serie  $\phi$  es la corriente y  $\psi$  es la tensión,  $K_1 = (R/L)$  y  $K_2 = (1/L)$ . Por otra parte se observa que el inverso de las constantes  $K$  son las llamadas

constantes de tiempo que se denotan como:

$$\bar{\sigma}_p = (RC) \quad (1.13)$$

$$\bar{\sigma}_s = (L/R) \quad (1.14)$$

Se puede observar que el producto de estas constantes de tiempo, representan el cuadrado del período angular ( $T=1/\omega$ ) del circuito no amortiguado.

$$\bar{\sigma}_p \bar{\sigma}_s = RC(L/R) = LC = T^2 \quad (1.15)$$

Se sabe que la impedancia característica del circuito es  $Z_0 = \sqrt{L/C}$  y definiendo a la razón de amortiguamiento para el circuito RLC paralelo como:

$$\eta = \frac{R}{Z_0} = R \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (1.16)$$

Puede observarse que  $\eta^2$  es la relación que existe entre  $\bar{\sigma}_p$  y  $\bar{\sigma}_s$ , esto es:

$$\eta^2 = \frac{\bar{\sigma}_p}{\bar{\sigma}_s} = R^2 \frac{C}{L} \quad (1.17)$$

Como se ha planteado la ecuación general de los circuitos RLC (ec.1.12), a continuación solo se analiza el circuito RLC serie.



### 1.1.3.1 Circuito RLC serie.

En esta sección se hace un análisis completo del circuito RLC serie para observar como varia su respuesta y que factores influyen en ella.

El circuito utilizado se muestra en la fig. 1.6.

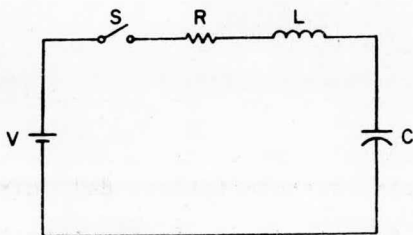


Fig. 1.6 Circuito RLC serie.

La ecuación integrodiferencial que define el comportamiento de este circuito es:

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (1.18)$$

aplicando la transformada de Laplace y despejando  $I(s)$  se obtiene:

$$I(s) = \frac{V}{L} \left[ \frac{1}{s^2 + (R/L)s + (1/LC)} \right] \quad (1.19)$$

Sustituyendo las ecs. 1.14 y 1.15 en la ec. 1.19.

$$I(s) = \frac{V}{L} \left[ \frac{1}{S^2 + (1/\tau_s)S + (1/T^2)} \right] \quad (1.20)$$

La ec. 1.20 es la transformada básica del circuito RLC serie. Evaluando la transformada con la ayuda del método de fracciones parciales se tiene:

$$I(s) = \frac{V}{L} \left[ \frac{A}{(S - D_1)} + \frac{B}{(S - D_2)} \right] \quad (1.21)$$

En donde  $D_1$  y  $D_2$  son las raíces de la ecuación cuadrática y las constantes A y B toman los siguientes valores:

$$A = \frac{1}{(D_1 - D_2)}$$

$$B = - \frac{1}{(D_1 - D_2)}$$

Sustituyendo A y B por su valor en la ec. 1.21.

$$I(s) = \frac{V}{L(D_1 - D_2)} \left[ \frac{1}{(S - D_1)} - \frac{1}{(S - D_2)} \right] \quad (1.22)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace a la ec. 1.22 se llega a:

$$i(t) = \frac{V}{L(D_1 - D_2)} \left[ e^{D_1 t} - e^{D_2 t} \right] \quad (1.23)$$

Donde las raíces son:

$$D_{1,2} = - \frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left( \frac{R}{2L} \right)^2 - \frac{1}{LC}} \quad (1.24)$$

Analizando la ec. 1.23 se observa que la forma de su solución depende del valor de las raíces (ec. 1.24), por lo que se tienen tres casos de solución que son:

$$\text{Caso 1 : Si } \left( \frac{R}{2L} \right)^2 > \frac{1}{LC}$$

$$\text{Caso 2 : Si } \left( \frac{R}{2L} \right)^2 < \frac{1}{LC}$$

$$\text{Caso 3 : Si } \left( \frac{R}{2L} \right)^2 = \frac{1}{LC}$$

En el primer caso las raíces son reales y diferentes, y el circuito se le conoce como SOBREAMORTIGUADO.

En el segundo caso las raíces son complejas, y por lo tanto el circuito es SUBAMORTIGUADO O BAJOAMORTIGUADO.

En el tercer caso las raíces son reales e iguales y el circuito se le conoce como CRITICAMENTE AMORTIGUADO.

Los tres casos anteriores se pueden expresar en función de la razón de amortiguamiento para el circuito RLC serie, y la resistencia crítica del mismo ( $R_c = 2 Z_o$ ), la cual se define como:

$$\lambda = \frac{R_c}{2R} \quad (1.25)$$

Por lo que los casos serán:

$$\text{Caso 1 : } \lambda < \frac{1}{2} \quad (1.26a)$$

$$\text{Caso 2 : } \lambda > \frac{1}{2} \quad (1.26b)$$

$$\text{Caso 3 : } \lambda = \frac{1}{2} \quad (1.26c)$$

**Análisis del caso 1 : SOBREAMORTIGUADO**

La ec. 1.24 para este caso toma la siguiente forma:

$$D_{1,2} = -\frac{1}{2\zeta_s} \left[ 1 \mp \sqrt{1 - 4\lambda^2} \right] \quad (1.27)$$

Sustituyendo las raíces de la ec.1.27 en la ec. 1.23 se tiene:

$$i(t) = \frac{V\zeta_s}{L\sqrt{1-4\lambda^2}} e^{-(1/2\zeta_s)t} \left[ \frac{e^{\sqrt{1-4\lambda^2}(1/2\zeta_s)t}}{e^{-\sqrt{1-4\lambda^2}(1/2\zeta_s)t}} \right] \quad (1.28)$$

La ec. anterior se puede expresar en función del seno hiperbólico como:

$$i(t) = \frac{2V\zeta_s}{L\sqrt{1-4\lambda^2}} e^{-(1/2\zeta_s)t} \sinh \sqrt{1-4\lambda^2}(1/2\zeta_s)t \quad (1.29)$$

**Análisis del caso 2 : SUBAMORTIGUADO.**

Para este caso la ec. 1.24 toma la siguiente forma.

$$D_{1,2} = - \frac{1}{2\zeta s} \left[ 1 \mp j\sqrt{(4\lambda^2 - 1)} \right] \quad (1.30)$$

Sustituyendo la ec. 1.30 en la ec. 1.23

$$i(t) = \frac{V\zeta s}{jL\sqrt{(4\lambda^2 - 1)}} e^{-(1/2\zeta s)t} \left[ e^{j\sqrt{(4\lambda^2 - 1)}(1/2\zeta s)t} - e^{-j\sqrt{(4\lambda^2 - 1)}(1/2\zeta s)t} \right] \quad (1.31)$$

Aplicando relaciones trigonométricas se tiene que:

$$i(t) = \frac{2V\zeta s}{L\sqrt{(4\lambda^2 - 1)}} e^{-(1/2\zeta s)t} \text{Sen}\sqrt{(4\lambda^2 - 1)}(1/2\zeta s)t \quad (1.32)$$

**Análisis del caso 3 : CRITICAMENTE AMORTIGUADO**

Para este caso la ec.1.23 conduce a la ec. 1.29 solo que debe expresarse en función de la serie de Maclaurin para un seno hiperbólico y la obtención del limite cuando  $\lambda$  tiende a 1/2. 0 sea

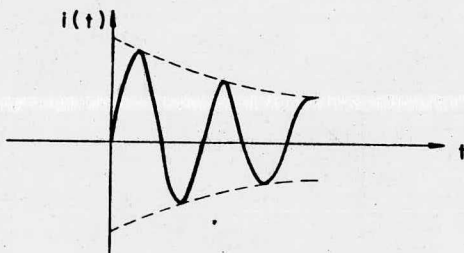
$$i(t) = \frac{2VZ_s}{L} e^{-(1/2\zeta_s)t} \frac{\text{Senh}\sqrt{(1 - 4\lambda^2)}(1/2\zeta_s)t}{\sqrt{(1 - 4\lambda^2)}}$$

lím  $\rightarrow (1/2)$

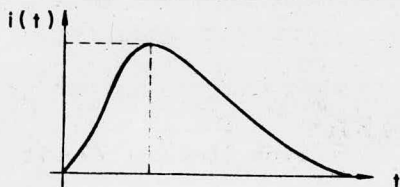
Con lo que se obtiene:

$$i(t) = \frac{V}{L} t e^{-(1/2\zeta_s)t} \quad (1.33)$$

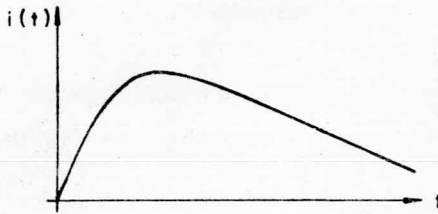
Las gráficas correspondientes a las ecuaciones 1.29, 1.32, 1.33 se ilustran en la figura 1.7



a) Bajoamortiguado



b) Críticamente amortiguado



c) Sobreamortiguado

Fig. 1.7 Grados de amortiguamiento

En las ecs. obtenidas para cada caso se observa que los terminos  $t$  y  $\zeta_s$  aparecen juntos, por lo que basandose en las ecs. 1.16, 1.17 y 1.25 se llega a las siguientes expresiones:

$$\frac{t}{2\zeta_s} = \frac{t}{2\lambda T} = \frac{t'}{2\lambda} \quad (1.34a)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{\zeta_s}{L} = \frac{\lambda}{Z_0} \quad (1.34b)$$

Sustituyendo las ecs. 1.34 en las ecs. 1.29, 1.32 y 1.33 se tiene:

$$i(t) = \frac{2V\lambda}{Z_0\sqrt{(1-4\lambda^2)}} e^{-(1/2\lambda)t'} \sinh\sqrt{(1-4\lambda^2)}(1/2\lambda)t' \quad (1.35a)$$

$$i(t) = \frac{2V\lambda}{Z_0\sqrt{(4\lambda^2-1)}} e^{-(1/2\lambda)t'} \text{Sen}\sqrt{(4\lambda^2-1)}(1/2\lambda)t' \quad (1.35b)$$

$$i(t) = \frac{V}{Z_0} t' e^{-(1/2\lambda)t'} \quad (1.35c)$$

Se observa en las ecs. 1.35 que la amplitud pico máxima de la senoide es de un valor de  $(V/Z_0)$ , y obteniendo el valor por unidad de estas ecs. se tiene:

$$i(t) \text{ p.u.} = f(\lambda) = \frac{i(t)\text{máx}}{(V/Z_0)} \quad (1.36)$$

Las cuales se representan en función de  $(\lambda)$  como Sigue:

$$f(\lambda) = \frac{2\lambda}{\sqrt{(1-4\lambda^2)}} e^{-(1/2\lambda)t'} \text{senh}\sqrt{(1-4\lambda^2)}(1/2\lambda)t' \quad (1.37a)$$

$$f(\lambda) = \frac{2\lambda}{\sqrt{(4\lambda^2-1)}} e^{-(1/2\lambda)t'} \text{Sen}\sqrt{(4\lambda^2-1)}(1/2\lambda)t' \quad (1.37b)$$

$$f(\lambda) = t' e^{-(1/2\lambda)t'} \quad (1.37c)$$

Recuerdese que el análisis de los tres casos aquí vistos se refieren a la existencia de un amortiguamiento en la



respuesta.

Ahora bien para el caso en que no existe amortiguamiento (cuando  $\lambda \rightarrow \infty$ ) la respuesta será:

$$i(t) = \text{Sen } t' \quad (1.38)$$

p.u.

### 1.1.3.2 Circuito RLC paralelo

Las ecuaciones para este circuito se obtienen haciendo el análisis de las ecs. 1.27, en donde se sustituye  $\lambda$  por  $1/\eta$  y  $\delta_s$  por  $\delta_p$  se usan identidades auxiliares como:

$$\eta = \frac{\delta_p}{T} ; \quad \frac{\delta_p}{L} = \frac{\eta}{Z_0} ; \quad t' = \frac{t}{T}$$

para sustituir después en la ec. 1.23 dando como resultado las sig.ecs.

$$f(\eta) = \frac{2\eta}{\sqrt{1-4\eta^2}} e^{-(1/2\eta)t'} \text{Senh} \sqrt{(1-4\eta^2)} (1/2\eta)t' \quad (1.39a)$$

$$f(\eta) = \frac{2\eta}{\sqrt{4\eta^2-1}} e^{-(1/2\eta)t'} \text{Sen} \sqrt{(4\eta^2-1)} (1/2\eta)t' \quad (1.39b)$$

$$f(\eta) = t' e^{-(1/2\eta)t'} \quad (1.39c)$$

La fig. 1.8 muestra una familia de curvas en función de  $\eta$  para visualizar la forma de la corriente del circuito mostrado en la fig. 1.5a para diferentes grados de amortiguamiento.

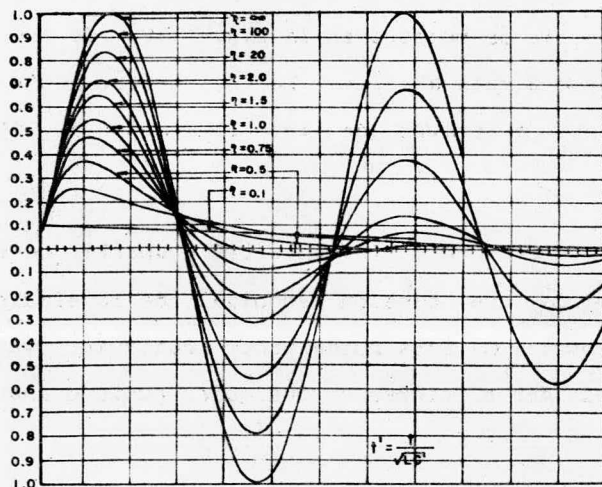


Fig. 1.8 Familia de curvas en función de  $\eta$  para apreciar el grado de amortiguamiento de la fig. 1.5(a)

## 1.2 TRANSITORIOS DE CIERRE CON EXCITACION DE C.A.

En esta sección se analizan los transitorios producidos por el cierre de interruptores en los circuitos que se mencionaron al inicio del capítulo, excitados con fuentes de corriente alterna.

### 1.2.1 Análisis del circuito RL serie.

El circuito RL serie se muestra en la fig. 1.9. Se observa que el interruptor S está abierto. Lo cual quiere decir que no fluye corriente a través de los elementos de dicho circuito.

El interruptor S cierra en el instante  $t=0$  y a partir de este momento se aplica una tensión senoidal de la siguiente forma:  $V = V \text{ sen}(wt + \Theta)$  Esta puede tener cualquier valor, esto es, se puede dar el cierre en cualquier punto o ángulo.

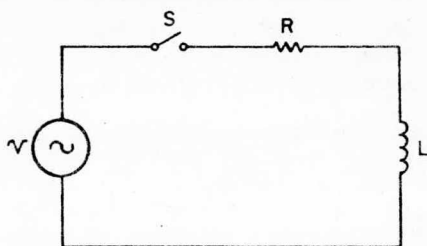


Fig. 1.9 Circuito RL serie

La ecuación que describe el comportamiento del circuito en

el instante que el interruptor cierra es:

$$\frac{di}{dt} + \frac{Ri}{L} = \frac{V}{L} \text{ sen } (wt + \Theta) \quad (1.40)$$

Transformando al dominio de Laplace y despejando  $I(s)$  se tiene:

$$I(s) = \frac{V}{L} \left[ \frac{S \text{ sen } \Theta + w \text{ cos } \Theta}{(S^2 + w^2)(S + (R/L))} \right] \quad (1.41)$$

Expandiendo en fracciones parciales la ec. 1.42 se tiene:

$$I(s) = \frac{V}{L} \left[ \frac{S \text{ sen } \Theta + w \text{ cos } \Theta}{(S^2 + w^2)(S + (R/L))} \right] = \frac{V}{L} \left[ \frac{A}{(S + (R/L))} + \frac{BS + C}{(S^2 + w^2)} \right] \quad (1.42)$$

El sistema de ecuaciones simultaneas obtenido de las ecs. 1.41 y 1.42 es:

$$\begin{aligned} A + B &= 0 \\ B(R/L) + C &= \text{sen } \Theta \\ A w^2 + C(R/L) &= w \text{ cos } \Theta \end{aligned} \quad (1.43)$$

Resolviendo el sistema de ecs. 1.43 se obtiene:

$$A = -(1/Z^2)(RL \operatorname{sen} \theta - L w \operatorname{cos} \theta)$$

$$B = (1/Z^2)(RL \operatorname{sen} \theta - L w \operatorname{cos} \theta)$$

$$C = (1/Z^2)(w L \operatorname{sen} \theta - RL w \operatorname{cos} \theta)$$

Donde:

$$Z = \sqrt{R^2 + w^2 L^2}$$

Sustituyendo ahora los valores de A, B y C en la ec. 1.42 y aplicando la transformada inversa de Laplace se obtiene la respuesta en el tiempo para la corriente  $i(t)$  y esta dada en la ec. 1.44

$$i(t) = \frac{V}{\sqrt{R^2 + w^2 L^2}} \left[ \operatorname{sen}(wt + \theta - \phi) - \operatorname{sen}(\theta - \phi) e^{-(R/L)t} \right] \quad \text{-----(1.44)}$$

Donde:

$$\phi = \operatorname{Tang}^{-1} \left[ \frac{wL}{R} \right]$$

La ec. anterior se puede expresar como la suma de las componentes de estado estable y transitorio, o sea.

$$i(t) = i_e(t) + i_r(t)$$

En donde respectivamente se tiene:

$$i_e(t) = \frac{V}{\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)}} \text{sen}(\omega t + \theta - \phi) \quad (1.45)$$

$$i_r(t) = -\frac{V}{\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)}} \text{sen}(\theta - \phi) e^{-(R/L)t} \quad (1.46)$$

La ec. 1.44 se representa gráficamente en la fig 1.10 y muestra las dos componentes mencionadas.

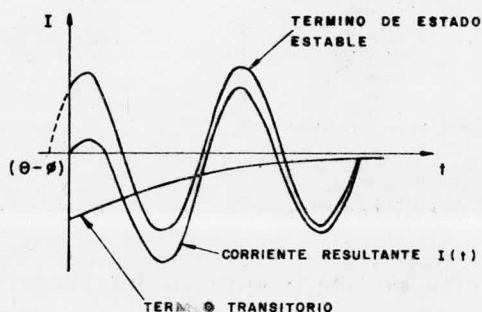


Fig 1.10 corriente alterna asimétrica

(ec. 1.44)

Para el caso especial cuando el interruptor cierra en el instante  $\theta = \phi$  el término transitorio será cero y la forma de la corriente es simétrica. Por otra parte si el interruptor cierra cuando  $(\theta - \phi)$  tiene un valor de  $\pm \pi/2$  el término transitorio tomará un valor máximo en amplitud y el pico de corriente se aproximará a 2 veces la amplitud pico de la corriente de estado estable.

### 1.2.2 Análisis del circuito RC serie.

El circuito RC serie se muestra en la figura 1.11 el cual en el instante  $t=0$  cierra el interruptor S y a partir de este momento se aplica una fuente de tensión senoidal de la forma:  $V \text{ Sen } (\omega t + \theta)$ .

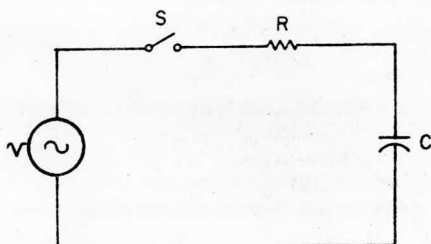


Fig. 1.11 Circuito RC serie

La ecuación que describe el comportamiento del circuito con el interruptor cerrado en términos de la corriente es:

$$Ri + \frac{1}{C} \int i \, dt = V \text{ sen } (\omega t + \theta) \quad (1.47)$$

Derivando ambos lados de la ec. 1.47 y aplicando la transformada de Laplace se obtiene:

$$I(s) = \frac{\omega V}{R} \left[ \frac{S \cos \theta - \omega \text{ sen } \theta}{(S^2 + \omega^2)(S + (1/RC))} \right] \quad (1.48)$$

Expandiendo en fracciones parciales la ec. 1.48

$$I(s) = \frac{wV}{R} \left[ \frac{A}{(S+(1/RC))} + \frac{BS + C}{(S^2 + w^2)} \right] \quad (1.49)$$

De La ec. anterior se obtiene el siguiente sistema de ecs.

$$A + B = 0$$

$$(B/RC) + C = \cos \Theta \quad (1.50)$$

$$Aw^2 + (C/RC) = -w \sin \Theta$$

Obteniendo el valor de las constantes de 1.50 resulta

$$A = - \left[ \frac{(1/RC) \cos \Theta + w \sin \Theta}{Z^2 w^2} \right] R^2$$

$$B = \left[ \frac{(1/RC) \cos \Theta + w \sin \Theta}{Z^2 w^2} \right] R^2$$

$$C = \left[ \frac{w^2 \cos \Theta - (w/RC) \sin \Theta}{Z^2 w^2} \right] R^2$$

Sustituyendo los valores de las constante A,B y C en la ec. 1.49, aplicando transformada inversa de Laplace y realizando manipulaciones algebraicas se llega a:

$$i(t) = \frac{V}{Z} \left[ \sin (wt + \Theta - \phi) - \sin (\Theta + \phi) e^{-(1/RC)t} \right] \quad (1.51)$$

Donde:

$$\phi = \text{Tang}^{-1} \left[ \frac{1}{wRC} \right]$$



Observese que también esta ecuación esta compuesta por dos partes, el estado estable y transitorio las cuales son:

$$i_{\epsilon}(t) = \frac{V}{Z} \text{ sen } (wt + \Theta - \phi)$$

$$i_{\tau}(t) = \frac{V}{Z} \text{ sen } (\Theta + \phi) e^{-(1/RC)t}$$

### 1.2.3 Análisis del circuito RLC serie

En la figura 1.12 se muestra el circuito RLC serie con excitación senoidal ( $V \text{ Sen } (wt + \Theta)$ ). El interruptor S es cerrado en el instante  $t=0$

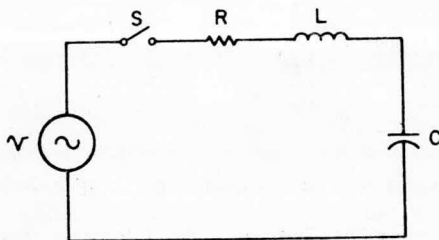


Fig 1.12 Circuito RLC serie

La ecuación integrodiferencial que describe el comportamiento del circuito de la fig 1.12 para la condición descrita es la siguiente:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i' dt = V \text{ sen } (wt + \theta) \quad (1.52)$$

Derivando ambos lados de la ec. 1.52 se obtiene:

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{i}{LC} = \frac{wV}{L} \cos (wt + \theta) \quad (1.53)$$

La ecuación 1.53 es una ec. diferencial de segundo grado, la cual se resolverá por el método de coeficientes indeterminados, en la aplicación de este método se elige una solución particular de acuerdo a el tipo de la ecuación a resolver, para este caso es:

$$\begin{aligned} i &= A \cos (wt + \theta) + B \text{ sen } (wt + \theta) \\ i' &= -wA \text{ sen } (wt + \theta) + wB \cos (wt + \theta) \\ i'' &= -w^2A \cos (wt + \theta) - w^2B \text{ sen } (wt + \theta) \end{aligned} \quad (1.54)$$

Sustituyendo las ecs. 1.54 en la ec. 1.53 se tiene:

$$\begin{aligned} \text{sen } (wt + \theta) \left[ B \left( \frac{1}{LC} - w^2 \right) - \frac{ARw}{L} \right] + \cos (wt + \theta) \\ \left[ A \left( \frac{1}{LC} - w^2 \right) + \frac{BRw}{L} \right] = \frac{Vw}{L} \cos (wt + \theta) \end{aligned} \quad (1.55)$$

Igualando los coeficientes de la ec. 1.55 se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones

$$\begin{aligned}
 B \left[ \frac{1}{LC} - \omega^2 \right] - A \frac{\omega R}{L} &= 0 \\
 A \left[ \frac{1}{LC} - \omega^2 \right] + B \frac{\omega R}{L} &= \frac{V\omega}{L}
 \end{aligned}
 \tag{1.56}$$

Resolviendo el sistema de ecs. 1.56 se obtienen los valores de las constantes A y B y estos son:

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{[(1/\omega C) - \omega L]V}{R^2 + ((1/\omega C) - \omega L)^2} \\
 B &= \frac{VR}{R^2 + ((1/\omega C) - \omega L)^2}
 \end{aligned}$$

Sustituyendo los valores de las constantes (A y B) en la ec. de la solución particular supuesta (ecs. 1.54) y representandola en una sola función senoidal se llega a:

$$i(t) = \frac{V}{\sqrt{R^2 + [(1/\omega C) - \omega L]^2}} \text{sen} \left[ \omega t + \Theta + \text{Tang}^{-1} \frac{[(1/\omega C) - \omega L]}{R} \right]$$

-----(1.57)

La ecuación anterior representa la corriente de estado estable.

La solución del estado transitorio esta dada por:

$$i(t) = K_1 e^{D_1 t} + K_2 e^{D_2 t}
 \tag{1.58}$$

$D_1$  y  $D_2$  son las raíces de la ec. cuadrática y son:

$$D_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

#### ANÁLISIS PARA EL CASO BAJOMORTIGUADO

Haciendo:

$$\alpha = \frac{R}{2L}$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}$$

Por lo tanto la ec. 1.58 toma la siguiente forma

$$i(t) = e^{-\alpha t} \left[ K_1 e^{j\beta t} + K_2 e^{-j\beta t} \right] \quad (1.59)$$

La solución de la ec. 1.58 depende de los valores de  $D_1$  y  $D_2$  como se observó en la sección anterior

Sustituyendo los valores de las raíces en la ec. 1.59 y realizando manipulaciones algebraicas y trigonométricas se obtiene:

$$i(t) = e^{-\alpha t} \left[ C_1 \cos \beta t + C_2 \sen \beta t \right] \quad (1.60)$$

Por lo tanto la ec. de la respuesta completa del circuito RLC con excitación senoidal esta dada por la ec. 1.61.

$$i(t) = \frac{V}{R + (1/\omega C) - \omega L} \operatorname{sen} \left[ \omega t + \theta + \operatorname{Tang}^{-1} \left[ \frac{(1/\omega C) - \omega L}{R} \right] \right] + e^{-\alpha t} [C_1 \cos \beta t + C_2 \operatorname{sen} \beta t] \quad (1.61)$$

$C_1$  y  $C_2$  son constantes que dependen de las condiciones iniciales del circuito, para este caso se considera que:

$$V_c(0) = 0 ; i(0) = 0$$

Para dichas condiciones la ec. 1.61 toma la siguiente forma

$$i(t) = \frac{V}{Z} \left\{ \operatorname{sen} (\omega t + \theta + \phi) - e^{-\alpha t} \left[ \operatorname{sen} (\theta + \phi) \cos \beta t \right] + \left[ \frac{-\alpha}{\beta} \operatorname{sen} (\theta + \phi) + \frac{\omega}{\beta} \cos (\theta + \phi) \right] \operatorname{sen} \beta t \right\} + e^{-\alpha t} \frac{V}{L\beta} \operatorname{sen} \theta \operatorname{sen} \beta t \quad (1.62)$$

Nota: el valor de  $\phi$  es:

$$\phi = \operatorname{Tang}^{-1} \left[ \frac{(1/\omega C) - \omega L}{R} \right]$$

La ecuación 1.62 es la solución del circuito RLC con las condiciones iniciales antes mencionadas y para el caso en que el sistema es oscilatorio o subamortiguado.

Para los otros dos casos se sigue de la misma forma y los

resultados obtenidos para las mismas condiciones iniciales que se utilizaron en la sección anterior son:

#### CASO SOBREAMORTIGUADO

$$\begin{aligned}
 i(t) = & \frac{V}{Z} \operatorname{sen}(wt + \theta + \phi) + \frac{1}{(D_1 - D_2)} \left[ \frac{V}{L} \operatorname{sen} \theta - \frac{Vw}{Z} \cos(\theta + \phi) \right. \\
 & \left. + \frac{D_2 V}{Z} \operatorname{sen}(\theta + \phi) \right] e^{D_1 t} + \frac{1}{(D_1 - D_2)} \left[ \frac{-V}{L} \operatorname{sen} \theta \right. \\
 & \left. + \frac{Vw}{Z} \cos(\theta + \phi) - \frac{D_1 V}{Z} \operatorname{sen}(\theta + \phi) \right] e^{D_2 t} \quad (1.63)
 \end{aligned}$$

#### CASO CRITICAMENTE AMORTIGUADO

$$\begin{aligned}
 i(t) = & \frac{V}{Z} \left[ \operatorname{sen}(wt + \theta + \phi) - e^{Dt} \left[ \operatorname{sen}(\theta + \phi)(1 - Dt) \right. \right. \\
 & \left. \left. + w \cos(\theta + \phi) \right] \right] + \frac{V}{L} t e^{Dt} \operatorname{sen} \theta \quad (1.64)
 \end{aligned}$$

#### 1.2.4 Análisis del circuito LC serie

El circuito LC serie con excitación  $V = V \operatorname{sen} wt$  se muestra en la figura 1.13, la corriente de este circuito será puramente reactiva (inductiva o capacitiva) dependiendo del valor de los elementos del circuito (L y C).

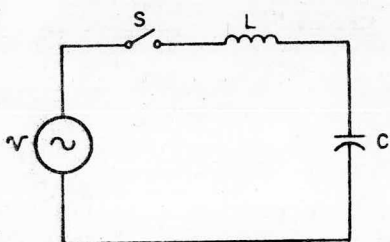


Fig. 1.13 Circuito LC serie  
con excitación senoidal

La ecuación que describe el comportamiento de este circuito después de que el interruptor S cierra es:

$$L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = V \text{ sen } \omega t \quad (1.65)$$

La ec. 1.66 se puede expresar también como:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{i}{LC} = \frac{V\omega}{L} \cos \omega t \quad (1.66)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ec. 1.66 resulta:

$$I(S) = \frac{V\omega}{L} \left[ \frac{S}{(S^2 + \omega^2)(S^2 + (1/LC))} \right] \quad (1.67)$$

Expandiendo en fracciones parciales la ec. 1.67 resulta:

$$I(S) = \frac{Vw}{L} \left[ \frac{AS + B}{(S^2 + w^2)} + \frac{C}{(S - j(1/\sqrt{LC}))} + \frac{D}{(S + j(1/\sqrt{LC}))} \right] \quad (1.68)$$

Las constantes incluidas en la ecuación anterior toman los valores que a continuación se muestran:

$$A = - \frac{1}{(w^2 + (1/LC))}$$

$$B = 0$$

$$C = \frac{1}{2(w^2 + (1/LC))}$$

$$D = \frac{1}{2(w^2 + (1/LC))}$$

Habiendo determinado las constantes se procede a sustituirlas en la ec. 1.68 por lo que resulta:

$$I(S) = \frac{Vw}{(w^2 - (1/LC))L} \left[ - \frac{S}{(S^2 + w^2)} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{(S - j(1/\sqrt{LC}))} + \frac{1}{(S + j(1/\sqrt{LC}))} \right) \right] \quad (1.69)$$

Aplicando la transformada inversa de Laplace a la ecuación anterior se obtiene

$$i(t) = \frac{V}{(wL - (1/wC))} \left[ \cos \sqrt{(1/LC)}t - \cos wt \right] \quad (1.70)$$



La ecuación 1.71 es la respuesta completa del circuito LC en el dominio del tiempo, se observa que en dicha ecuación no existe efecto de amortiguamiento, por lo tanto, la respuesta permanente constará de componentes de frecuencia diferentes a la frecuencia de alimentación.

## CAPITULO 2

### TRANSITORIOS NORMALES Y ANORMALES

En el capítulo 1 se determinaron las respuestas transitoria y permanente de configuraciones de circuitos simples, después del cierre del interruptor.

Los transitorios así considerados, se les denomina transitorios normales. Este tipo de transitorios son los que se producen en el cierre o apertura de un circuito que contiene elementos conservadores de energía y donde las condiciones iniciales en el instante de la maniobra son nulas. Por el contrario se denominan transitorios anormales aquellos que se producen cuando en el circuito considerado las condiciones iniciales del transitorio no son nulas, esto quiere decir que los elementos conservativos (L y C) almacenan energía en campo eléctrico y magnético respectivamente.

En el presente capítulo se consideran algunos transitorios de restablecimiento y se discutirá también los transitorios anormales como el fenómeno de supresión de corrientes, desconexión de capacitancias, reignición de corrientes y el fenómeno de las corrientes de magnetización (inrush).

## 2.1 TRANSITORIOS NORMALES EN LA APERTURA DE INTERRUPTORES.

Un transitorio de tensión normal de apertura es aquel que se presenta en la eliminación de fallas.

El análisis para la determinación de la tensión transitoria de restablecimiento (TTR) se realiza empleando la configuración mostrada en la figura 2.1

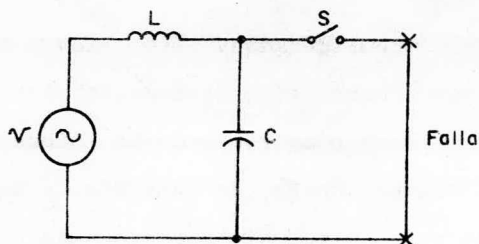


Fig 2.1 Circuito para estudiar la TTR

Se supone que el interruptor del circuito esta inicialmente cerrado, esto es, la falla se ha establecido.

Si la tensión de excitación del circuito se define como:

$$V = V_{\text{máx}} \cos \omega t \quad (2.1)$$

La corriente de falla es entonces:

$$i_f = \frac{V}{\omega L} \sin \omega t = I_f \sin \omega t \quad (2.2)$$

Donde:

$$I_f = \frac{V}{\omega L}$$

Cuando el interruptor abre, el flujo de corriente de falla se interrumpe, así una tensión conocida como TENSION TRANSITORIA DE RESTABLECIMIENTO aparecerá a través de los contactos del interruptor.

Si la interrupción se efectúa en el cero de corriente como se muestra en la figura 2.2, la tensión transitoria de restablecimiento en el instante que la corriente pasa por su cero natural alcanzará un valor máximo de dos veces la tensión pico del sistema.

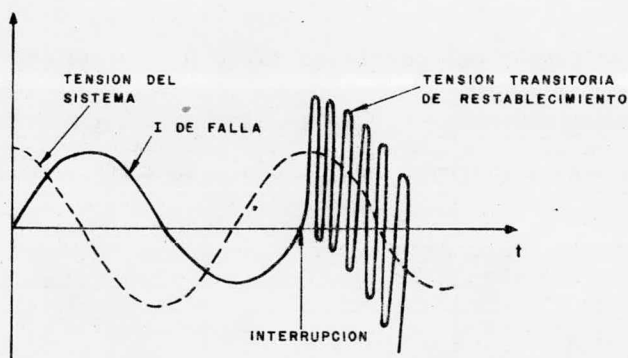


Fig. 2.2 Tensión transitoria de restablecimiento a través de los contactos del interruptor.

En el instante en que el interruptor abre y cuando se logra la interrupción de la corriente, la ecuación que describe el comportamiento del circuito es:

$$V_{\text{máx}} \cos \omega t = L \frac{di}{dt} + V_c \quad (2.3)$$

Reescribiendo la expresión 2.3

$$\frac{d^2 V_c}{dt^2} + \frac{V_c}{LC} = \frac{V_m}{LC} \cos \omega t \quad (2.4)$$

Así la ec. 2.4 representa el comportamiento del circuito de la fig. 2.1 después de que el interruptor ha sido abierto. Aplicando la transformada de laplace a la ec. 2.4 se tiene:

$$V(S) = \frac{V_m}{LC} \left[ \frac{S}{(S^2 + \omega^2)(S^2 + (1/LC))} \right] \quad (2.5)$$

Expandiendo en fracciones parciales la ec 2.5 se obtiene:

$$\left[ \frac{V_m}{LC} \frac{S}{(S^2 + \omega^2)(S^2 + (1/LC))} \right] = \left[ \frac{AS + B}{S^2 + \omega^2} + \frac{C}{S - j(1/\sqrt{LC})} + \frac{D}{S + j(1/\sqrt{LC})} \right] \frac{V_m}{LC} \quad (2.6)$$

Las constantes A, B, C y D son:

$$A = \frac{1}{(\omega_c^2 - \omega^2)}$$

$$B = 0$$

$$C = - \frac{1}{2(\omega_c^2 + \omega^2)}$$

$$D = - \frac{1}{2(\omega_0^2 + \omega^2)}$$

Sustituyendo los valores de A, B, C y D en la ec. 2.6 se llega a la ecuación 2.7

$$V(S) = \frac{V_m}{LC} \frac{1}{(\omega_0^2 + \omega^2)} \left[ \frac{S}{(S^2 + \omega^2)} - \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{(S - j\omega_0)} + \frac{1}{(S + j\omega_0)} \right] \right] \quad (2.7)$$

La ecuación 2.7 representa la tensión a través de los contactos del interruptor en el dominio de Laplace. Aplicando la transformada inversa de Laplace e identidades trigonométricas se obtiene:

$$V_c(t) = V_m \frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)} \left[ \cos \omega t - \cos \omega_0 t \right] \quad (2.8)$$

Considerando que:  $\omega_0^2 \gg \omega^2$

Entonces:

$$\frac{\omega_0^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)} = 1$$

Por lo tanto:

$$V_c(t) = V_m \left[ 1 - \cos \omega_0 t \right] \quad (2.9)$$

Así la ecuación 2.9 representa la tensión a través de los contactos del interruptor y por lo tanto la tensión transitoria de restablecimiento. En dicha ec. se observa

que la tensión puede alcanzar un valor de hasta dos veces el valor pico de la tensión del sistema.

### 2.1.2 Transitorios producidos por la desconexión de resistencias

En ciertos tipos de interruptores sus contactos son puenteados por resistencias para dos fines:

a).- En interruptores con varios contactos las resistencias son usadas para distribuir uniformemente la tensión transitoria a través de los contactos. El objetivo es alcanzado cuando el resistor que se conecta en paralelo con los contactos es de un valor óhmico alto. La única restricción existente es que éste debe ser de un valor bajo comparado con la reactancia capacitiva existente entre los contactos del interruptor a la frecuencia natural del transitorio de restablecimiento.

b).- Reducir la severidad del transitorio introduciendo amortiguamiento en el instante en que se logra la interrupción.

La figura 2.3 muestra un circuito típico para estudiar la desconexión de resistencias.

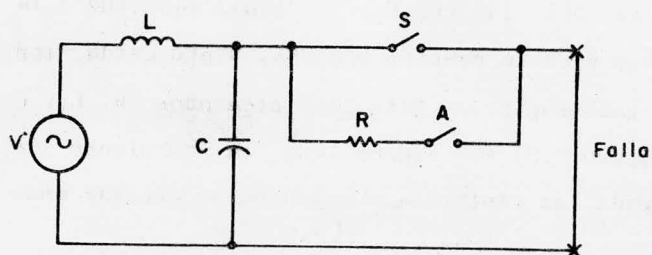


Fig. 2.3 Interruptor con sus contactos puenteados con resistencias para la apertura de fallas

Donde:

R es la resistencia utilizada para reducir la tensión transitoria de restablecimiento.

L es la inductancia del sistema.

C es la capacitancia parásita entre los contactos del interruptor.

S es el interruptor principal

A es el interruptor auxiliar

Cuando la corriente de falla ha sido interrumpida, una corriente residual seguirá fuyendo a través de R, la cual posteriormente se eliminará con el interruptor auxiliar A.

Para determinar el valor de R y alcanzar los objetivos mencionados se utilizará el método de inyección de



corriente. Este método consiste en inyectar una corriente en los contactos del interruptor de igual magnitud a la corriente de falla pero en sentido opuesto, visto desde los contactos del interruptor. Así los elementos R, L y C aparecen en paralelo. Si se supone que la corriente de falla interrumpida es simétrica, entonces se expresa como sigue:

$$I = V/\omega L \quad (2.10)$$

Aplicando el principio de superposición al circuito de la figura 2.3 se llega al siguiente circuito.

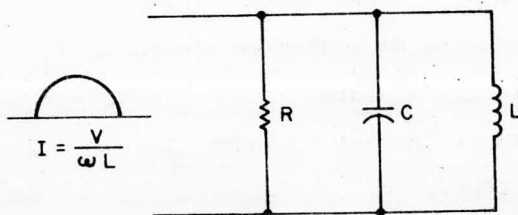


Fig. 2.4 Circuito equivalente obtenido de la aplicación del principio de superposición al circuito de la fig. 2.3

En el circuito de la figura 2.4, el período transitorio de interés es relativamente corto comparado con la duración de un medio ciclo de la corriente de falla, porque la frecuencia natural del circuito es mucho mayor que la frecuencia de la

fuente de excitación, es por esto que la corriente inyectada se puede tratar como una rampa de pendiente  $V/L$  amp./seg. o sea:

$$I = (V/L)t \quad (2.11)$$

De la ecuación anterior  $V$  es la tensión del sistema en el momento de interrupción.

La ecuación que define el comportamiento del circuito de la fig. 2.4 es la siguiente:

$$-\frac{d^2 V_c}{dt^2} + \frac{1}{\tau_s} \frac{dV_c}{dt} + \frac{V_c}{T^2} = \frac{I'}{C} \quad (2.12)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ec. 2.12 y despejando  $V(S)$  se llega a:

$$V(S) = \left[ \frac{1}{S(S^2 + (1/\tau_s)S + (1/T^2))} \right] \frac{I'}{C} \quad (2.13)$$

Expandiendo en fracciones parciales la ec. 2.13 produce:

$$V(S) = \frac{I'}{C} \left[ \frac{A}{S} + \frac{B + CS}{(S^2 + (1/\tau_s)S + 1/T^2)} \right] \quad (2.14)$$

Las constantes  $A, B$  y  $C$  determinadas son:

$$A = T^2$$

$$B = -\frac{T^2}{\tau_s}$$

$$C = -T^2$$

Sustituyendo los valores de A, B y C en la ec. 2.14 se tiene:

$$V(S) = \frac{I'}{C} T^2 \left[ \frac{1}{S} - \frac{S}{(S^2 + (1/\bar{\epsilon}_p)S + (1/T^2)\bar{\epsilon}_p)} - \frac{1}{(S^2 + (1/\bar{\epsilon}_p)S + 1/T^2)} \right] \quad (2.15)$$

aplicando transformada inversa de Laplace término a término a la ecuación 2.15 se tiene que, la transformada del término  $1/S$  es 1 en tanto que para el término  $1/(S^2 + (1/\bar{\epsilon}_p)S + 1/T^2)$  su transformada inversa se desarrolló en el capítulo 1 y se obtuvo la respuesta para cada uno de los tres diferentes casos de amortiguamiento. Las ecuaciones están identificadas con los números 1.29, 1.32 y 1.33. (solo que se cambiará  $\lambda$  por  $\eta$  y  $\bar{\epsilon}_s$  por  $\bar{\epsilon}_p$ ) Aquí solo se tomará el caso cuando  $\eta < 1/2$ .

$$\frac{1}{(S^2 + (1/\bar{\epsilon}_p)S + (1/T^2))} = \frac{2\bar{\epsilon}_p}{\sqrt{4\eta^2 - 1}} e^{-t/2\bar{\epsilon}_p} \text{sen} \sqrt{4\eta^2 - 1} (t/2\bar{\epsilon}_p) \quad (2.16)$$

Para obtener la transformada inversa de Laplace de uno de los términos se considera la siguiente propiedad.

$$\frac{S}{(S^2 + (1/\bar{\epsilon}_p)S + 1/T^2)} = \frac{d}{dt} \frac{1}{(S^2 + (1/\bar{\epsilon}_p)S + 1/T^2)}$$

Por lo tanto derivando la expresión 2.16 se obtiene la

transformada inversa deseada.

$$\frac{S}{(S^2 + (1/\bar{\alpha}\rho)S + 1/T^2)} = e^{-(1/2\bar{\alpha}\rho)t} \left[ \cos\sqrt{(4\eta^2 - 1)}(1/2\bar{\alpha}\rho)t - \frac{\text{sen}\sqrt{(4\eta^2 - 1)}(1/2\bar{\alpha}\rho)t}{\sqrt{(4\eta^2 - 1)}} \right] \quad (2.17)$$

sustituyendo los valores de las transformadas inversas de Laplace obtenidas para la ec. 2.13 se obtiene finalmente:

$$\frac{1}{S(S^2 + (1/\bar{\alpha}\rho)S + 1/T^2)} = T^2 \left[ 1 - e^{-(1/2\bar{\alpha}\rho)t} \left[ \cos\sqrt{(4\eta^2 - 1)}(1/2\bar{\alpha}\rho)t + \frac{\text{sen}\sqrt{(4\eta^2 - 1)}(1/2\bar{\alpha}\rho)t}{\sqrt{(4\eta^2 - 1)}} \right] \right] \quad (2.18)$$

La ecuación 2.18 representa la tensión en por unidad a través de las terminales del circuito, y para su estudio se representa una familia de curvas en función de  $\eta$  y para diferentes valores de ésta. Dichas curvas se representan en la figura 2.5. Las cuales se determinaron por medio de la ec. 2.19.

$$f(\eta) = \left[ 1 - e^{-(1/2\eta)t'} \left[ \frac{\text{sen}\sqrt{(4\eta^2 - 1)}(1/2\bar{\alpha}\rho)t'}{\sqrt{(4\eta^2 - 1)}} + \cos\sqrt{(4\eta^2 - 1)}(1/2\eta)t' \right] \right] \quad (2.19)$$

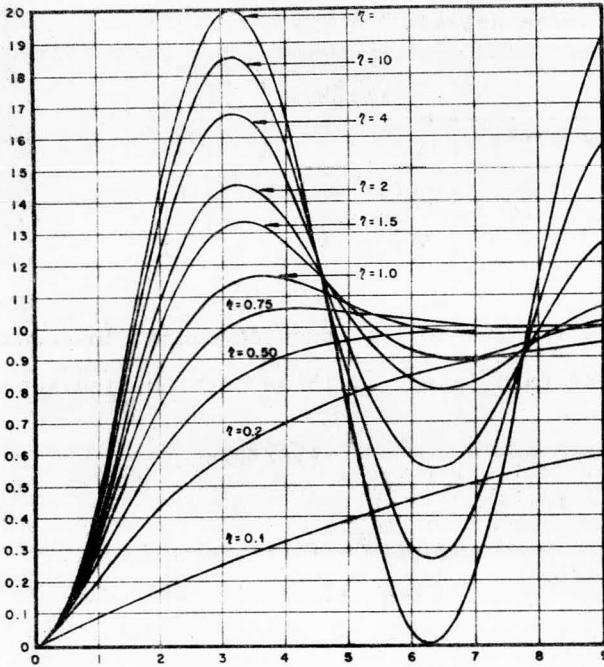


Fig. 2.5 Representación de la ec. 2.19 para diferentes valores de  $\eta$  .

Las curvas de la figura 2.5 muestran el efecto en la tensión transitoria de restablecimiento al introducir diferentes valores de resistencias en paralelo con los contactos del interruptor (variando  $\eta = R/Z_0$ ). Para mayor ilustración de este efecto, a continuación se da un ejemplo:

--Un sistema de 345 Kv. 25 MVA trifásico y un interruptor con seis contactos en serie con una capacidad interruptiva de 40,000 amperes.

Si no existe amortiguamiento la tensión transitoria de

restablecimiento alcanza un valor tan alto como 2 veces la tensión pico del sistema. Para este ejemplo la tensión transitoria de restablecimiento será:

$$2 \times 345\sqrt{2}/\sqrt{3} = 563 \text{ Kv.}$$

Para un sistema con neutro aterrizado, se supone que se decaea reducir la tensión al 70% de este valor por medio de resistores de preinserción.

De la figura 2.5 se obtiene el valor de  $\eta$  requerido, el cual es 1.8. Para el sistema de 345 Kv. y 40,000 A. de corriente de falla disponible, la reactancia a 60 Hz. será:

$$X_L = \omega L = \frac{\text{Kv}}{\text{KA}} = \frac{345}{40\sqrt{3}} = 5 \Omega$$

Por lo tanto la inductancia en milihenrios será:

$$L = 13.2 \text{ mH.}$$

Un valor típico de capacitancia para un bus de 345 Kv. A el cual el interruptor esta conectado puede ser de 25000 pf. por lo tanto la impedancia caracteristica resultante es:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1.32 \times 10^{-2}}{(2.5 \times 10^{-8})}} = 726 \Omega$$

como  $\eta = 1.8$  y  $Z_0 = 726$  y además anteriormente se definió a  $\eta = (R/Z_0)$ , por lo tanto R será:

$$R = \eta Z_0 = 1.8 \times 726 = 1307$$

Con este valor de resistencia se logra reducir el voltaje transitorio de restablecimiento al 70 % del valor que se obtendría sin amortiguamiento.

Finalmente cada uno de los seis contactos deben ser puenteados con resistencias de  $218 \Omega$ .

## 2.2 TRANSITORIOS ANORMALES

En esta sección se hace un estudio de los transitorios anormales que se mencionaron al inicio del capítulo, este tipo de transitorios pueden ser originados por el cierre o apertura de los interruptores en sistemas con carga atrapada.

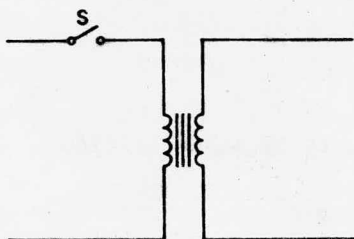
### 2.2.1 Supresión de corrientes.

Cuando una corriente relativamente pequeña es cortada por un interruptor, la estricta acción de supresión del arco del dispositivo puede provocar que la corriente sea llevada a cero antes de su cero normal, por lo cual a este fenómeno se le conoce como corte o supresión de corriente.

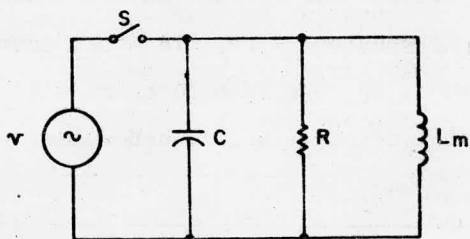
Esta supresión de corriente puede causar una sobretensión anormal debido a la energía magnética asociada con la corriente atrapada en el circuito.

El fenómeno de supresión de corrientes es frecuentemente

observado en los transformadores, cuando a estos se les aplica una tensión en su lado primario y el secundario queda en circuito abierto, en este caso circula una corriente conocida como corriente de magnetización, la cual toma la forma que se muestra en la figura 2.6c

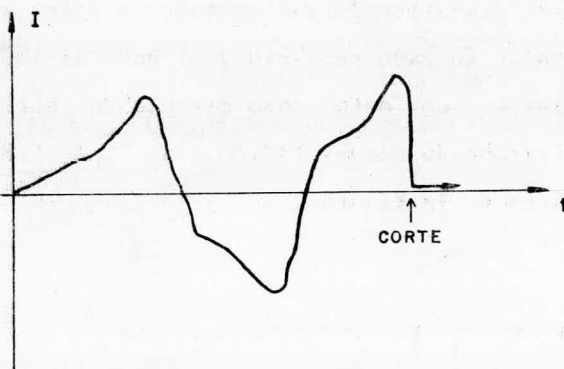


a) Transformador en vacío con un interruptor



b) Circuito equivalente efectivo





c) Forma de la corriente de magnetización

Fig. 2.6

En el momento en que ocurre la interrupción, la corriente instantánea es  $I_0$ , la cual está fluyendo en el devanado del transformador y está asociada con una cantidad de energía almacenada en el núcleo del transformador. Esta energía está dada por la expresión 2.20, la cual puede ser considerable, aún cuando la corriente  $I_0$  es solo el 1 o 2% de la corriente nominal de carga del transformador.

$$E = \frac{1}{2} L_m I_0^2 \quad (2.20)$$

Aquí la inductancia de magnetización  $L_m$  es muy alta. Cuando el interruptor suprime la corriente antes de su cero normal provoca que la corriente se desvíe hacia el capacitor, así la energía magnética del transformador es transferida hacia

el capacitor. Si el valor de la capacitancia es conocido, es posible calcular la tensión de carga en el capacitor por medio de la siguiente expresión.

$$\frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} Lm I_0^2$$

$$V = I_0 \sqrt{\frac{Lm}{C}} \quad (2.21)$$

En la ecuación 2.21 se aprecia que la tensión a través del devanado del transformador es el producto de la corriente instantánea por la impedancia característica del transformador.

Además esta tensión es independiente de la tensión del sistema, puesto que el interruptor está abierto. Para tener una idea más clara de este fenómeno, se considera un transformador de 1000 KVA. para el cual la corriente de magnetización es típicamente de 1.5 A.

Así su inductancia magnetizante está dada por la siguiente expresión:

$$Lm = \frac{V}{\omega I_m} = \frac{13.8 \times 10^3}{\sqrt{3} (377)(1.5)} = 14 \text{ H.}$$

Por otra parte, el valor de la capacitancia efectiva dependerá del tipo de aislamiento y devanado del

transformador, pero se puede considerar que la capacitancia efectiva se encuentra en el rango de 1000 a 7000 pf. Considerando un valor de 5000 pf. para la capacitancia parásita, la impedancia característica  $Z_0$  será entonces:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_m}{C}} = \sqrt{\frac{14}{5 \times 10^{-9}}} = 52915 \Omega$$

Anteriormente se mencionó que la corriente de magnetización tiene un valor aproximado de 1.5 A, pero puede alcanzar un valor de hasta 2.5 A. debido a la distorsión introducida por las armónicas presentes en la corriente.

Calculando la tensión entre las terminales del devanado del transformador se tiene:

$$V = I_m Z_0 = (52915)(2.5) = 132.28 \text{ Kv.}$$

Lo cual es verdaderamente anormal. En la práctica la tensión transitoria no alcanza un valor cercano a 132.28 Kv. debido a que una fracción de la energía atrapada en el núcleo es disipada en el momento de la interrupción. Un análisis más formal como el antes descrito se basa en el circuito de la figura 2.6b. Cuando el interruptor esta abierto, se tiene que:

$$I_c + I_R + I_{L_m} = 0 \quad (2:22)$$

Expresando cada uno de los términos de la ec. 2.22 en función de sus tensiones:

$$\frac{d^2 V}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dV}{dt} + \frac{V}{LmC} = 0 \quad (2.23)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ec 2.23. Resulta

$$V(S) \left[ S^2 + \frac{S}{RC} + \frac{1}{LmC} \right] = \left( S + \frac{1}{RC} \right) V(0) + V'(0) \quad (2.24)$$

Donde:

$V(0)$  Es el valor de la tensión cuando el interruptor abre.

$V'(0)$  Es la razón de cambio con el tiempo.

$$V'(0) = \frac{Ic(0)}{C} = \frac{Io}{C} \quad (2.25)$$

Por lo tanto la expresión 2.24 toma la siguiente forma:

$$V(S) = V(0) \frac{S}{(S^2 + (S/RC) + (1/CLm))} + \frac{V(0)}{RC} \left[ \frac{1}{(S^2 + (S/RC) + (1/CLm))} \right] + \frac{Io}{C} \left[ \frac{1}{(S^2 + (S/RC) + (1/CLm))} \right] \quad (2.26)$$

Las funciones en el dominio de Laplace de la ec. 2.26 ya han sido calculadas y están dadas por las expresiones 2.17 y 2.16 respectivamente.

Resolviendo los dos primeros términos de la ec. 2.26 y además considerando que  $\eta$  es muy grande se tiene:

$$V(t) e^{-\frac{t}{2RC}} \cos \sqrt{4\eta^2 - 1} \left( \frac{t}{2RC} \right) \quad (2.27)$$

La expresión anterior representa el transitorio normal que podría ocurrir si el transformador fuese desconectado de la fuente de alimentación sin supresión de corriente, o sea, es el transitorio posterior a la descarga de la capacitancia del transformador a través de la inductancia de magnetización. El tercer término, es una consecuencia directa del corte de corriente que produce una sobretensión anormal y esta dada por la siguiente expresión:

$$\frac{2 I_0 R}{\sqrt{4\eta^2 - 1}} e^{-\frac{t}{2RC}} \operatorname{sen} \sqrt{4\eta^2 - 1} \left( \frac{t}{2RC} \right) \quad (2.28)$$

Cuando  $\eta \rightarrow \infty$  (caso no amortiguado) la ec. 2.28 toma la siguiente forma.

$$I_0 Z_0 \operatorname{sen} \omega_0 t \quad (2.29)$$

La ecuación 2.29 tiene una amplitud predeterminada ya en la ecuación 2.21. El transformador oscila a su frecuencia natural y la amplitud de este disturbio, para cualquier grado de amortiguamiento puede verse en la fig. 1.8, introduciéndose el valor apropiado de  $\eta$ . Por lo tanto la expresión completa para la tensión en el capacitor será:

$$V_c = V(0) e^{-\frac{t}{2RC}} \cos \sqrt{(4\eta^2 - 1)} \frac{t}{2RC} + I_0 Z_0 \sin \omega_0 t \quad (2.30)$$

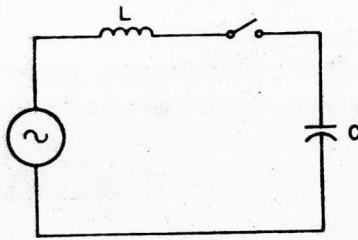
### 2.2.2 Desconexión de capacitancias.

Una desconexión de capacitancias es realizada cuando una línea larga, un cable o un banco de capacitores son desenergizados, en este caso se presentan potenciales muy peligrosos entre los contactos del interruptor.

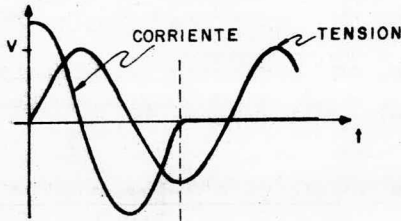
En la figura 2.7 se muestra un circuito y los eventos antes y después de la interrupción. La relación de fase de corriente y tensión es aproximadamente  $90^\circ$ .

Cuando el interruptor abre en el cero de corriente, el capacitor esta cargado a su voltaje máximo y la capacitancia ahora aislada de la fuente de alimentación retiene su carga, esto se puede observar en la fig. 2.7c

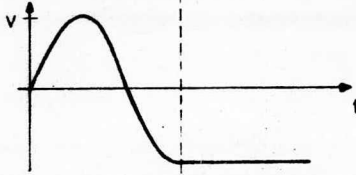
Como una consecuencia del almacenamiento de tensión después de medio ciclo del cero de corriente. la tensión a través de los contactos del interruptor alcanza un valor de dos veces la tensión pico del sistema, esto se puede observar en la figura 2.7d



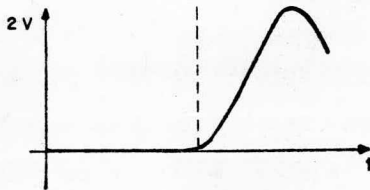
a



b



c



d

Fig. 2.7

- a) Circuito elemental LC
- b) Tensión del sistema y su corriente
- c) Tensión en el capacitor
- d) Tensión a través de los contactos

La corriente involucrada en la desconexión de capacitancias es frecuentemente pequeña, de modo que la mayoría de las veces el interruptor es capaz de interrumpir en el primer cero de corriente.

Si esto ocurre inmediatamente después de que los contactos se han separado, la tensión de dos veces la tensión pico del sistema aparecerá a través de los contactos del interruptor, mientras la separación de los contactos es pequeña, la probabilidad de que suceda una reignición aumenta.

### 2.2.3 Reignición de corrientes.

Supongase que la reignición tiene lugar precisamente cuando la tensión alcanza su pico, lo cual es equivalente a cerrar los contactos en ese instante, puesto que se establece así un circuito LC, la respuesta ante este disturbio repentino es una oscilación a su frecuencia natural, la cual está dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad \text{ó} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

donde:

L Es la inductancia del circuito

C la capacitancia del banco

El circuito tratado no está en reposo, puesto que en el



momento de restablecimiento el capacitor tiene una cierta carga.

La ecuación que determina el comportamiento del circuito LC después de la reignición es:

$$V_{\text{máx}} \cos \omega t - V_c = L \frac{di}{dt} \quad (2.31)$$

La tensión a través del capacitor es:

$$V_c = V_c(0) + \frac{1}{C} \int i \, dt \quad (2.32)$$

Sustituyendo la ec. 2.32 en la en ec. 2.31 se obtiene:

$$[V_{\text{máx}} - V_c(0)] = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i \, dt \quad (2.33)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ec. 2.34

$$I(S) = \frac{[V_{\text{máx}} - V(0)]}{[S + (1/LC)]} L \quad (2.34)$$

Aplicando la transformada inversa a la ec. anterior resulta:

$$i(t) = \frac{[V_{\text{máx}} - V_c(0)]}{L \omega_0} \text{sen } \omega_0 t \quad (2.35')$$

Expresando la ec. anterior de otra manera se tiene:

$$I(t) = [V_m - V_c(0)] \sqrt{C/L} \text{sen } \omega_0 t \quad (2.35)$$

Donde:

$V_m - V_c(0)$  es la tensión que existe entre los contactos del interruptor cuando se presenta la reignición.

$\sqrt{L/C}$  es la impedancia característica del circuito.

De la ec. 2.35 la corriente transitoria es senoidal, oscila a la frecuencia natural del circuito y es igual a la tensión original a través del interruptor dividido por su impedancia característica. Para una mejor comprensión del análisis anterior, se realiza un ejemplo numérico.

--En un sistema de 15 Kv. se tiene una capacitancia de 60  $\mu$ F la cual representa un banco de capacitores trifásico de 5000 KVA. La corriente capacitiva será interrumpida cuando dicho banco es desconectado de la fuente de alimentación de aproximadamente 200 Amps. Se considera que la fuente posee una inductancia de 1 mH. y que la reignición ocurre cuando la tensión a través de los contactos del interruptor es dos veces la tensión pico del sistema. En estas condiciones la corriente producida será:

$$2 V_p \sqrt{\frac{C}{L}} = \frac{2 \times 15000 \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \sqrt{\frac{6 \times 10^{-5}}{10^{-3}}} = 6000 \text{ A.}$$

Este valor es varias veces la magnitud de la corriente

normal a 60 Hz. La frecuencia de la corriente será:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(6 \times 10^{-5}) \times 10^{-3}}} = 650 \text{ Hz.}$$

Sustituyendo los valores de las corrientes demandadas en la ec. 2.32. para la tensión en el capacitor se tiene:

$$V_c = V_c(0) + (1/C) \int [V_m - V_c(0)] (C/L) \text{ sen } \omega_0 t \text{ dt} \quad (2.36)$$

Si la tensión atrapada en el capacitor  $V_c(0)$  es igual a  $-V_m$  como se mostró en la figura 2.7c y cuando el rearqueo ocurre la tensión del sistema es  $V_m$  y la ec. 2.36 toma la siguiente forma.

$$V_c = -V_m + \frac{2V_m}{LC} \int \text{sen } \omega_0 t \text{ dt}$$

$$V_c = -V_m + 2V_m (1 - \cos \omega_0 t) \quad (2.37)$$

De la ecuación anterior se puede apreciar que el valor máximo que el capacitor puede cargarse es de  $+3V_m$ .

La carga atrapada en el capacitor y el rearqueo subsecuente son mostrados en la figura 2.8, lo cual no es necesariamente el fin de este problema.

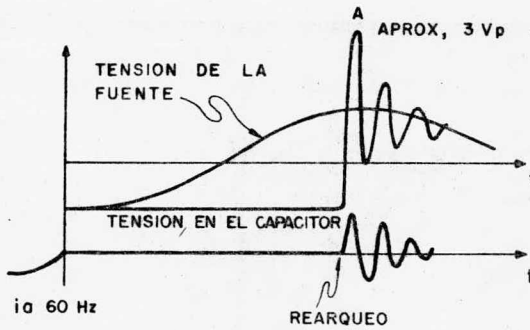


Fig. 2.8 Desconexión de capacitancias con un reaqueo en el pico de tensión.

El instante en que la tensión transitoria alcanza su pico "A" en la fig. 2.8 la corriente transitoria pasa a través de cero, si esto sucede la alta tensión queda atrapada en el capacitor, la onda de la tensión de alimentación sigue su camino, de modo que después de otro medio ciclo la tensión a través de los contactos del interruptor será de 4Vm.

Si sucede otro segundo reaqueo (restrike) la descarga oscilatoria se iniciaría, sin embargo puesto que hay una tensión de 2Vm entre los contactos, la corriente sería 2 veces y la excursión sería de + 3Vm a - 5Vm.

Para mejor comprensión de lo anterior se muestra la figura 2.9 en la cual R y C representan el reaqueo subsecuente y

el aislamiento subsecuente respectivamente. La secuencia es idealizada y simplificada en algún grado, por ejemplo en la práctica los rearqueos no siempre ocurren en los pico de tensión.

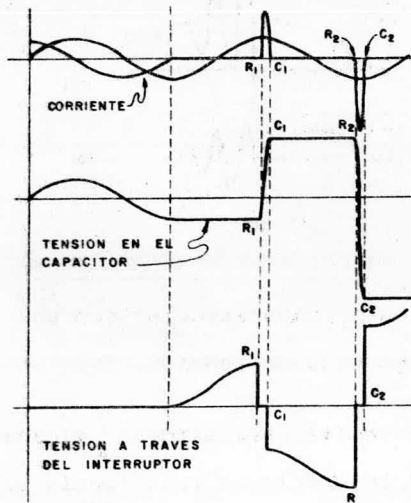


Fig. 2.9 Desconexión de capacitancias con Múltiples rearqueos(restrikes).

#### 2.2.4 Corrientes de Magnetización (Inrush).

Durante la excitación inicial de un transformador, una corriente transitoria conocida como corriente de magnetización (Inrush) aparece en el devanado primario, Debido al cambio repentino del estado magnético del núcleo, dicha corriente continúa fluyendo hasta alcanzar el estado estable normal y cuando las condiciones estables en el flujo

se alcanzan, la magnitud del primer pico de la corriente de magnetización depende de las condiciones que existan en el momento de la energización del transformador, y en ocasiones puede alcanzar valores bastante altos y suficientes para causar la operación falsa o no necesaria de los dispositivos de protección de los transformadores.

Estas corrientes pueden producirse por otras dos causas, cuando una falla de corto circuito se establece en el sistema, estas son usualmente acompañadas por una caída considerable en la tensión del sistema. Si apesar de eso la falla es aislada, la tensión alcanza otra vez su valor normal y durante este restablecimiento repentino de la tensión, las corrientes de magnetización (inrush) pueden aparecer en los transformadores conectados al sistema.

La otra es cuando dos o más transformadores tienen sus primarios conectados en paralelo, la maniobra en uno de los transformadores puede iniciar una corriente de magnetización en el primario del segundo transformador.

Cuando la excitación de un transformador es desconectada, la corriente de magnetización sigue la curva de histéresis a cero y la densidad de flujo hacia un valor residual ( $B_r$ ) lo cual se puede observar en la figura 2.10.

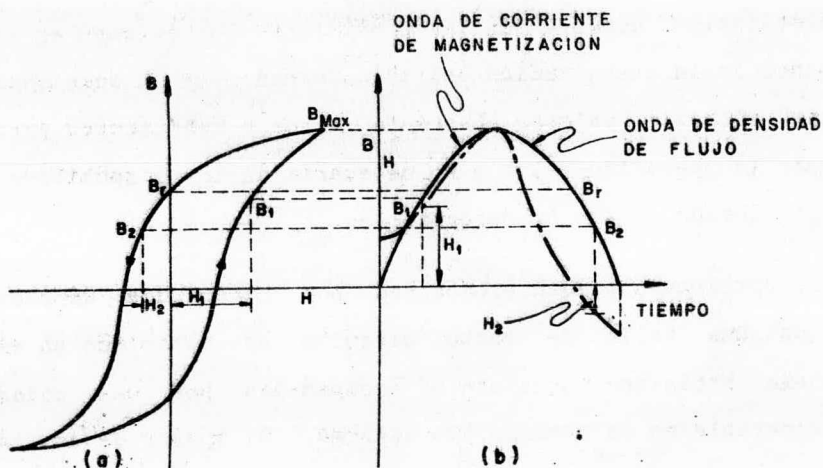


Fig. 2.10 Ciclo de histéresis

De la figura 2.11 se puede observar que la onda de corriente de magnetización  $I_1$  y la onda de densidad de flujo (B) definitivamente interrumpida la alimentación del transformador en el instante marcado por la primera línea vertical punteada, en la cual la corriente pasó por su cero normal y el flujo en un valor residual ( $+B_r$ ). Si el transformador no se desconectara, la onda de corriente y flujo seguirían la línea punteada, pero como el transformador es desconectado estos siguen la línea continua  $I_2$  y  $B_2$  la corriente en cero y el flujo en  $B_r$ .

Para ilustrar el fenómeno inrush bajo la condición que conduciría al transitorio máximo, se requiere suponer que el circuito es restablecido después del instante indicado por

la segunda línea punteada, cuando la densidad de flujo podría estar en su valor máximo negativo ( $-B_{\text{máx}}$ ).

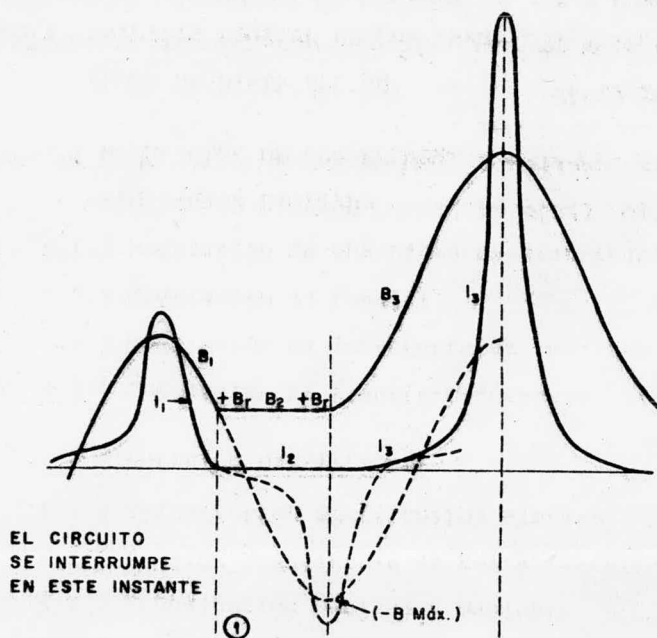


Fig. 2.11 Densidad de flujo residual y el fenómeno de la corriente (inrush).

Puesto que el flujo magnético no se puede crear o destruir instantáneamente, por lo tanto la onda de flujo en lugar de iniciar con su valor normal (en este caso  $-B_{\text{máx}}$ ) y crecer a lo largo de la curva, principia en el final de la curva  $B_2$  con un valor  $B_r$ .

La curva  $B_3$  es senoidal a pesar de las características de



saturación del circuito magnético, porque con una tensión senoidal aplicada, la fuerza electromotriz y por lo tanto el flujo tienden a ser senoidales, la saturación no modifica el flujo pero sí a la corriente de magnetización necesaria para producir el flujo.

La onda de corriente correspondiente a la onda de la densidad de flujo es identificada como  $I_3$ .

## CAPITULO 3

### TRANSITORIOS DE TENSION EN REDES DE DISTRIBUCION

En la práctica todos los sistemas de potencia (generación, transmisión y distribución) utilizan circuitos trifásicos, es por ello que estos sistemas son de gran importancia.

Durante el desarrollo de este capítulo se analizarán los efectos transitorios que surgen cuando el sistema sufre un cambio en sus condiciones de operación.

Para estudiar el fenómeno de los transitorios en sistemas trifásicos es importante considerar la forma de conexión del sistema, y puede ser

- Sólidamente aterrizado
- Aterrizado a través de una impedancia.
- Sin aterrizaje

Cuando el neutro del sistema se encuentra sólidamente aterrizado las tres fases son virtualmente independientes y pueden tratarse como tres circuitos monofásicos independientes entre si, esto se logra en lugares donde la impedancia de tierra es despreciable. Si se habla de un interruptor este tiene trabajos idénticos en el momento que

abre para aislar una falla o desconectar una carga, la tensión transitoria de restablecimiento puede ser determinada por medio del metodo utilizado en el capitulo 2.

La situación de un interruptor es totalmente diferente para un sistema que tiene su neutro aterrizado a través de una impedancia o sin aterrizar, la tarea de la primera fase en abrir para aislar una falla o desconectar una carga es mucho más severa que las posteriores.

### **3.1 TRANSITORIOS DE TENSION PRODUCIDOS POR FALLAS.**

Algunas de las fallas que producen sobretensiones en los sistemas eléctricos son las de cortocircuito, las cuales pueden ser debido a problemas en el aislamiento.

Las sobretensiones producidas por este tipo de fallas contienen dos componentes de tensión, y son:

- Tensiones a frecuencia fundamental.
- Tensiones a frecuencia natural.

#### **3.1.1 Tensiones a frecuencia fundamental.**

La magnitud de las sobretensiones a frecuencia fundamental depende del tipo de falla. La falla de cortocircuito de fase a tierra y doble fase a tierra pueden causar sobretensiones a tierra en la otra u otras que no fallaron. Las fallas de cortocircuito trifásico y bifásico no producen

sobretensiones

Las sobretensiones de mayor magnitud se deben a las fallas de cortocircuito de fase a tierra, y al estudiar estas los valores de tensión obtenidos permiten una buena selección de los dispositivos de protección.

El circuito de la figura 3.1 representa las condiciones de un cortocircuito de la fase "A" a tierra, si la resistencia de falla es despreciable, entonces las tensiones en las fases B y C son iguales en magnitud pero diferentes en fase, por otra parte si la resistencia de falla esta presente la tensión en la fase C crece y en la fase B decrece.

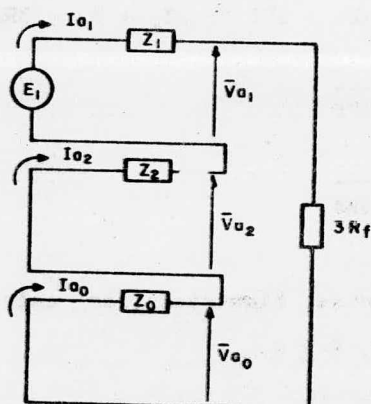


Fig. 3.1 Conexión de los circuitos de secuencia positiva, negativa y cero para representar un cortocircuito monofásico en la fase A.

De la figura anterior se observa:

$$Z_1 = Z_2 = R_1 + jX_1$$

$$Z_0 = R_0 + jX_0$$

Rf es la resistencia de falla

E Es la tensión a tierra antes de la falla en el punto donde esta se produce.

Se verifica que:

$$I_{a_1} = I_{a_2} = I_{a_0} = \frac{E_1}{2Z_1 + Z_0 + 3Rf}$$

$$\tilde{V}_a = E_{a_1} - \frac{Z_1 E_1}{2Z_1 + Z_0 + 3Rf} = \frac{E_1 (Z_1 + Z_0 + 3Rf)}{2Z_1 + Z_0 + 3Rf}$$

$$\tilde{V}_a = \frac{-Z_1 E_1}{2Z_1 + Z_0 + 3Rf}$$

$$\tilde{V}_a = \frac{-Z_0 E_1}{2Z_1 + Z_0 + 3Rf}$$

Utilizando las componentes simétricas se calculan las tensiones en las fases A, B y C.

$$V_a = \tilde{V}_{a_1} + \tilde{V}_{a_2} + \tilde{V}_{a_0} = \frac{E_1 3Rf}{2Z_1 + Z_0 + 3Rf}$$

Observación: si Rf = 0 entonces Va = 0

$$V_b = a^2 \tilde{V}_a + a \tilde{V}_a + \tilde{V}_a$$

$$V_b = \left[ -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{Z_o - Z_1}{2Z_1 + Z_o + 3R_f} \right] E_1 \quad (3.1)$$

$$V_c = \left[ -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{Z_o - Z_1}{2Z_1 + Z_o + 3R_f} \right] E_1 \quad (3.2)$$

Las ecs. 3.1 y 3.2 representan el valor de la tensión en las fases B y C respectivamente, de acuerdo a estas se han trazado curvas generalizadas que se muestran en la figura 3.2, las cuales corresponden a las sobretensiones en por unidad en las fases no falladas (B y C).

Para la construcción de estas curvas se supuso que:

- La resistencia de falla es cero -Es falla sólida (no hay arqueo).
- Las impedancias de secuencia positiva y negativa son iguales.
- No hay desconexión repentina de carga.

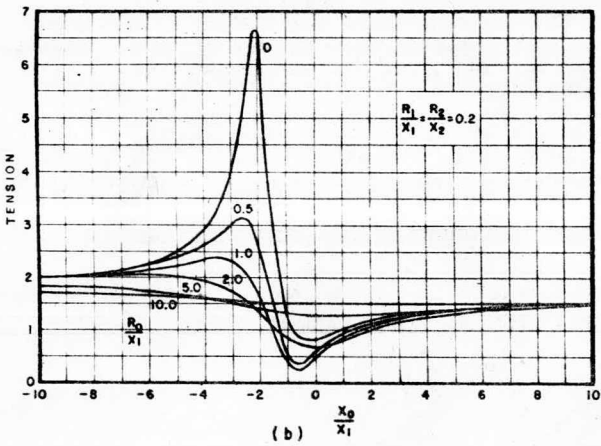
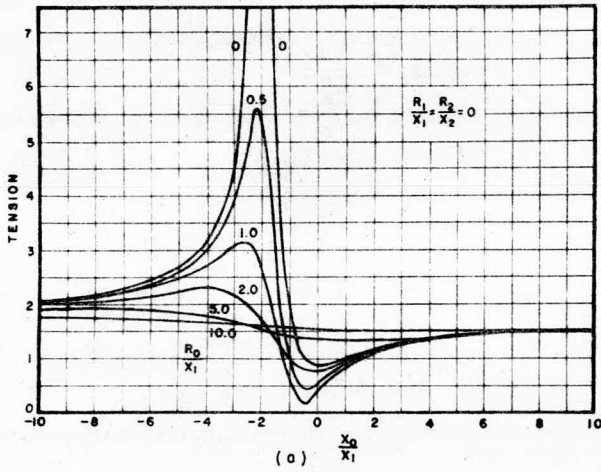


Fig. 3.2 Familia de curvas obtenidas de las ecs. 3.1 y 3.2

### 3.1.2 Tensiones a frecuencia natural

Las tensiones a frecuencia natural son aquellas que aparecen inmediatamente después de que ocurre la falla, la suma de las dos componentes de tensión (frecuencia natural y frecuencia fundamental) se le conoce como tensión transitoria.

Las curvas para tensiones transitorias subsecuentes a la falla en términos de impedancia del circuito, vista desde el punto de falla no pueden ser graficadas para el caso general como se hizo para las tensiones de frecuencia fundamental, en el sistema actual las tensiones transitorias estan en función de: el número, tipo de conexión y arreglo de los circuitos. El análisis de este tipo de tensión (tensión a frecuencia fundamental) es muy complicado, de llevarse a cabo en forma analitica, en el siguiente capitulo se hará un análisis digital

### 3.2 TRANSITORIOS PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFERICAS.

Al estudiar los efectos de las descargas atmosféricas sobre los sistemas de potencia, es importante entender la naturaleza de dichas descargas, para que una descarga atmosférica tenga lugar se requiere que exista una carga en la nube, la formación de esta carga la describen varias



teorías, aquí solo se mencionará una, la cual lleva el nombre de teoría de WILSON.

Wilson hizo un desarrollo científico respecto a la electrificación de las nubes, su teoría esta basada en que las gotas de lluvia al caer adquieren carga producida por los iones eléctricos, los cuales se encuentran en las corrientes de aire ascendentes.

En la atmósfera normalmente existe una gran cantidad de iones positivos y negativos que se mueven en diversas direcciones con una velocidad de 1 cm./seg. bajo la acción de un campo eléctrico de 1 v/sm.

La existencia de los iones en el aire se estima en el orden de 1000 positivos y 800 negativos por  $\text{cm}^3$ . La gama de iones aumenta y al mismo tiempo las nubes se cargan eléctricamente por el efecto de la ionización. Los iones negativos viajan hacia la parte inferior de la nube cargandola negativamente y los iones positivos se dirigen hacia tierra para cargarla positivamente. Dicha teoría también especifica que para estudiar el origen de las descargas eléctricas en las nubes es necesario considerar el rompimiento de las gotas de una tormenta, y por consiguiente la separación de su carga eléctrica debido a la acción de la gravedad terrestre y las corrientes de aire ascendentes.

En el proceso de la lluvia las gotas de agua hacen contacto

con los iones que se encuentran en el aire dando origen a que aumente la ionización de la atmósfera que facilita la formación de la trayectoria de descarga hacia la tierra o hacia la nube.

Después de la formación de carga se debe considerar el mecanismo de la descarga, como el centro de la carga negativa se desarrolla en la región baja de la nube, un centro de carga positiva es inducido sobre la tierra. El gradiente de potencial en esta región no es uniforme, usualmente éste es mayor cerca de la base de la nube y menor en la vecindad de la tierra, porque el centro de carga de la nube está concentrado en un volumen menor que el correspondiente al centro de carga de la tierra. Estos centros de carga continúan para seguir desarrollando el gradiente de potencial en la base de la nube, hasta que este exceda la fuerza dieléctrica del aire, y en este punto se produce una corriente baja de descarga.

La descarga inicial es acompañada por una alta corriente de descarga, la cual es seguida por una descarga de regreso, la alta corriente de descarga es la luminocidad que se ve. La trayectoria del proceso de descarga es determinada por el campo eléctrico entre la nube y tierra y también por las condiciones de la atmósfera local.

El fenómeno de las descargas atmosféricas puede ocasionar un rompimiento en el conductor de fase o inducir una corriente,

esto depende del tipo de incidencia de la descarga, las cuales son:

- Descarga directa a la línea
- Descarga cercana a la línea

Las características y propiedades de las descargas atmosféricas más importantes son:

- Corriente
- Tensión
- Forma de onda
- Polaridad

La magnitud de la corriente de descarga es independiente a el valor de la resistencia donde termina la descarga, debido a que la resistencia del canal de descarga es relativamente alta, o sea que es del orden de unos cuantos miles de ohms. Por lo tanto la impedancia total de la trayectoria de la descarga es relativamente incambiable, sin importar la resistencia donde termina la descarga.

Las corrientes inducidas por descargas atmosféricas en las líneas de distribución han sido medidas por dispositivos simples, los cuales llevan el nombre de DETECTORES DE CORRIENTE DE RAYO. Estos dispositivos consisten en una cinta magnética pregrabada con una señal de referencia, la cual se monta en un soporte de plástico, y a su vez éste se coloca dentro de un tubo de material no magnético (tubo pvc)

de 30.5 cm. de longitud, de tal forma que los extremos de la cinta queden hacia abajo, tal como se muestra en la figura 3.3.

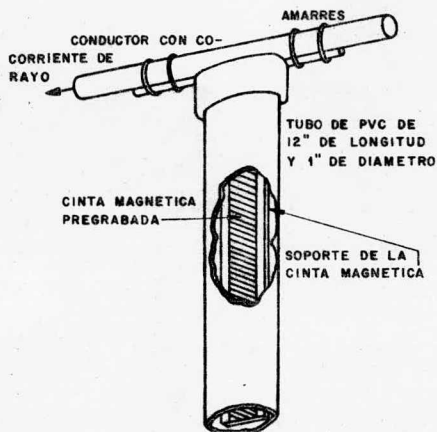


Fig. 3.3 Dete-ctor de corriente de rayo.

Estos detectores de corriente de rayo se han empleado en México por el Instituto de Investigaciones Eléctricas para medir la magnitud máxima de la corriente inducida sobre las líneas de distribución en los diferentes sectores de Compañía de Luz y Fuerza del Centro.

Los registros de mayor magnitud que se encontraron fueron hasta de 15KA.

La forma típica de una descarga atmosférica se muestra en la

figura 3.4.

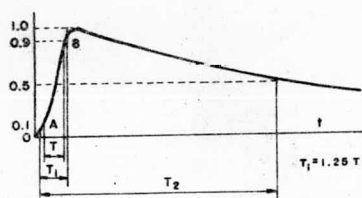


Fig. 3.4 Forma típica de una descarga atmosférica.

La forma de onda de la descarga atmosférica es normalmente especificada por sus tiempos de frente y cola, los parámetros esenciales son los tiempos para alcanzar la amplitud cresta y el 50% de ésta en su caída (cola) respectivamente, por ejemplo: una onda de  $1.2 \times 50 \mu s$ . Es un impulso el cual alcanza la magnitud cresta en  $1.2 \mu s$  y decae al 50% de su valor cresta en  $50 \mu s$ .

Como se puede apreciar en la fig. 3.4 el frente de onda de la corriente está definido entre 10 y 90% del valor cresta, por datos obtenidos experimentalmente se puede decir que los frentes se encuentran en el rango de 1 a  $10 \mu s$  y las colas en el rango de 20 a  $100 \mu s$ .

Basándose en miles de mediciones el 90% de las descargas a tierra tienen polaridad negativa, por definición una

descarga de polaridad negativa, es cuando la carga negativa baja a tierra, tales descargas resultan de un centro de carga negativa en la parte baja de la nube y una carga positiva en la superficie de la tierra como se describió en la teoría de Wilson.

### 3.2.1 Efectos de las descargas atmosféricas en sistemas de protección.

En el diseño de los sistemas de protección contra las descargas atmosféricas, lo primero que debe considerarse es como incide el rayo al sistema, o sea si la descarga atmosférica cae directamente o en la vecindad de éste, los efectos de cada una de las formas de incidencia son totalmente diferentes, es por ello que se analizan por separado.

Las descargas directas pueden golpear los conductores de fase, así como también a los hilos de guarda. Una descarga atmosférica de este tipo llega directamente a los conductores de fase o a las terminales del equipo, esta descarga desarrolla una tensión muy alta, la cual ocasiona un arqueo en los aisladores cuando el sistema no cuenta con dispositivos de protección. Si el flameo ocurre a través del aire o a través de los aisladores de porcelana raramente causará daños permanentes, si por el contrario el flameo ocurre a través del aislamiento de un material sólido tal como un transformador o cable resultan daños permanentes.

La magnitud de la tensión aplicada al equipo y sistemas de aislamiento en la línea puede ser limitada por el aterrizaje de los postes y alambres a tierra para intercectar las descargas directas.

Las descargas atmosféricas que ocurren cerca de la línea en ocasiones inducen tensiones en el sistema, pero regularmente casi nunca producen flameos en líneas blindadas, pero también si la línea se encuentra sin protección esta pueden ocasionar flameos severos.

### **3.3 TRANSITORIOS DE TENSION PRODUCIDOS POR MANIOBRA**

La sobretensiones transitorias pueden ocurrir en un sistema de potencia cuando el sistema pasa de un estado de operación a otro o durante anomalías del sistema. Las ondas de sobretensión pueden tomar varias formas dependiendo de la naturaleza del disturbio, pero la más común es aquella que se origina en la maniobra de la línea, ya sea en el cierre o apertura de los interruptores después de que ocurre una falla. En los capítulos 1 y 2 se estudiaron los fenómenos de cierre y apertura en circuitos monofásicos lo cual es básico para el diseño de los sistemas de protección contra las sobretensiones transitorias, dicho análisis da un mejor entendimiento al fenómeno de la maniobra y como controlar tales sobretensiones.

La generación de sobretensiones por maniobra pueden ocurrir cuando: Se energiza o desenergiza una línea con múltiples reencendidos, desenergización de una línea con una sola falla de fase a tierra, cierre de una línea con carga atrapada, todos estos cambios que sufre el sistema son capaces de causar sobretensiones.

Cuando una línea es inicialmente energizada una sobretensión  $E_f$  es transmitida sobre la línea, tal sobretensión esta dada por la siguiente ecuación;

$$E_f = \frac{Z_o E}{Z_s + Z_o} \quad (3.3)$$

Donde:

- $Z_o$  Es la impedancia característica de la línea
- $Z_s$  Es la impedancia característica del sistema antes de que el interruptor energice.
- $E$  Es la tensión en el sistema en el momento que el interruptor cierra.

De la ec. 3.3 se observa que si la impedancia característica del sistema es baja, la magnitud de la sobretensión transmitida incrementa a un valor máximo igual al valor cresta del sistema. Cuando esta sobretensión llega al otro extremo de la línea, dicha sobretensión es reflejada ( $E_r$ ) de acuerdo a la siguiente ecuación.



$$e_r = \frac{R - Z}{R + Z} \quad (3.4)$$

Donde:

R Es la impedancia característica conectada a tierra en el extremo de la línea.

De la ec. 3.4 se observa que la onda reflejada estará en un máximo cuando la línea esta en circuito abierto o sea que R tiene un valor infinito.

La tensión en cualquier punto de la línea es la suma de  $e_f$  y  $e_r$ . Por consiguiente el valor máximo de la onda de tensión ocurre cuando la maniobra se efectua en un bus de impedancia cero en una línea abierta.

La figura 3.5 muestra el fenómeno en el extremo de la línea cuando una onda escalón llega. La sobretensión máxima que puede generarse debido a la maniobra de una sola fase de la línea, es de dos veces la tensión pico del sistema (dos por unidad), también éste es el valor máximo que puede generarse por el cierre de una fase de una línea de distribución trifásica, en este último caso puesto que las tres fases estan acopladas estática y electromagnéticamente, el cierre en las otras dos fases pueden incrementar la sobretensión hasta un valor de 3 p.u.

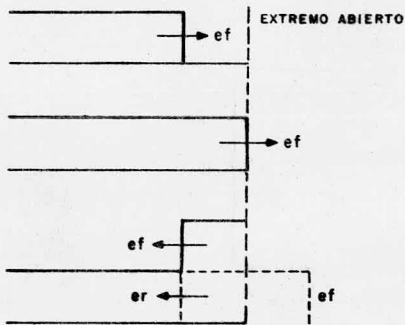
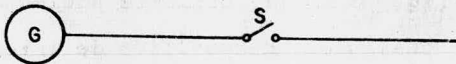


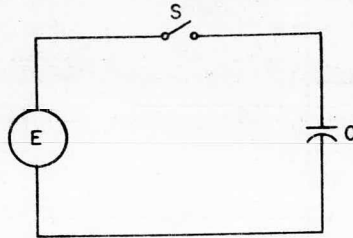
Fig. 3.5 Función escalón de tensión reflejada en el extremo de una línea (abierta)

### 3.3.1 Sobretensiones debido al cierre de sistemas con carga atrapada.

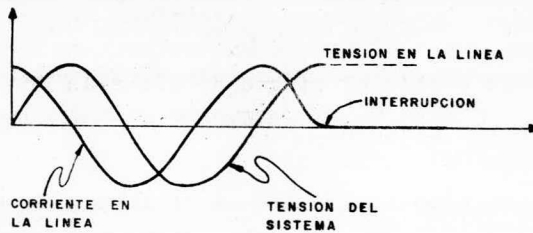
Cuando una línea tal como se muestra en la figura 3.6a esta desenergizada, puede ser representada como se muestra en la figura 3.6b.



a)



b)



c)

Fif. 3.6 Desconexión de una línea

En el circuito de la fig. 3.6b la corriente adelanta a la tensión en  $90^\circ$ , y cualquier dispositivo de interrupción corta la corriente en su cero normal, o sea cuando la corriente se interrumpe, la tensión tiene un valor máximo, esto quiere decir que la tensión cresta del sistema es almacenada en la línea, cuando esta se desconecta de la fuente de excitación, esta tensión generalmente es

considerada como una carga atrapada.

Si la línea es cerrada con esta carga atrapada, en dicha línea la tensión a través del interruptor puede ser igual a 2 p.u., cuando la tensión cresta del sistema esta en polaridad opuesta a la carga atrapada, en este caso la sobretensión transmitida es:

$$E_f = \frac{Z_o 2E}{Z_s + Z_o} \quad (3.5)$$

Por lo tanto la onda de sobretensión transmitida es dos veces la sobretensión debido a la desenergización. Cuando esta sobretensión alcanza el otro extremo abierto de la línea es otra vez el doble, resultando una sobretensión de 3 p.u, cuando una línea trifásica sufre una maniobra, el acoplamiento entre las fases puede crecer a una sobretensión máxima para un recierre, esta puede alcanzar un valor de hasta 4.2 p.u.

### 3.3.2 Desenergización de una línea con múltiples reencendidos.

Las tensiones producidas durante la desenergización de una sección de línea, es similar a lo que pasa en la sección de desconexión de capacitancias del capítulo 2, el circuito se muestra en la figura 2.6a. La tensión a través de los

contactos se muestra en la fig. 2.9, de acuerdo con el número de reencendidos . En el análisis anterior se consideró que la inductancia es pequeña y que la frecuencia natural del circuito es alta con respecto a la fundamental. Basandose en lo anterior se dice que la tensión se construye de acuerdo a las series 1, 3, 5, 7, etc. y no tiene limite si el amortiguamiento es despreciable, haciendo incapie que la serie esta en función de los reencendidos.

### 3.3.3 Desenergización de una línea con una falla de fase a tierra.

Se considera una falla sólida de línea a tierra en la fase A del sistema trifásico mostrado en la figura 3.7.

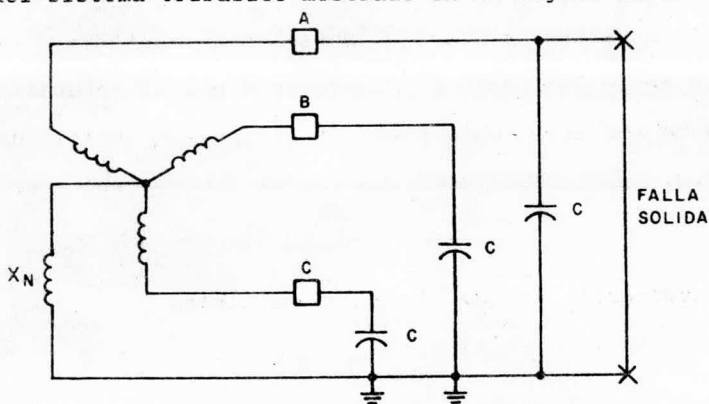


Fig. 3.7 Desconexión de una sección de línea sujeta a una falla de una sola fase a tierra.

Si  $X_n$  es muy grande comparada con la reactancia del generador, la tensión total de línea a línea aparecerá entre la fase A y tierra sin importar que el polo A del interruptor es abierto o cerrado. Por simplicidad el sistema trifásico puede ser reducido al circuito de la figura 3.8.

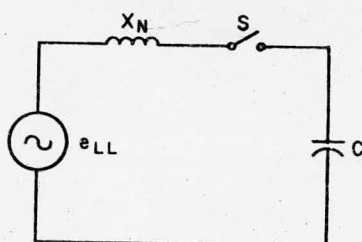


Fig. 3.8 Desconexión de una sección de línea después de que se ha establecido una falla de fase a tierra.

Si el circuito es aislado por la apertura del interruptor arqueará en el polo A, la única diferencia entre éste y el mostrado en la figura 2.6a y 2.9 es la tensión a través de la reactancia del circuito, en la figura 2.6a la tensión es normal de línea a neutro y el de la fig. 3.8 es la tensión normal de línea a línea, por lo tanto las tensiones transitorias producidas por el circuito son mostradas mostrado en la fig. 2.6, entonces la tensión en el capacitor incrementará de acuerdo a la serie de  $\sqrt{3}$  veces 1,3,5,7 etc. de acuerdo con el número de reencendidos.

## CAPITULO 4

### ANALISIS DIGITAL DE LOS TRANSITORIOS EN REDES DE DISTRIBUCION

En los capitulos anteriores se trataron brevemente los transitorios en circuitos monofásicos y trifásicos en forma analítica.

En el presente capitulo se estudiarán los mismos circuitos pero en forma digital utilizando un programa llamado EMTP (electromagnetic transients program). Este programa representa una gran ayuda para la ingeniería eléctrica, puesto que permite analizar cualquier tipo de red con un gran número de ramas y elementos, en régimen de estado estable y/o transitorio.

La ventaja primordial del EMTP es facilitar el análisis de las redes, realizar los calculos con gran facilidad y exactitud, ya que como se demostró en los capitulos anteriores, el desarrollo analítico de este fenómeno es muy complicado y laborioso, y por lo tanto difícil de llevar a cabo.

El EMTP fué desarrollado por el Dr. H. W. Dommel del

departamento de ingeniería eléctrica de la Universidad de British Columbia. Para manejar este programa es necesario estudiar cuidadosamente el manual del usuario, el cual indica claramente como llevar a cabo la mecánica para analizar los cálculos de los parámetros deseados del circuito en cuestión, también indica como introducir los datos a la computadora para realizar la simulación correcta. Además el manual proporciona la información adecuada para obtener las gráficas de los parámetros de interés (corriente y/o tensión ).

#### **4.1 MODELACION DE ELEMENTOS PARA LA SIMULACION DIGITAL.**

Para llevar a cabo la simulación digital de una red es necesario modelar cada uno de sus elementos. Debido a lo anterior es de gran importancia conocer el arreglo del sistema, y así proseguir con el cálculo de los parámetros deseados.

##### **4.1.1 Modelación de una línea de distribución.**

Una línea de distribución esta formada por: Fusibles, Transformadores, Interruptores, Seccionadores, Apartarrayos, Hilos de guarda y cuchillas desconectoras.

Los elementos que la constituyen son simulados de acuerdo a un formato especificado por el manual del usuario del EMTP.



Como se sabe que para calcular los parámetros de dicha línea (inductancia Capacitancia y resistencia) es necesario conocer el arreglo del sistema, en esta sección se utiliza una línea con arreglo como el que se muestra en la figura 4.1, el cual es utilizado para los sistemas de distribución.

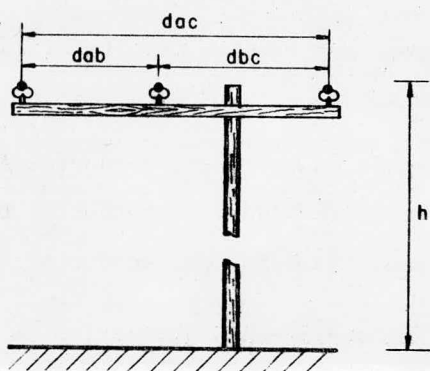


Fig. 4.1 Arreglo utilizado en los sistemas de distribución.

El siguiente paso es el cálculo de impedancias propias y mutuas, el cual se basa en las siguientes fórmulas, las cuales fueron obtenidas de un análisis matemático.

$$Z_{aa-n} = (R_{aa} + 0.000988f + \Delta R_{aa-n}) +$$

$$j(0.002892f \log_{10} \frac{658\sqrt{P/f}}{r_{aa}} \Delta X_{aa-n}) \Omega/\text{Km.} \quad (4.1)$$

$$Z_{bb-n} = (R_{bb} + 0.000988f + \Delta R_{bb-n}) +$$

$$j(0.002892f \log_{10} \frac{658\sqrt{\rho/f}}{r_{bb}} \Delta X_{bb-n}) \Omega/\text{Km.} \quad (4.2)$$

$$Z_{cc-n} = (R_{cc} + 0.000988f + \Delta R_{cc-n}) +$$

$$j(0.002892f \log_{10} \frac{658\sqrt{\rho/f}}{r_{cc}} \Delta X_{cc-n}) \Omega/\text{Km.} \quad (4.3)$$

Las fórmulas anteriores representan el valor de las impedancias propias, en donde:

$R_{aa}$  Es la resistencia en  $\Omega/\text{Km.}$  del conductor A

$R_{bb}$  Es la resistencia en  $\Omega/\text{Km.}$  del conductor B

$R_{cc}$  Es la resistencia en  $\Omega/\text{Km.}$  del conductor C

$r_{aa}$ ,  $r_{bb}$  y  $r_{cc}$  Es el radio medio geométrico de los conductores A, B, y C respectivamente

$f$  Es la frecuencia en ciclos por segundo.

$\rho$  Es la resistividad propia del terreno.

$$- \Delta R_{aa-n} = \Delta X_{aa-n} = 1.015f \frac{h_a}{\sqrt{\rho/f}} \times 10^{-6} \Omega/\text{Km.}$$

$$- \Delta R_{bb-n} = \Delta X_{bb-n} = 1.015f \frac{h_b}{\sqrt{\rho/f}} \times 10^{-6} \Omega/\text{Km.}$$

$$- \Delta R_{cc-n} = \Delta X_{cc-n} = 1.015f \frac{h_c}{\sqrt{\rho/f}} \times 10^{-6} \Omega/\text{Km.}$$

$h_a$ ,  $h_b$ , y  $h_c$  son las alturas de los conductores A, B y C con respecto al

suelo respectivamente.

Ahora para calcular las impedancia mutuas entre los conductores , incluyendo el efecto del circuito de tierra se utilizan las siguientes tres fórmulas

$$Z_{ab-n} = (0.000988f + \Delta R_{ab-n}) + j(0.002892f \log_{10} \frac{658\sqrt{P/f}}{d_{ab}} \Delta X_{ab-n}) \Omega/\text{Km.} \quad (4.4)$$

$$Z_{bc-n} = (0.000988f + \Delta R_{bc-n}) + j(0.002892f \log_{10} \frac{658\sqrt{P/f}}{d_{bc}} \Delta X_{bc-n}) \Omega/\text{Km.} \quad (4.5)$$

$$Z_{ac-n} = (0.000988f + \Delta R_{ca-n}) + j(0.002892f \log_{10} \frac{658\sqrt{P/f}}{d_{ac}} \Delta X_{ac-n}) \Omega/\text{Km.} \quad (4.6)$$

Donde:

$d_{ab}$  Es la distancia entre los conductores A y B en Mts.

$d_{ac}$  Es la distancia entre los conductores A y C en Mts.

$d_{bc}$  Es la distancia entre los conductores B y C en Mts.

$$- \Delta R_{ab-n} = \Delta X_{ab-n} = 1.015f \frac{h_a + h_b}{2\sqrt{P/f}} \times 10^{-6} \Omega/\text{Km.}$$

$$- \Delta R_{ac-n} = \Delta X_{ac-n} = 1.015f \frac{h_a + h_c}{2\sqrt{P/f}} \times 10^{-6} \Omega/\text{Km.}$$

$$- \Delta R_{bc-n} = \Delta X_{bc-n} = 1.015f \frac{hb + hc}{2\sqrt{P/f}} \times 10^{-6} \Omega/\text{Km.}$$

Con las fórmulas 4.1 a 4.6 se construye una matriz la cual es llamada matriz de impedancia de la línea, y es mostrada a continuación:

$$Z = \begin{bmatrix} Z_{aa} & & \\ Z_{ab} & Z_{bb} & \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Para calcular las reactancias capacitivas propias y mutuas de cada conductor se utilizan las siguientes fórmulas:

$$X_{aa} = \frac{6.596}{f} \log \frac{d_{aa'}}{r} \text{ M}\Omega \times \text{Km.} \quad (4.8)$$

$$X_{bb} = \frac{6.596}{f} \log \frac{d_{bb'}}{r} \text{ M}\Omega \times \text{Km.} \quad (4.9)$$

$$X_{cc} = \frac{6.596}{f} \log \frac{d_{cc'}}{r} \text{ M}\Omega \times \text{Km.} \quad (4.10)$$

$$X_{ab} = X_{ba} = \frac{6.596}{f} \log \frac{d_{ab'}}{d_{ab}} \text{ M}\Omega \times \text{Km.} \quad (4.11)$$

$$X_{bc} = X_{cb} = \frac{6.596}{f} \log \frac{d_{bc'}}{d_{bc}} \text{ M}\Omega \times \text{Km.} \quad (4.12)$$

$$X_{ac} = X_{ca} = \frac{6.596}{f} \log \frac{d_{ac'}}{d_{ac}} \text{ M}\Omega \times \text{Km.} \quad (4.13)$$

Las distancias  $dab'$ ,  $dbc'$  y  $dac'$  se muestran en la figura 4.2

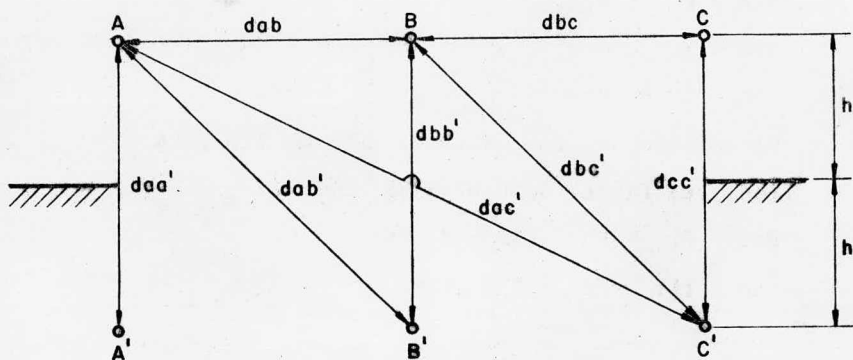


Fig. 4.2 Arreglo de conductores de una línea de distribución y sus imágenes a tierra.

De la formulas 4.8 a 4.13 se obtienen las reactancia capacitivas propias y mutuas, y aplicando las siguientes ecuaciones:

$$X_c = \frac{1}{\omega C}$$

$$C = \frac{1}{\omega X_c} \quad (4.14)$$

La ec. 4.14 representa el valor de la capacitancia.

El esquema mostrado en la fig. 4.1 es uno de los esquemas utilizados en México por la Compañía de Luz y Fuerza del

Centro, la especificaciones de los parámetros son:

$$dab = 0.762 \text{ Mts.}$$

$$dbc = 0.965 \text{ Mts.}$$

$$dca = 1.727 \text{ Mts.}$$

$$h = 10.66 \text{ Mts.}$$

El calibre del conductor es ACSR de 1/0 para las tres fases; de tablas se obtiene:

$$Raa = Rbb = Rcc = 0.5518 \Omega/\text{Km.}$$

$$raa = rbb = rcc = 0.0146282 \text{ m.}$$

Con los datos anteriores aplicados a las ecuaciones necesarias se obtienen las siguientes matrices:

$$\begin{bmatrix} 0.61057+j(0.82715) & & \\ 0.05877+j(0.52925) & 0.61057+j(0.82715) & \\ 0.05877+j(0.46760) & 0.05877+j(0.51145) & 0.61057+j(0.82715) \end{bmatrix} \quad \text{----- (4.15)}$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.61057 & & \\ 0.05877 & 0.61057 & \\ 0.05877 & 0.05877 & 0.61057 \end{bmatrix} \quad \Omega/\text{Km.} \quad (4.16)$$

$$L = \begin{bmatrix} 2.1940 & & \\ 1.4038 & 2.1940 & \\ 1.2403 & 1.3566 & 2.1940 \end{bmatrix} \quad \text{mH./Km.} \quad (4.17)$$

$$C = \begin{bmatrix} 7.6268 \times 10^{-3} & & \\ -16.675 \times 10^{-3} & 7.6268 \times 10^{-3} & \\ -22.067 \times 10^{-3} & -17.946 \times 10^{-3} & 7.6268 \times 10^{-3} \end{bmatrix} \frac{\mu F}{km.} \quad (4.18)$$

Las tres últimas matrices representan (R, L y C) y son los parámetros de la línea mostrada en la fig. 4.1.

Una línea se puede analizar como parámetros distribuidos, parámetro concentrados o secciones  $\pi$ , la forma más común es la de parámetros concentrados, debido a que el problema de cálculo se simplifica en gran medida.

#### 4.1.2 Modelación de fuentes.

La modelación de fuentes para su simulación en la computadora es muy sencilla, ya que el EMTP considera varios tipos de fuentes de excitación y las identifica con un número clave.

En este estudio se usará la fuente de excitación senoidal, ya que en los sistemas de distribución se trabaja con corriente alterna, la fuente que el EMTP considerará es de la siguiente forma:

$$f(t) = F_{\max} \cos (wt + \theta)$$

Donde:

- $f(t)$  Es la fuente de excitación a introducir (corriente o tensión).
- $w$  Es la frecuencia angular de la fuente de tensión o corriente.
- $e$  Es el ángulo en el cual define un punto sobre la onda cuando un interruptor cierra.
- $F_{\text{máx}}$  Es el valor pico de la función.

Para obtener mayor información sobre diferentes tipos de fuentes que considera el programa se deberá consultar el manual del usuario del EMTP.

#### 4.1.3 Modelación de interruptores.

El EMTP considera dos tipos de interruptores como son:

- Interruptor de tiempo controlado
- Interruptor de tensión dependiente

En el presente estudio el tipo de interruptor más importante es el de tiempo controlado, ya que éste se puede manejar en la forma que más convenga para realizar una mejor simulación; lo único que se necesita para su simulación es un tiempo de cierre y otro de apertura.



#### 4.1.4 Modelación de transformadores.

Para modelar los transformadores se utiliza el siguiente circuito:

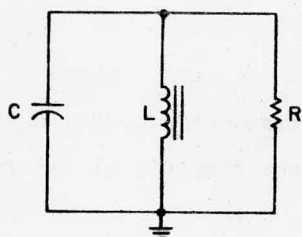


Fig. 4.3 Circuito equivalente de un transformador

Donde:

- C Representa la capacitancia parásita del transformador.
- L Representa la bobina de un transformador (inductancia no lineal)
- R Representa las pérdidas en el hierro.

#### 4.2 SIMULACION DIGITAL.

Esta sección constituye la parte más importante del presente capítulo, la simulación se realiza desde un estado transitorio hasta el estado estable del sistema considerado, las simulaciones que aquí se llavan a cabo son:

- Transitorios en circuitos simples.
- Tensión transitoria de restablecimiento.
- Transitorios producidos por maniobra.
- Transitorios producidos por fallas.

Para mejor comprensión del análisis de cada una de las simulaciones mencionadas se han obtenido las gráficas correspondientes al comportamiento, la corriente y/o tensión en cada una de las fases con respecto al tiempo.

#### **4.2.1 Transitorios en circuitos simples.**

Para realizar la simulación digital de un circuito es necesario que sus elementos tengan un valor numérico bien especificado.

El circuito que se utilizó en este estudio, es el mostrado en en la figura 4.4, mismo que se analizó en el capítulo 1, y su respuesta esta dada por las ecs. 1.62, 1.63 y 1.64

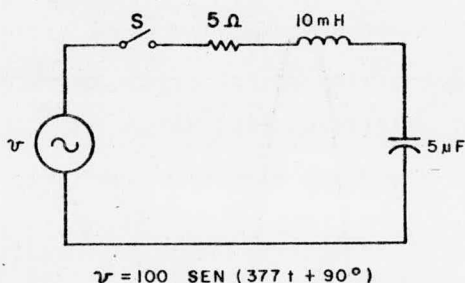
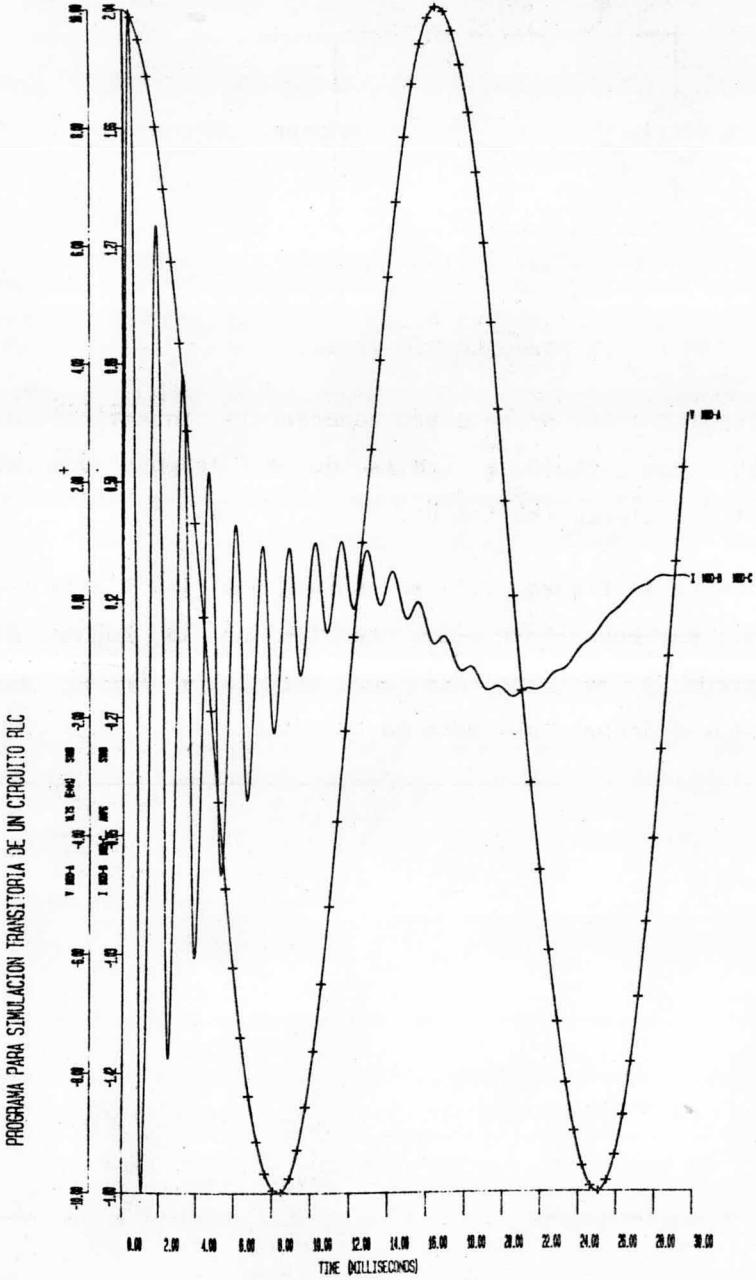


Fig. 4.4 Circuito RLC serie.

En el circuito anterior se desea conocer la intensidad de corriente que fluye a través de él después que el interruptor S cierra (en  $t = 0$ ).

La gráfica de la figura 4.5 se obtuvo de la simulación digital, y representa la tensión de la fuente de alimentación y la corriente que circula a través del interruptor S después que éste ha cerrado.

Fig. 4.5



#### 4.2.2 Tensión transitoria de restablecimiento.

En el capítulo 2 se analizó el circuito que se muestra en la figura 4.6

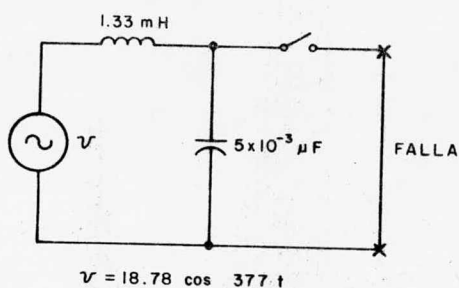


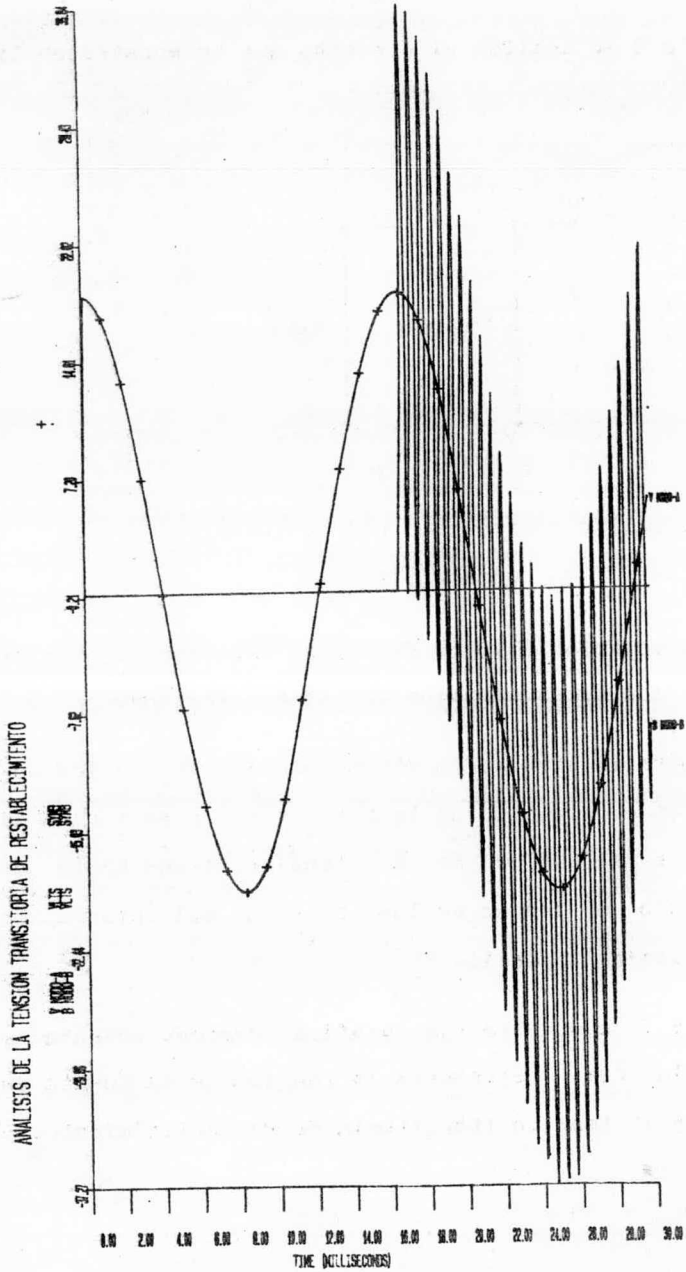
Fig. 4.6 Circuito equivalente para estudiar la TTR en forma digital.

Recordando la ecuación 2.7, la TTR puede alcanzar un valor pico de hasta dos veces el valor cresta del sistema,

Los valores para la simulación digital de la TTR son los que se muestran en el circuito de la fig. 4.6, en este caso se desea calcular el valor de la tensión transitoria de restablecimiento a través de los contactos del interruptor cuando éste elimina la falla.

En la figura 4.7 se muestra la gráfica correspondiente a éste caso, la cual representa la tensión de la fuente de alimentación y la tensión transitoria de restablecimiento.

Fig. 4.7



### 4.2.3 Transitorios debidos a maniobra

Para estudiar la maniobra de una línea de distribución se utilizarón los datos de las matrices 4.16, 4.17 y 4.18, la cuales se obtuvieron del análisis de una línea de distribución real (utilizada por C L y F C).

El circuito utilizado se muestra en la figura 4.8.

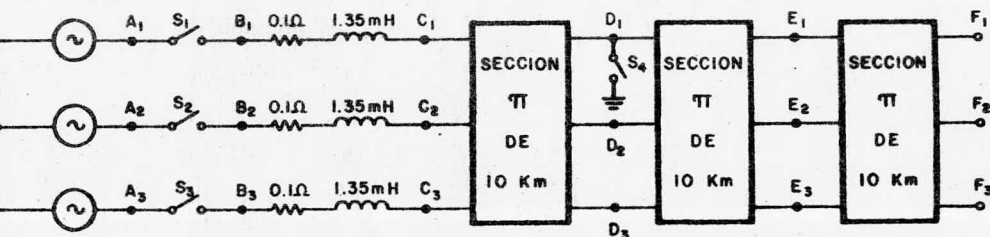


Fig. 4.8 Circuito para el análisis de una línea de distribución.

Para introducir los datos a la computadora es necesario decidir en que forma se desea representar la línea (parámetros concentrados, parámetros distribuidos o circuitos  $\pi$ ). Para el presente trabajo se utilizaron los circuitos  $\pi$  tal como se mostró en la figura anterior. Las fuentes de alimentación se consideraron monofásicas, o sea:

Para el nodo  $A_1$  a tierra  $v_1 = 18.78 \cos (377t)$

Para el nodo  $A_2$  a tierra  $v_2 = 18.78 \cos (377t + 120^\circ)$

Para el nodo  $A_3$  a tierra  $v_3 = 18.78 \cos (377t + 240^\circ)$

R y L representan la impedancia interna del generador, para esta línea se desea calcular la variación de las tensiones con respecto a el tiempo en los nodos A, D y F en las tres fases ( $A_1, A_2, A_3, D_1, D_2, D_3, F_1, F_2$  Y  $F_3$ ). Las gráficas correspondientes se muestran en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11 respectivamente.



PROGRAMA PARA SIMULAR EL TRANSITORIO DE MANIOBRA EN UNA LINEA

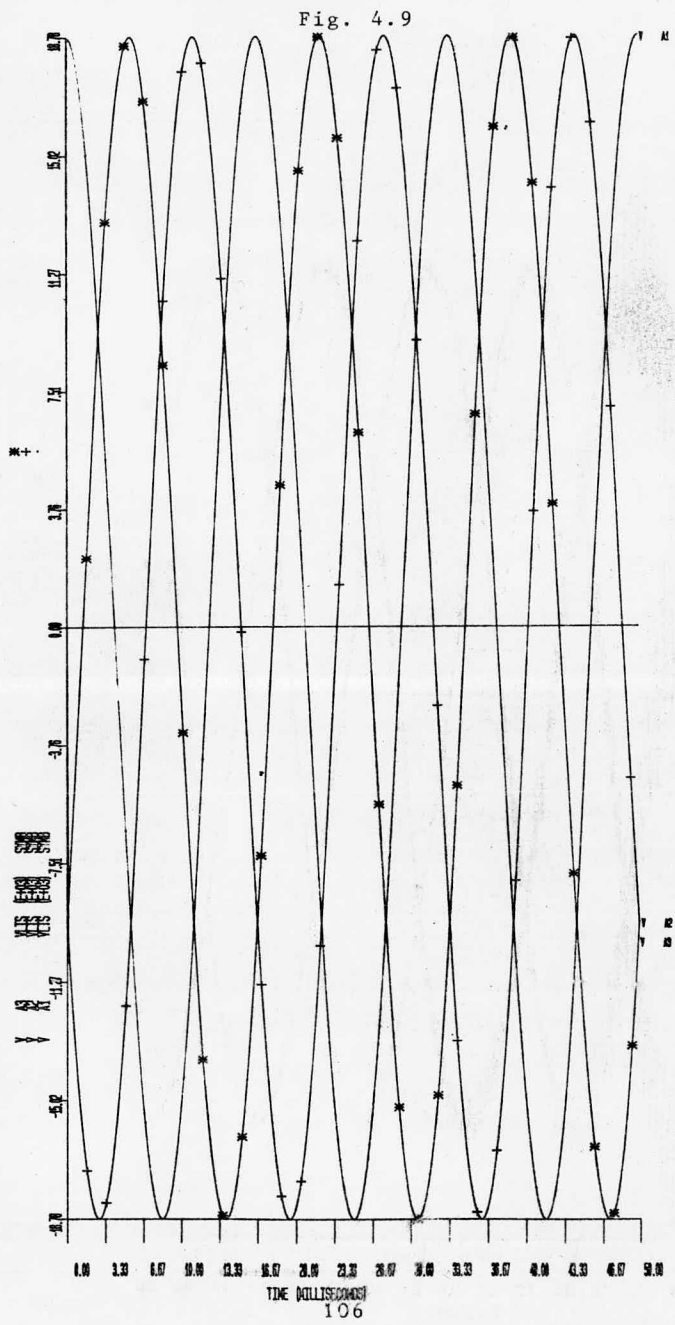
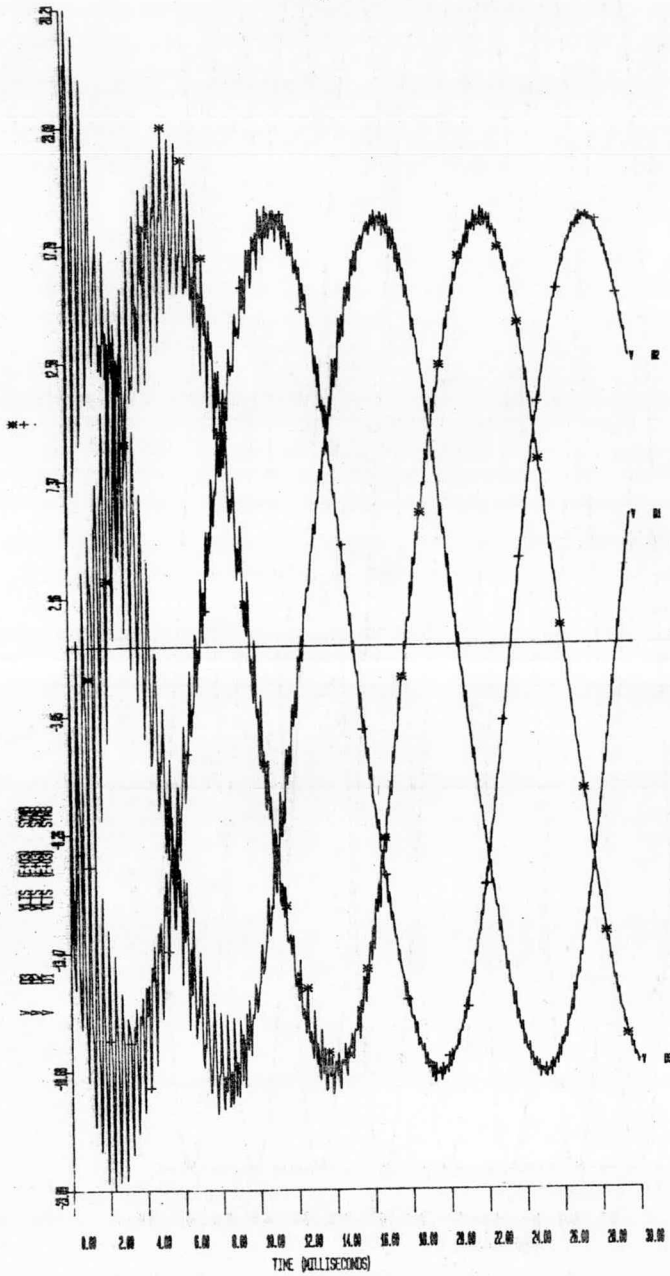


Fig. 4.10

PROGRAMA PARA SIMULAR EL TRANSITORIO DE MANTIDERA EN UNA LINEA



PROGRAMA PARA SIMULAR EL TRANSITORIO DE MANTOBERA EN UNA LINEA

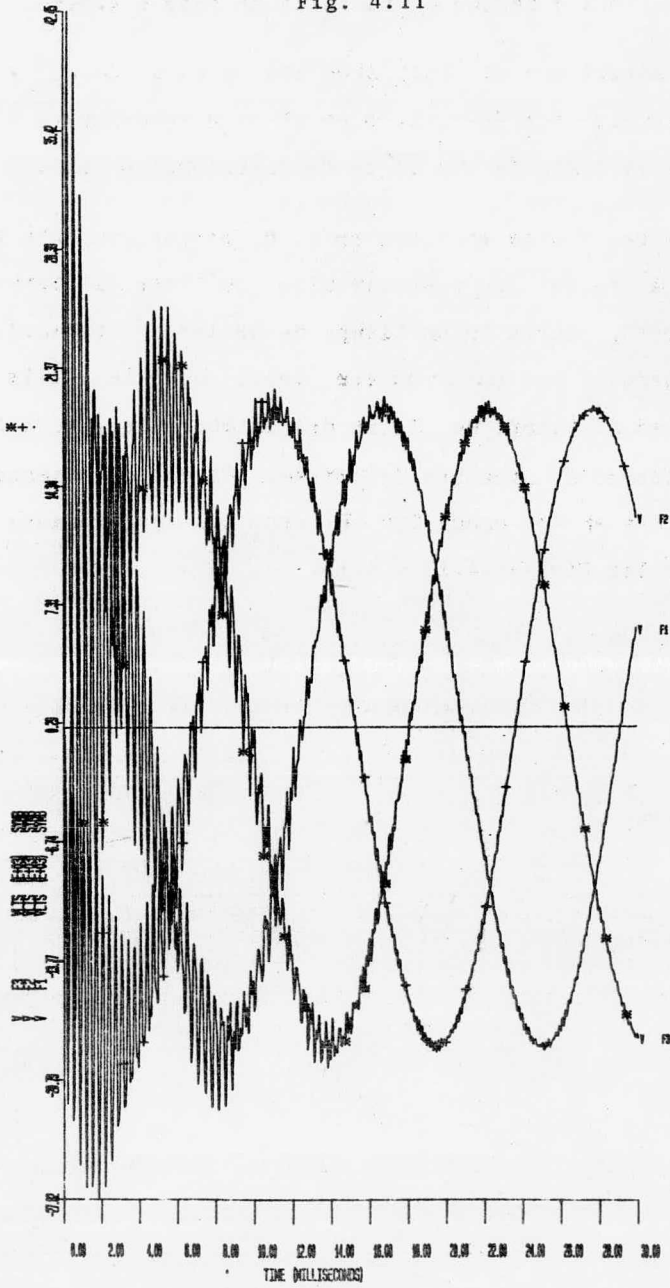


Fig. 4.11

#### 4.2.4 Transitorios debido a una falla de fase a tierra.

Para esta simulación se utilizaron los mismos datos y el mismo circuito que se utilizó en el caso anterior (4.2.3), puesto que se trata de una línea de distribución real.

Primero se realizó la maniobra en  $t = 0$ , posteriormente para simular la falla de cortocircuito de fase a tierra el interruptor  $S_4$  cierra en un tiempo de 35 mseg. y abre en  $t = 48.45$  mseg. Lo cual quiere decir que la falla se establece en el tiempo de cierre del interruptor y se libera en el tiempo de apertura del mismo. El comportamiento de las tensiones en los nodos D y F (en las tres) fases se muestra en las figuras 4.12 y 4.13.

PROGRAMA PARA SIMULAR EL TRANSITORIO DE FALLA EN UNA LINEA

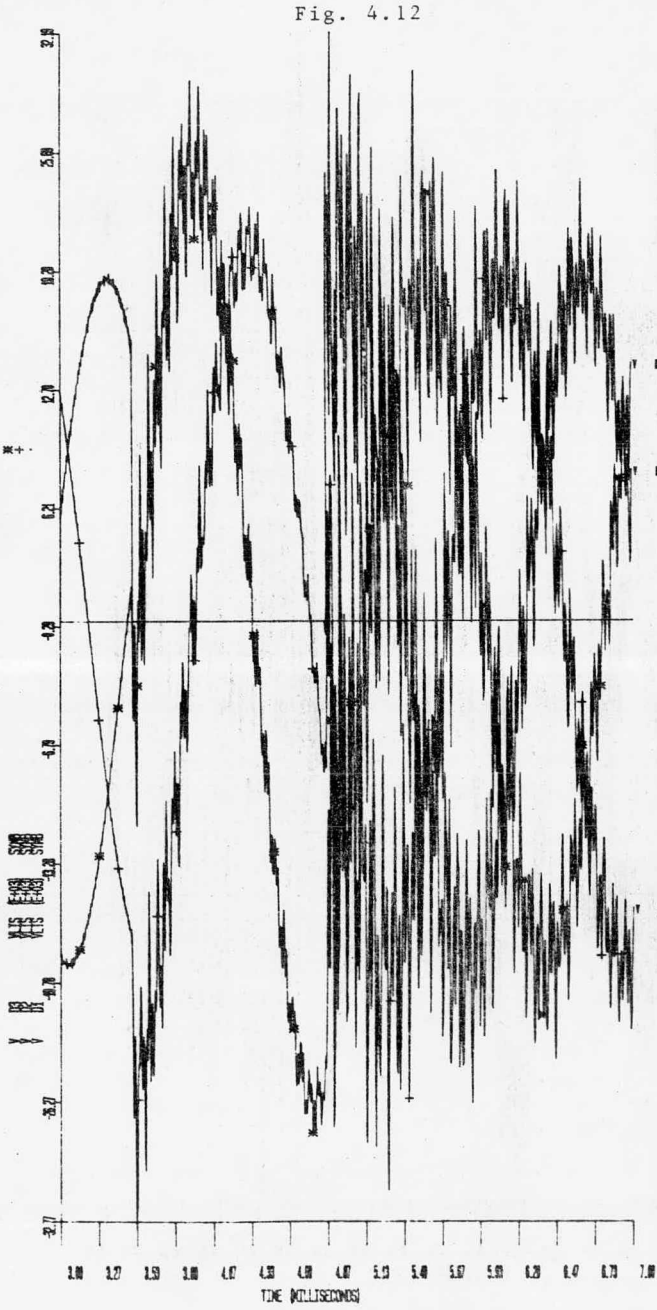
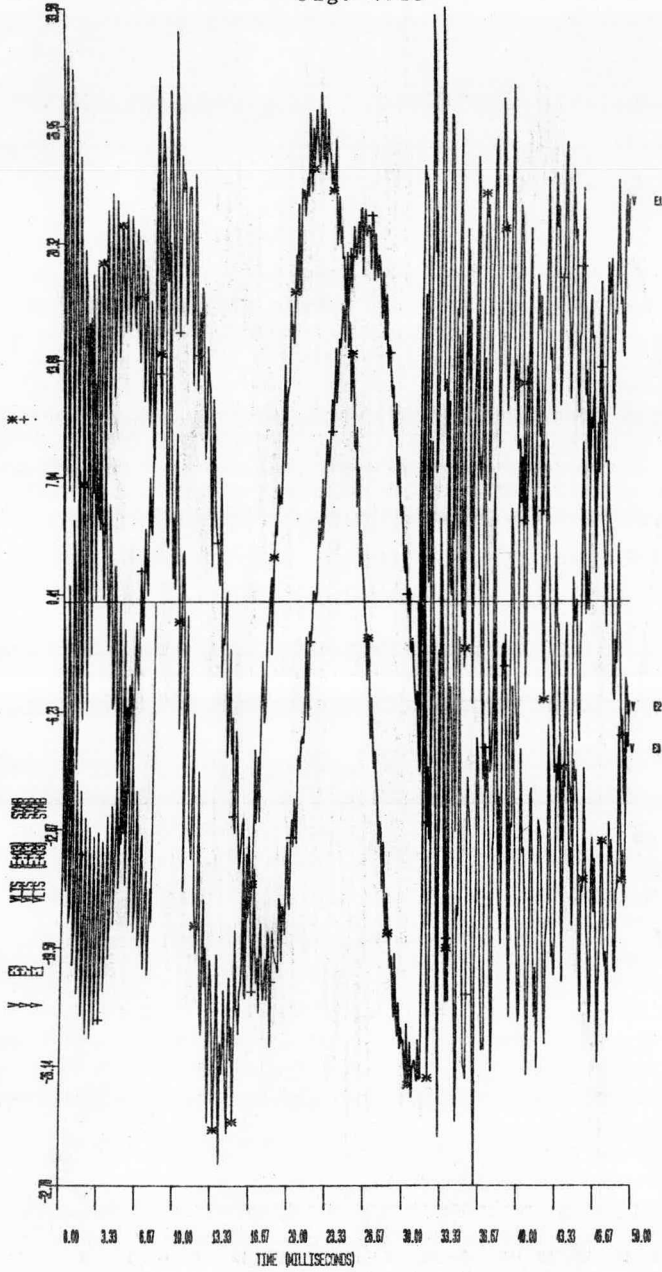


Fig. 4.12

Fig. 4.13

PROGRAMA PARA SIMULAR EL TRANSITORIO DE FALLA EN UNA LINEA



## CAPITULO 5

### EFECTO DE LOS TRANSITORIOS DE TENSION EN EQUIPOS DE DISTRIBUCION.

En el presente capítulo se analizará el efecto que producen los impulsos de tensión a equipos de distribución. En el capítulo 3 se dió un panorama general de como se pueden estimar los transitorios de tensión debido a descargas atmosféricas, maniobra y fallas, pero no el efecto dañino ocasionado por este tipo de transitorios.

#### 5.1 COMPORTAMIENTO DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION ANTE LA APLICACION DE IMPULSOS DE TENSION.

La respuesta de los devanados del transformador ante impulsos de sobretensión ha atraído el interés de varios investigadores por muchos años.

El devanado de un transformador es representado por el circuito de la figura 5.1, el cual muestra un número finito de mallas. Se supone que sus capacitancias están uniformemente distribuidas a lo largo del devanado.

Analizando dicho circuito en forma infinitesimal cada

longitud corta del conductor tendrá una capacitancia a tierra y una adyacente a las vueltas. Las capacitancias anteriores son representadas en la fig. 5.1a la cual muestra que el neutro del devanado puede o no ser aterrizado. Respecto a la distribución inicial de tensión se supone que ninguna corriente ha penetrado en el devanado, por lo tanto únicamente la red de las capacitancias es efectiva en ese instante, y la respuesta será igual a cualquier frecuencia. La capacitancia a tierra es  $C_g$  y la del extremo a extremo del devanado es  $C_s$ , o sea:

$$\frac{\text{Capacitancia a tierra}}{\text{unidad de longitud}} = \frac{C_g}{l}$$

$$\frac{\text{Capacitancia serie}}{\text{unidad de longitud}} = C_s l$$



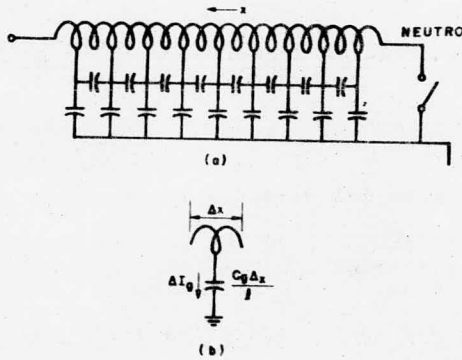


Fig. 5.1.

a).- Representación esquemática del devanado de un transformador.

b).- Longitud infinitesimal  $\Delta X$  del devanado.

Se ha establecido la dirección del neutro al otro extremo del devanado como positiva, se considera una longitud de  $\Delta X$  como se muestra en la fig. 5.1b, por lo tanto la capacitancia a tierra será:  $(C_g/l)\Delta X$  y la corriente a tierra a través de esta es:

$$\Delta I_g = (C_g \Delta x \omega E) / l \quad (5.1)$$

$\omega$  es la frecuencia angular de la tensión  $E$  pero:

$$\Delta I_g = \frac{dI_s}{dx} \Delta x \quad (5.2)$$

Combinando las ecs. anteriores se obtiene:

$$\frac{dI_s}{dx} = \frac{C_{gw}E}{\lambda} \quad (5.3)$$

La capacitancia serie de la longitud infinitesimal es:

$$\frac{\lambda C_s}{\Delta x} \quad (5.4)$$

La tensión a través del elemento es:

$$\frac{dE}{dx} \Delta x \quad (5.5)$$

Se sabe que la corriente capacitiva serie es:

$$C \frac{dE}{dt}$$

Por lo tanto combinando las ecs. 5.4 y 5.5 se obtiene:

$$I_s = \frac{\lambda C_s}{\Delta x} \frac{dE}{dt} \frac{dE}{dx} \Delta x \quad (5.6)$$

$$\frac{dI_s}{dx} = \lambda C_{sw} \frac{d^2 E}{dx^2}$$

Igualando 5.3 y 5.6 se obtiene:

$$\frac{C_{gw}E}{\lambda} = \lambda C_{sw} \frac{d^2 E}{dx^2} \quad (5.7)$$

$$\frac{d^2 E}{dx^2} - \frac{1}{\lambda^2} \frac{C_g}{C_s} E = 0$$

Como se mencionó al principio, la ecuación es independiente de la frecuencia ( $\omega$ ). La solución de la ecuación diferencial es:

$$E = A_1 e^{px} + A_2 e^{-px} \quad (5.8)$$

Donde:

$$p = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\frac{Cg}{Cs}}$$

Las constantes  $A_1$  y  $A_2$  dependen de las condiciones del problema. Para el caso con neutro aterrizado se tiene:

$$\text{en } x = 0 \quad E = 0$$

$$\text{en } x = \lambda \quad E = V$$

Siendo  $V$  la amplitud de la sobretensión del impulso, incertando las condiciones anteriores se tiene:

$$A_1 + A_2 = 0 \quad \text{-----} \rightarrow \quad A_1 = -A_2$$

$$A_1 e^{p\lambda} + A_2 e^{-p\lambda} = V \quad (5.9)$$

Sustituyendo los valores se tiene:

$$A_1 e^{\alpha} + A_2 e^{-\alpha} = V$$

Donde:

$$\alpha = \sqrt{\frac{Cg}{Cs}}$$

$$A_1 (e^{\alpha} - e^{-\alpha}) = V$$

Por lo tanto:

$$A_1 = \frac{V}{2 \sinh \alpha} = -A_2 \quad (5.10)$$

Sustituyendo 5.10 en la ec. 5.9

$$E = \frac{V}{2 \sinh \alpha} \left[ e^{px} - e^{-px} \right] = \frac{V \sinh (\alpha x / \lambda)}{\sinh \alpha} \quad (5.11)$$

Ahora analizando el caso cuando el neutro se encuentra aislado:

$$\begin{aligned} \text{En } x = \lambda & \quad E = V \\ \text{En } x = 0 & \quad I_s = 0 \quad \text{ó} \quad dE/dx = 0 \end{aligned}$$

se tiene que:

$$\begin{aligned} V &= A_1 e^{p\lambda} + A_2 e^{-p\lambda} \\ 0 &= p(A_1 - A_2) \end{aligned} \quad (5.12)$$

Por lo tanto:

$$A_1 = A_2$$

Sustituyendo  $A_1$  y  $A_2$  en la ec. 5.12 se tiene:

$$V = A(e^{p\lambda} + e^{-p\lambda}) \quad \text{---->} \quad A_1 = A_2 = \frac{V}{2 \cosh \alpha} \quad (5.13)$$

Sustituyendo 5.13 en 5.8 se llega a:

$$E = \frac{V}{2 \cosh \alpha} \left[ e^{px} + e^{-px} \right] = \frac{V \cosh (\alpha x / \lambda)}{\cosh \alpha} \quad (5.14)$$

Las ecs. 5.11 y 5.14 describe la distribución de tensión inicial para los devanados ante la aplicación de una

sobretensión de impulso, como se observa ambas expresiones dependen de  $\alpha$ , la figura 5.2 muestra los resultados para cada uno de los casos.

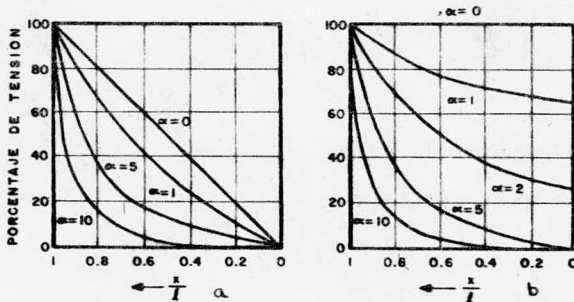


Fig. 5.2 Distribución inicial de tensión en un devanado uniforme en respuesta a un impulso de sobretensión.

a) Neuto aterrizado.      b) Neuto aislado.

Se observa de las gráficas que la distribución inicial no es uniforme y depende de los valores de alfa ( $\alpha$ ) cuando  $\alpha$  toma un valor de 10 el 60% de la tensión se desarrolla a través del primer 10% del tramo final del devanado.

El gradiente preciso en esta terminal se puede obtener diferenciando las ecs. 5.11 y 5.14

a) Neuto aterrizado.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\alpha}{l} V \frac{\cosh(\alpha x/l)}{\sinh \alpha}$$

$$\text{si } x = l \quad \frac{dE}{dx} = \frac{\alpha V}{l} \coth \alpha$$

b) Neutro aislado

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\alpha}{l} V \frac{\sinh(\alpha x/l)}{\cosh \alpha}$$

$$\text{si } x = l \quad \frac{dE}{dx} = \frac{\alpha V}{l} \tanh \alpha$$

Para valores grandes de alfa  $\coth = \tanh = 1$

asi en ambos casos se tiene:

$$\frac{dE}{dx} = \alpha \frac{V}{l}$$

El cual es alfa veces el mismo gradiente.

De lo anterior se deduce que las vueltas del extremo final del devanado estan severamente sometidas a esfuerzos desde el punto de vista aislamiento. La distribución inicial de tensión da lugar a un sistema de oscilaciones dentro del devanado del transformador. El potencial de un punto da lugar a un transitorio de un cierto valor inicial, el cual va a oscilar alrededor de un valor final.

Considerando una de las curvas de la fig. 5.2a por ejemplo  $\alpha = 10$ , el valor de distribución final será uniforme correspondiente a  $\alpha = 0$  para el caso en que el neutro no esta aterrizado. La excursión de cualquier punto en el devanado durante la oscilación casi siempre esta dentro de una envolvente formada por la reflexión de la distribución inicial a la distribución final como se muestra en la figura

5.3.

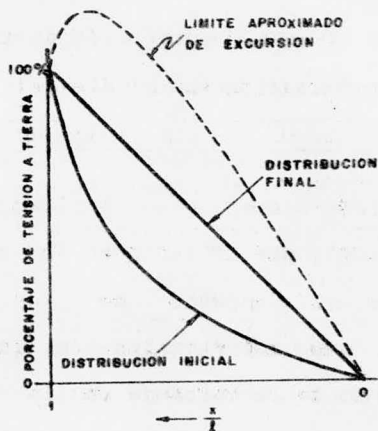


Fig. 5.3 Oscilaciones de tensión en el devanado de un transformador, con distribución inicial y la excursión límite aproximada.

De la fig. 5.3 la curva punteada indica un límite a el cual en algún tiempo muchos puntos pueden aproximarse.

## 5.2 RESPUESTA DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION ANTE APLICACION DE IMPULSOS PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFERICAS.

Pocos estudios se han enfocado para determinar los efectos que producen las sobretensiones de origen atmosférico sobre los transformadores de distribución, sin embargo para la elaboración de este trabajo se ha realizado una búsqueda muy intensa de documentos que traten el efecto de las descargas

atmosférica sobre los transformadores de distribución, y pocos son los que dan información específica del efecto de dicho fenómeno.

Las descargas atmosféricas tienen gran influencia en los sistemas de distribución y por lo tanto en sus componentes, ya que como se sabe el fenómeno de las descargas atmosféricas producen una sobretensión en las líneas de distribución, dependiendo de la cercanía en la cual dicha descarga tiene lugar. Actualmente las redes de distribución no poseen un sistema de protección confiable, por lo tanto el equipo y las líneas de distribución están expuestas a sobretensiones de carácter atmosférico, las cuales pueden viajar distancias considerables a lo largo de la línea y producir flameos en aisladores o en las boquillas de los transformadores.

Para continuar se debe recordar que existen dos tipos de descargas las cuales ya han sido mencionadas en el capítulo 3, y son:

- Descargas directas a la línea
- Descargas inducidas a la línea

Cuando ocurre una descarga directa a la línea esta puede ocasionar daños catastróficos tanto en la línea de distribución como en su propio equipo.

Los efectos producidos por los impulsos de origen



atmosférico en las redes de distribución dan origen a sobretensiones y éstas a su vez daños sobre todo el sistema. Las sobretensiones que ocasionan daños son las llamadas de larga duración (del orden de m seg.), el efecto se refleja en el transformador como un cambio en el flujo de operación en el instante de la aplicación de las sobretensiones, y por lo tanto tomarán parte las corrientes anormales que producen efectos dañinos a las protecciones primarias de dicho transformador.

En base a estudios teóricos y experimentales realizados internacionalmente sobre la respuesta de los transformadores se ha llegado a la conclusión de que en la aplicación de impulsos de tensión de larga duración a un transformador energizado provoca la existencia de cinco componentes transitorias de corriente.

Cuando un transformador se encuentra protegido con apartarrayos siempre estará sujeto a las sobretensiones de corta y larga duración, de magnitudes inferiores o iguales a la tensión de descarga del apartarrayos, además los apartarrayos utilizados en México limitan las sobretensiones aproximadamente a 50 Kv., esto quiere decir que la tensión de descarga del apartarrayos es de 50 Kv.

La magnitud cercana a 50 Kv. es suficiente para provocar una saturación en los núcleos de los transformadores de distribución que están siendo utilizados, normalmente son de

112.5 y 75 KVA.

Bajo ciertas circunstancias de descarga directa de rayo a la línea primaria, grandes corrientes pueden circular hacia el devanado secundario aterrizado del transformador de distribución cuando un apartarrayos funciona adecuadamente para proteger el devanado primario, tales corrientes ocasionalmente pueden destruir por completo el devanado de los transformadores.

### 5.3 COMPORTAMIENTO DE LOS FUSIBLES DE PROTECCION PRIMARIOS ANTE LA APLICACION DE IMPULSOS DE TENSION.

En la sección anterior se estudió el efecto del fenómeno de las sobretensiones de origen atmosférico sobre el transformador de distribución, ahora se trata de estudiar el efecto del mismo fenómeno sobre los fusibles de protección primaria.

Para llevar a cabo este estudio fué necesario recopilar información acerca de los fusibles operados en Compañía de Luz y Fuerza del Centro, los cuales se les atribuye la operación debido a las descargas atmosféricas, ya que la mayoría de ellos operan en tiempo de lluvias.

En el capítulo 3 se mencionó brevemente como se pueden medir las magnitudes pico de las corrientes de rayo por medio de

dispositivos simples (detectores de corriente de rayo), los cuales registran la magnitud máxima del pico de la corriente de rayo con un error del  $\pm 10\%$ . y de esta manera se verifica la existencia de sobretensiones y por lo tanto sobrecorrientes asociadas por el fenómeno de las descargas atmosféricas en las redes de distribución energizadas.

En base a dichas mediciones de las corrientes de rayo fué posible determinar que estas no circulan en su totalidad a través del fusible, debido principalmente a la alta impedancia característica que presenta, sino más bien una pequeña porción de ésta es la que circula a través del fusible y cuyo efecto en éste es el envejecimiento prematuro.

De acuerdo con las mediciones de las corrientes de rayo en las redes de Compañía de Luz y Fuerza del Centro se concluye que la manitud de tales corrientes se encuentran en el rango de 3 a 5 KA.

Cuando los transformadores de distribución no se encuentran protegidos con apartarrayos, el sistema de distribución esta expuesto a sobretensiones que pueden causar flameos tanto en aisladores como en las terminales de los transformadores.

Tomando como base varias pruebas realizadas en diferentes partes del mundo se llega a la siguiente conclusión:

Cuando ocurren flameos en las terminales de los

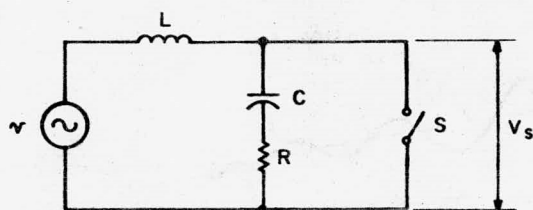
transformadores éstos conducen necesariamente a la operación de los fusibles de protección primaria, esto es debido a que cuando ocurre un flameo se simula un cortocircuito momentáneo y por lo tanto el flujo de corriente que pasa por el fusible aumenta, causándole la operación.

La instalación de los apartarrayos para la protección de los transformadores de distribución contra las sobretensiones limita en gran medida el número de flameos en los sistemas de distribución y en consecuencia la operación de los fusibles por dicha sobretensión.

#### **5.4 COMPORTAMIENTO DE LOS INTERRUPTORES BAJO LA TENSION TRANSITORIA DE RESTABLECIMIENTO.**

La magnitud de la sobretensión que se presenta entre los contactos del interruptor depende del tipo de falla o carga de la cual se trate de aislar o desconectar. En los capítulos 2 y 3 se realizó un análisis ideal de la tensión que se presenta entre los contactos del interruptor cuando este desconecta una carga capacitiva, así como el caso en que suceden reencendidos en el pico de la tensión, se observó que la sobretensión que se presenta bajo estas condiciones es muy alta y puede ocasionar daños permanentes en la superficie de los contactos debido a las fuerzas electrodinámicas originadas por la corriente y tensión de arco.

Para una buena selección de los interruptores que deberán ser usados en las redes de distribución, estos son llevados al laboratorio para que se les efectuen pruebas bajo normas adecuadas. Como el caso que aquí se trata es la TTR, se pone como ejemplo un circuito utilizado para pruebas de apertura de un interruptor, el cual se muestra en la figura 5.4.



$$v = V_{SEN}(\omega t + 90^\circ)$$

Fig. 5.4 Circuito para la prueba de interruptores.

Realizando un análisis matemático del circuito anterior bajo la filosofía de los capítulos 1, 2, y 3 se llega a la siguiente ecuación.

$$V_s = V \left[ 1 - e^{-\alpha t} \left[ \cos \beta t - \frac{\alpha}{\beta} \text{sen} \beta t \right] \right]$$

Donde:

$V_s$  Es la tensión transitoria de restablecimiento

$V$  Es la tensión pico del sistema.

$\alpha$  y  $\beta$  Estan especificada en el capítulo 1  
(sección 1.2.3)

Una gráfica aproximada de la Ecuación anterior se puede observar en la figura 5.5 y los valores reales de las amplitudes, tiempos y otros parámetros se pueden consultar en las normas IEC56 - 1 a 4.

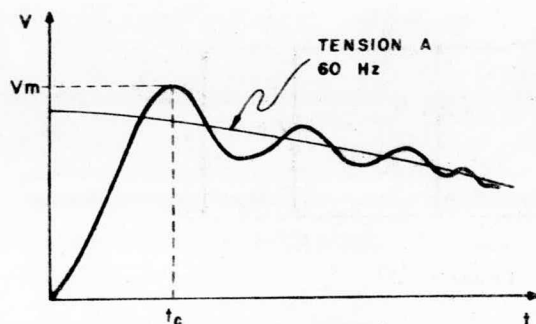


Fig. 5.5 Forma de la TTR.

Cabe aclarar que todos los equipos de distribución son sometidos a pruebas bajo normas adecuadas en los laboratorios y que el desarrollar y analizar el tipo de pruebas, normas y características son motivo de otros trabajos debido a su gran variedad de temas.

## CONCLUSIONES

Este trabajo fué realizado con la finalidad de contribuir en la comprensión del fenómeno transitorio y conocer cuales son los parámetros que influyen en dicho fenómeno, se elaboró un estudio analítico de los transitorios en circuitos simples para condiciones ideales y de éste se aprecia que la sobretensión transitoria generada por el cierre o apertura de un interruptor alcanza un valor hasta de dos veces el valor pico del sistema.

Los equipos de distribución se ven fuertemente afectados debido a las sobretensiones generadas por:

Descargas atmosféricas

Operación de maniobra

Fallas.

De acuerdo al análisis realizado durante todo el desarrollo de este trabajo se concluye que las descargas atmosféricas influyen directamente en el comportamiento del sistema, además en ocasiones este tipo de sobretensiones puede provocar el rompimiento de los conductores de fase, la operación no necesaria de los fusibles de protección primaria y dañar el aislamiento del devanado de los

transformadores de distribución.

Las sobretensiones debido a la operación de maniobra toman parte en el momento que se cierra o se abre una sección de línea que no tiene carga conectada a ella, ya que las sobretensiones de mayor magnitud debido a maniobra se presentan cuando la línea esta en circuito abierto.

Las sobretensiones producidas por fallas son las de mayor influencia en los interruptores, la sobretensión que aparece inmediatamente después de que el interruptor abre para aislar la falla se le conoce como Tensión Transitoria de Restablecimiento (TTR) y la magnitud de esta dependerá de del valor de los parámetros del sistema y en consecuencia de la frecuencia natural del mismo.

Una buena selección de los equipos de distribución se lleva a cabo tomando en cuenta las sobretensiones citadas, esta selección será uno de los factores principales para tener una operación continua y eficiente en los sistemas de distribución de la energía eléctrica y de esta manera contribuir en el desarrollo industrial de nuestro país.

De acuerdo al análisis digital realizado en la sección 4.2.3 se concluye que la sobretensión que se genera por la operación de maniobra, alcanza un valor de hasta 1.5 veces la tensión pico del propio sistema y cuando se presenta una falla de fase a tierra la sobretensión puede crecer hasta un



valor de 1.7 veces la tensión pico del sistema en el momento de liberarla.

Las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas se pueden limitar en gran medida instalando hilos de guarda y apartarrayos en el sistema. Las sobretensiones producidas por fallas dependen del valor de la impedancia de falla, mientras más grande es esta la sobretensión inducida en la fase o fases no falladas se incrementa.

## BIBLIOGRAFIA

1. Peterson H.A. (1966) "TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS" Dover Publication, Inc. New York.
2. Greenwood Allan N. (1971) "ELECTRIC TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS" John Willey and Sons, Inc. New York.
3. Aidala, Joseph B. Katz, Leon (1980) "TRANSIENTS IN ELECTRIC CIRCUITS" Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs. New York Jersey 07632
4. Dommel Hermann W. (1969) "DIGITAL COMPUTER SOLUTION OF ELECTROMAGNETIC TRANSIENTS IN SINGLE AND MULTIPHASE NETWORKS" Trans. IEEE Pas, Vol, 88, p.p. 388 - 399
5. Vincent Del Toro "PRINCIPLES OF ELECTRICAL ENGINEERING" Prentice-Hall.
6. Westinghouse Electric Corporation power systems "SURGE PROTECTION OF POWER SYSTEMS"

7. Joseph A. Edminister "CIRCUITOS ELECTRICOS"  
Mc. Graw Hill

8. Jacinto Viqueira Landa "REDES ELECTRICAS"  
Representación y Servicios de Ingeniería Tomo II

9. Alfonso Avila R. Abel Dominguez B. Alfonso  
Garcia R. "COMPORTAMIENTO ELECTRICO DE LOS  
FUSIBLES PARA TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION TIPO  
POSTE BAJO CONDICIONES DE IMPULSO POR DESCARGAS  
ATMOSFERICAS", Memoria mexicana 1983

10. Edith Clarke, S. B. Crary, H. A. Peterson  
"OVERVOLTAGES DURING POWER SYSTEMS FAULTS" AIEE  
Trans. August 1939 Vol. 58 p.p. 377-385

11. Robert E. Friedrich. IEEE TUTORIAL COURSE.  
"APPLICATION OF POWER CIRCUITS BREAKERS" A  
Continuig Education Service of the IEEE Power  
Engineering Society.

12. Blume L.F. Camilli, G. Farnham S. B.  
Peterson H. A. (1944) "TRANSFORMER MAGNETIZING  
INRUSH CURRENTS AND INFLUENCE ON SYSTEM OPERATION"  
Trans. AIEE Vol. 63 p.p. 366 - 375

13. M. E. Van Valkenburg "ANALISIS DE REDES" Ed. Limusa.
14. G. Enriquez Harper "ESTUDIO DE SOBRETENSIONES TRANSITORIAS EN SISTEMAS ELECTRICOS Y DE COORDINACION DE AISLAMIENTO" Vol. II Ed. Limusa.
15. H. W. Dommel "TRANSIENTS PROGRAM USER'S MANUAL
16. Bryant, J. M. Newman, M "ABNORMAL CURRENTS IN DISTRIBUTION TRANSFORMERS DUE TO LIGHTNING" Trans. Electrician Engineering, 1942 p.p. 564 a 568.
17. J. E. Holcomb. "DISTRIBUTION TRANSFORMER MAGNETIZING INRUSH CURRENT" AIEE December 1961 p.p. 697 - 702.
18. BOLETIN IEE" Noviembre/Diciembre de 1983 Vol. 7 No. 6 p.p. 244 - 258.

19. Dominguez Bordes A. (1985) "FERRORESONANCIA:  
SITUACIONES PRACTICAS, METODOS DE ANALISIS Y  
APLICACION DE LA TECNICA DIGITAL AL ESTUDIO DE LA  
FERRORESONANCIA EN UN TRANSFORMADOR DE POENCIAL"  
Tesis de maestria, Centro de Graduados del  
Instituto Tecnológico de la Laguna.

20. NORMAS IEC56 - 51 a 54.