



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

PROBABILIDAD DE FALLA DE LAS LINEAS
DE TRANSMISION EN PRESENCIA DE
DESCARGAS ATMOSFERICAS.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N:
HECTOR MONTAÑO FRIAS
JUAN JOSE LOPEZ MARQUEZ



DIRECTOR
ING. RAFAEL GUERRERO CEPEDA

MEXICO, D. F.

1993.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE GENERAL

	Página
AGRADECIMIENTOS	I
INTRODUCCION	1
1 LA LINEA DE TRANSMISION Y SUS PARAMETROS DE DISEÑO	3
Representación de una línea de transmisión	7
Estado permanente	8
Estado transitorio	13
Parámetros de diseño	20
Criterios de diseño	24
Dimensionamiento dieléctrico	25
Distancias mínimas recomendadas	27
Distancias de fuga para diferentes niveles de contaminación	30
Consideraciones adicionales	31
2 LA DESCARGA ATMOSFERICA Y SU DESARROLLO	35
Acumulación de electricidad en las nubes	36
Teoría de Simpson	36
Teoría de Elster y Geitel	39
Teoría de Wilson	40
Teoría de Cristales de hielo	42
Tipos de nubes	43
Descargas atmosféricas	45
Composición de una descarga	45
Procesos escalonados	49
Mecanismo de descargas múltiples	50
Frente de onda y duración	51
Instrumentos empleados en la medición de descargas atmosféricas	60
Cámara de Boys	60
Spark gaps	61
Klydonograph	62
Oscilógrafo de rayo cátodico	64
Amperímetro magnético por ondas de cresta	64
Oscilógrafo de lámpara cráter	65
Fulchronograp	65
Registro magnético de frente de onda	67
Integrador de onda magnética	68
Registro fotográfico de la onda de corriente	68
Registro de tormentas eléctricas	70

3	MODELADO Y ESTIMACION DEL RIESGO EN LINEAS DE TRANSMISION	73
	Efectos de descargas atmosféricas en líneas de transmisión	77
	Estimación del riesgo	87
4	EL EMTF, RESULTADOS Y CONCLUSIONES	96
	Electro-Magnetic Transients Program (EMTF)	97
	Resultados y conclusiones	110
	Bibliografía	115

INTRODUCCION

Desde hace muchos años, en los inicios de la humanidad, las descargas atmosféricas, popularmente llamadas rayos, fueron motivo de temor, al darles un carácter divino. Todavía, en la época del esplendor griego, se mantenía la creencia, por medio de la siguiente leyenda :

Se cuenta que de la espuma del mar, nació Afrodita, la Diosa de la belleza y el amor. Fueron tales sus encantos y hermosura, que armó tremendo alboroto en el reino del Olimpo. Todos los dioses se disputaban el honor de desposarla, y ante el gran llo, Zeus tuvo que intervenir como padre de todos ellos, decidiendo otorgarla como esposa, al que le entregara una fuerza divina.

Esta gracia, trajo grandes conflictos al mundo terrenal, de ésta manera, fue como Vulcano, Dios de los metales, desposó a Afrodita, ofreciéndole a Zeus los destructivos rayos, con el fin de torturar a los mortales.

En la época actual, ha quedado en el olvido esta creencia, reconociendo que las descargas atmosféricas, son fenómenos naturales inevitables, causantes de disturbios y pérdidas irreparables. Aunado a esto, el constante incremento de construcciones elevadas, de sistemas de transporte de energía eléctrica, el uso de equipos de comunicación con antenas, equipos de cómputo, etc., han creado la necesidad de conocer, prevenir y convivir, con las descargas atmosféricas.

Desde que se utilizó en México, la primera línea de transmisión de 230 kV en 1954, su diseño ha despertado gran interés en el sector eléctrico, con el fin de reducir los efectos dañinos en los sistemas de potencia, ya que todo esto, se manifiesta en un factor muy importante para cualquier compañía o usuario en general, que se ha llamado Calidad de

Servicio. Sin embargo, las compañías suministradoras de energía eléctrica, no se encuentran excluidas de fallas instantáneas en sus líneas de transmisión y distribución, adjudicables a las descargas atmosféricas, fenómeno externo que no permite ser controlado y causante de parar cualquier actividad en un país, al interrumpir el transporte de energía eléctrica; por lo que, calcular en términos de probabilidades, el número de ocasiones que una línea de transmisión sale de operación, por causa de éste fenómeno de la naturaleza, es el asunto que aquí nos reúne.

OBJETIVOS

- Disernimiento de la metodología para calcular la probabilidad de descarga y la consecuente falla de la línea de transmisión de 230 kV.
- Análisis del mecanismo de las descargas atmosféricas en líneas de transmisión.
- Empleo del Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) para fallas en líneas de Transmisión de 230 kV por descargas atmosféricas.

CAPITULO 1

LA LINEA DE TRANSMISION Y SUS PARAMETROS DE DISEÑO

Un sistema eléctrico de potencia, está formado por un conjunto de elementos que interactúan entre sí y que pueden dividirse en dos grandes grupos :

Elementos de potencia : en los que se agrupan todos los recursos o medios de producción (por ejemplo, los generadores con sus motores primarios), de conversión (transformadores, rectificadores e inversores), de transmisión, distribución (líneas) y consumidores (cargas), de energía eléctrica.

Elementos de control : los que regulan o modifican el estado del sistema (reguladores de tensión, control automático de generación, relés, interruptores, etc.).

Todos los elementos del sistema están vinculados para cumplir con el fin de generar, transportar y alimentar de energía eléctrica a las cargas consumidoras (dando por un hecho que la economía está implícita); estas son las funciones de un sistema eléctrico de potencia.

Podemos decir que las líneas de transmisión son uno de los componentes principales de un sistema eléctrico de potencia, la cual intentaríamos definir como : todo aquel conductor empleado para transmitir cantidades apreciables de energía eléctrica, desde las plantas generadoras y transformadoras hasta los centros de consumo.

Estas líneas de transmisión deben cumplir con un cierto número de requisitos, de acuerdo a las condiciones de su aplicación o de la clase de servicio que deben prestar, por ejemplo, la cantidad de energía que transmitirá, su entorno geográfico, ecológico, etc. Esto implica, que la línea de transmisión deberá ser diseñada para la aceptación de ciertos límites físicos, los cuales no deben ser sobrepasados :

1. Mecánico.
2. Térmico.
3. De regulación.
4. Pérdidas por corona.
5. Económico.

El orden en que son enumerados indica su importancia relativa en el caso general, de manera que el cumplimiento del primero es indispensable, en tanto que el último puede posponerse cuando hay motivos poderosos para ello.

Una línea de transmisión aérea está constituida por los conductores, las estructuras de soporte, los aisladores, accesorios para sujetar los conductores a las estructuras; así, como de hilos guarda, para la protección contra descargas atmosféricas.

Los estados de un sistema eléctrico de potencia se pueden dividir en dos grupos: estado permanente y estado transitorio.

El estado permanente, es el estado duradero conforme al cual se calculan las características técnico-económicas fundamentales de un sistema eléctrico de potencia.

El estado transitorio, es el estado durante el cual el sistema pasa de un modo de operación a otro, de manera súbita y hasta violenta.

Bajo estado permanente, los valores de operación no son estrictamente permanentes, varían constantemente y se desvían de cierto valor medio, pero estas desviaciones son tan pequeñas que en la práctica se califican como permanentes. En estado transitorio estas desviaciones son sustanciales.

Durante los cambios graduales de un sistema, cuando va de un estado permanente (estado de equilibrio) a otro también

permanente, ciertas cantidades varían poco, en relación con el estado inicial del circuito eléctrico. Se puede pensar que está ocurriendo una sucesión de estados y se puede suponer, para el análisis, que ésta serie de cambios, son en realidad una variación gradual de un determinado grupo de variables, que pueden ser analizados por separado, caracterizando al proceso. Si el enfoque es más riguroso, entonces el cambio gradual se supone como una sucesión de procesos transitorios que deberán ser analizados en el espacio y en el tiempo. Por ejemplo, aparición de la corriente de corto circuito o la propagación de ondas electromagnéticas en el espacio a lo largo de la línea, cable, dovanados de la máquinas y transformadores.

Por otra parte, los fenómenos transitorios debidos a la interrupción o a la conexión de circuitos, pueden representarse matemáticamente, por la vía de la aplicación súbita de ondas de voltaje o de corriente en el circuito equivalente que representa dicho sistema. El circuito que originalmente estaba operando en estado permanente, pasa a un estado transitorio hasta alcanzar un nuevo estado permanente.

El estudio de los fenómenos transitorios se simplifica, cuando se representan los distintos elementos del sistema, con circuitos equivalentes, en los que se considerarán concentradas a la resistencia, inductancia y capacitancia. Esta suposición no siempre es válida, especialmente en lo que se refiere a la representación de las líneas de transmisión.

En general pueden tratarse como circuitos con constantes concentradas, aquellos en los que las dimensiones de los circuitos son pequeñas, comparadas con la longitud de onda de los voltajes y de las corrientes. El estudio de los fenómenos transitorios en los circuitos eléctricos, para constantes concentradas, requieren de la solución de ecuaciones lineales integro-diferenciales. Existen una serie de fenómenos transitorios cuyo estudio no puede realizarse si se supone que

sus parámetros están concentrados, por ejemplo, los sobrevoltajes debidos a descargas atmosféricas, que son impulsos de voltaje de muy corta duración (décenas de microsegundos), o de cierto tipo de sobrevoltajes producidos por la conexión o desconexión de las líneas de transmisión.

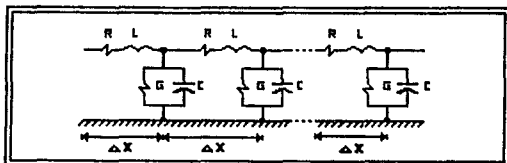
Las principales causas de las sobretensiones transitorias presentes en los circuitos eléctricos de potencia, se pueden agrupar en dos categorías: por descargas atmosféricas y por maniobras con interruptores; esta tesis trata con el primer tipo.

Para estudiar este tipo de fenómenos es necesario tomar en cuenta la distribución de los parámetros en las líneas de transmisión.

Para cimentar nuestro análisis, la línea de transmisión se describe por medio de cuatro parámetros: la resistencia de los conductores, R en Ω/m ; la inductancia L en H/m ; la conductancia del medio entre los conductores en S/m y la capacitancia en F/m .

Estos parámetros están uniformemente distribuidos a lo largo de la línea, afectando al voltaje y a la corriente, los cuales continuamente están cambiando de magnitud y de fase a lo largo de la línea. Una forma de representar una línea de transmisión con dichos parámetros es la siguiente:

REPRESENTACION DE UNA LINEA DE TRANSMISION



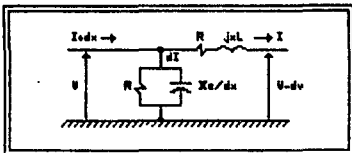
De este circuito representativo de la línea de transmisión pueden sacarse conclusiones válidas para el estado permanente pero sobre todo, para el estado transitorio.

ESTADO PERMANENTE

Para su visualización se tomará una pequeña porción de la longitud total de la línea (Δx) y en ella se analizarán los efectos, para que los resultados sean válidos se intentará incluir a todos los factores físicos que la constituyen. Si tomamos el incremento de la longitud (Δx), se estará hablando de incrementos en todos sus parámetros, si tales incrementos se hacen más pequeños tendiendo a cero, se puede aplicar la definición de límite, por lo cual pueden manejarse los conceptos de diferencial y más adelante el cálculo diferencial.

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x) - f(x + \Delta x)}{\Delta x} = - \frac{df}{dx}$$

Así : si al circuito que se dibuja enseguida



aplicamos la ley de Ohm, tendremos :

$$V - VR_{dx} - VL_{dx} - (V - dv) = 0$$

$$dV = (V R + V L) dx \quad \text{donde : } V R = RI \quad \text{y} \quad V L_{dx} = R dx I$$

Entonces :

$$dV = R dx I + j X_L dx I$$

$$dV = (R + j X_L) I dx$$

$$\frac{dV}{dx} = I(R + j X_L) \quad \text{si} \quad Z = R + j X_L, \quad X_L = \omega L$$

$$Z = R + j \omega L$$

Por lo que :

$$\frac{dV}{dx} = IZ \quad \dots\dots\dots(1)$$

Por corriente tenemos:

$$I + dx - dI - I = 0$$

$$\text{Pero } dI = V/ra + V/jXc$$

$$dI = V(1/ra + 1/-jXc) dx$$

$$\frac{dI}{dx} = V(1/ra + 1/-jXc)$$

$$Xc = 1/\omega C$$

$$\text{si } Y = 1/ra + 1/-jXc$$

$$Y = G + j\omega C$$

Entonces tenemos :

$$\frac{dI}{dx} = VY \quad \dots\dots\dots(2)$$

Derivando las ecuaciones (1) y (2) con respecto a X :

$$d^2V/dx^2 = Z dI/dx \quad \text{y} \quad d^2I/dx^2 = Y dV/dx \quad \dots\dots (3) \text{ y } (4)$$

Sustituyendo (3) y (4) en las ecuaciones (1) y (2)

respectivamente tenemos :

$$d^2V/dx^2 = Z V Y \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$d^2I/dx^2 = Y I Z \quad \dots\dots\dots(6)$$

Resolviendo las ecuaciones diferenciales (5) y (6) tenemos :

$$\text{Si } \frac{d^2V}{dx^2} = Z V Y \quad \rightarrow m^2 - Z Y = 0 \quad m = \pm \sqrt{Z Y}$$

Si la solución general es : $V = C_1 e^{mx} + C_2 e^{mx} + \dots + C_n e^{mx}$

Por lo tanto tenemos : $V = C_1 e^{\sqrt{ZY} x} + C_2 e^{-\sqrt{ZY} x} \dots\dots\dots (7)$

Ahora para la ecuación (6) tenemos:

Si $\frac{d^2 I}{dx^2} = Y I Z + m^2 - Z Y = 0 \quad m = \pm \sqrt{ZY}$

Si la solución general es : $I = C_1 e^{m_1 x} + C_2 e^{m_2 x} + \dots + C_n e^{m_n x}$

Por lo que : $I = C_3 e^{\sqrt{ZY} x} + C_4 e^{-\sqrt{ZY} x} \dots\dots\dots (8)$

Determinaremos ahora C_1, C_2, C_3 y C_4 .

Sustituyendo (7) y (8) en (1) y (2) respectivamente.

Si $IZ = \frac{dV}{dx}$ y $VY = \frac{dI}{dx}$

$IZ = \sqrt{ZY} C_1 e^{\sqrt{ZY} x} - \sqrt{ZY} C_2 e^{-\sqrt{ZY} x}$

Si $I = C_3 e^{\sqrt{ZY} x} + C_4 e^{-\sqrt{ZY} x}$

$\sqrt{ZY} C_1 e^{\sqrt{ZY} x} - \sqrt{ZY} C_2 e^{-\sqrt{ZY} x} = Z (C_3 e^{\sqrt{ZY} x} + C_4 e^{-\sqrt{ZY} x})$

$\sqrt{ZY} C_1 = Z C_3$ y $-\sqrt{ZY} C_2 = Z C_4$

$C_3 = \sqrt{ZY} C_1 / Z$ y $C_4 = -\sqrt{ZY} C_2 / Z$

Por lo tanto nos queda en función de las constantes C_1 y C_2 las soluciones generales :

$V = C_1 e^{\sqrt{ZY} x} + C_2 e^{-\sqrt{ZY} x} \dots\dots\dots (9)$

$I = \frac{\sqrt{ZY} C_1}{Z} e^{\sqrt{ZY} x} - \frac{\sqrt{ZY} C_2}{Z} e^{-\sqrt{ZY} x} \dots\dots\dots (10)$

O bien : $I = \sqrt{Y/Z} C_1 e^{\sqrt{ZY} x} - \sqrt{Y/Z} C_2 e^{-\sqrt{ZY} x}$

Estas son las soluciones generales del voltaje y la corriente.

Ahora, sabemos que : $e^x = \cosh x + \sinh x$

$$e^{-x} = \cosh x - \sinh x$$

Entonces las ecuaciones (9) y (10) se expresan como :

$$V = (C_1 + C_2) \cosh \sqrt{ZY} x + (C_1 - C_2) \sinh \sqrt{ZY} x$$

$$I = (C_1 + C_2) \frac{Y}{Z} \cosh \sqrt{ZY} x + (C_1 - C_2) \frac{Y}{Z} \sinh \sqrt{ZY} x$$

Tomando como referencia el extremo receptor de la línea, estas ecuaciones proporcionan los valores de voltaje y corriente en cualquier punto de la línea.

Si deseamos tomar el extremo generador como referencia las ecuaciones son :

$$V = (C_1 + C_2) \cosh \sqrt{ZY} x + (C_1 - C_2) \sinh \sqrt{ZY} x$$

$$I = -(C_1 - C_2) \frac{Y}{Z} \cosh \sqrt{ZY} x - (C_1 + C_2) \frac{Y}{Z} \sinh \sqrt{ZY} x$$

Para un caso particular si $X=0$, $V(X) = V(0)$

$$V(0) = C_1 + C_2 \quad ; \quad I(0) = (C_1 - C_2) \frac{Y}{Z}$$

$$C_1 - C_2 = I(0) \frac{Z}{Y}$$

Sustituyendo las constantes $C_1 + C_2$ y $C_1 - C_2$ tenemos :

$$V = V(0) \cosh \sqrt{ZY} x \pm I(0) \frac{Z}{Y} \sinh \sqrt{ZY} x$$

$$I = I(0) \cosh \sqrt{ZY} x \pm V(0) \frac{Y}{Z} \sinh \sqrt{ZY} x$$

Donde podemos concluir que, si tomamos como referencia el extremo receptor de la línea ; es decir, para encontrar el voltaje y la corriente en cualquier punto de la línea a una distancia X del extremo receptor, se utilizan las ecuaciones con signo positivo (+), teniendo que $V(0) = V_R$ o $I(0) = I_R$.

$$V = V(0) \cosh \sqrt{ZY} x + I(0) \frac{Z}{Y} \sinh \sqrt{ZY} x$$

$$I = I(0) \cosh \sqrt{ZY} x + V(0) \frac{Y}{Z} \sinh \sqrt{ZY} x$$

Ahora bien si tomamos como referencia el extremo generador, es decir, para conocer el valor del voltaje y corriente en cualquier punto de la línea a una distancia X del extremo generador, se utilizará las ecuaciones con signo negativo (-) y tendremos que $V(0) = V_0$ e $I(0) = I_0$.

$$V = V(0) \cosh \sqrt{ZY} x - I(0) \sqrt{ZY} \operatorname{senh} \sqrt{ZY} x$$

$$I = I(0) \cosh \sqrt{ZY} x - V(0) \sqrt{Y/Z} \operatorname{senh} \sqrt{ZY} x$$

Donde :

$$\sqrt{ZY} = Z_c \longrightarrow \text{IMPEDANCIA CARACTERISTICA DE LA LINEA.}$$

$$\sqrt{ZY} = \gamma \longrightarrow \text{CONSTANTE DE PROPAGACION.}$$

LINEAS SIN PERDIDAS

Concepto teórico útil para la solución de las ecuaciones diferenciales pero que no se apega a la realidad. En la generalidad de los casos, las pérdidas se incorporan a la solución posteriormente.

Si despreciamos la resistencia en serie de la línea y si se considera infinita tenemos que la conductancia (parte real de la admitancia en paralelo) es :

$$Z_c = \sqrt{ZY} = \sqrt{(j\omega L)(-j\omega C)} = \sqrt{(j\omega nFL)(-j\omega nFC)} = \sqrt{L/C}$$

Donde Z_c es un escalar, función únicamente de la inductancia y la capacitancia de la línea, así las funciones hiperbólicas pueden ser sustituidas por funciones trigonométricas.

Y γ es un número complejo que se puede representar como :

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

Donde

$$\alpha \longrightarrow \text{CONSTANTE DE ATENUACION.}$$

$$\beta \longrightarrow \text{CONSTANTE DE FASE.}$$

De manera semejante, la velocidad de propagación es :

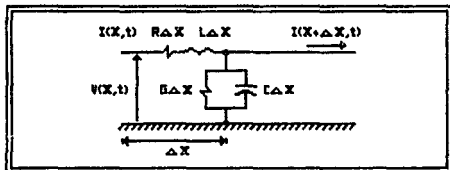
$$V_p = \mu = \frac{\omega}{\beta} = \frac{1}{\gamma LC} = f\lambda$$

α es la constante de atenuación y tiene unidades de Neper/m. Nos dá la razón con que va disminuyendo la amplitud de la señal a lo largo de la línea (de la onda incidente).

A β se le llama constante de fase, que tiene unidades de Rad/m. Nos dá la razón de cambio de fase de la armónica en función de la distancia.

En una línea de transmisión sin pérdidas, no existe la atenuación pues α es cero ($\alpha=0$), y $\beta = \omega \sqrt{LC}$. Esta línea se conoce como la Línea ideal porque no hay pérdidas y no se produce ninguna distorsión en la señal, pues β varía linealmente con la frecuencia.

ESTADO TRANSITORIO



Por caída de tensión tenemos que :

$$V(x,t) - V(x+\Delta x,t) = \Delta x RI + \Delta x L \frac{di}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

Dividiendo entre Δx :

$$\frac{V(x,t) - V(x+\Delta x,t)}{\Delta x} = RI + L \frac{di}{dt}$$

Por definición :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(x+\Delta x, y) - f(x, y)}{\Delta x} = D' f(x, y) = \frac{\partial f(x, y)}{\partial x}$$

Por lo tanto :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{V(x, t) - V(x+\Delta x, t)}{\Delta x} = - \frac{\partial V(x, t)}{\partial x}$$

Por lo que :

$$- \frac{\partial V}{\partial x} = RI + L \frac{di}{dt} \quad \dots\dots\dots(1')$$

Por variación de corriente :

$$I(x, t) - I(x+\Delta x, t) = \Delta XGV + \Delta X C \frac{dV}{dt} \quad \dots\dots\dots(2)$$

De igual modo que para el análisis de voltaje resulta :

$$- \frac{\partial I}{\partial x} = GV + C \frac{\partial V}{\partial t} \quad \dots\dots\dots(2')$$

Para la solución de las ecuaciones (1') y (2') utilizaremos la transformada de Laplace, la cual nos dará el resultado en el dominio de la frecuencia. Esto es :

$$\begin{aligned} \mathcal{L} \left\{ RI + L \frac{\partial i}{\partial t} \right\} &= L \mathcal{L} \left\{ \frac{di}{dt} \right\} + \mathcal{L} \{ RI \} \\ \mathcal{L} \left\{ RI + L \frac{\partial i}{\partial t} \right\} &= L \left[S \mathcal{L} \left\{ \frac{di}{dt} \right\} - f(0) \right] + R \mathcal{L} \{ i \} \\ \mathcal{L} \left\{ RI + L \frac{\partial i}{\partial t} \right\} &= S \left[LI(S) - f(0) \right] + RI(S) \quad ; \quad f(0) = 0 \\ - \frac{\partial V(S)}{\partial x} &= I(S) [SL + R] \quad \dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

De igual modo para la ecuación (2') tenemos que :

$$\begin{aligned} \mathcal{L} \left\{ GV + C \frac{\partial V}{\partial t} \right\} &= C \mathcal{L} \left\{ \frac{\partial V}{\partial t} \right\} + G \mathcal{L} \{ V \} \\ \mathcal{L} \left\{ GV + C \frac{\partial V}{\partial t} \right\} &= C \left[SV(S) - f(0) \right] + GV(S) \end{aligned}$$

$$-\frac{\partial I(S)}{\partial x} = VCS (SC + G) \quad \dots\dots\dots(4)$$

Donde tenemos que la solución de la ecuación (1') es la ecuación (3) y la solución de la ecuación (2') es la ecuación (4) en el dominio de la frecuencia.

Derivando la ecuación (3) y la ecuación (4) con respecto a X tenemos :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = (SL + R) \frac{\partial I(S)}{\partial x} \quad \dots\dots\dots(3')$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = (SC + G) \frac{\partial V(S)}{\partial x} \quad \dots\dots\dots(4')$$

Sustituyendo las ecuaciones (3) y (4) en las ecuaciones (3') y (4') respectivamente :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = (SL + R)(SC + G) V(S)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = (SC + G)(SL + R) I(S)$$

Donde :

$$\gamma^2 = (SC + G)(SL + R)$$

$$\gamma = \sqrt{(SC + G)(SL + R)} \quad \rightarrow \text{COEFICIENTE DE PROPAGACION GENERAL}$$

Entonces nos queda :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} = \gamma^2 V(S) \quad \text{y} \quad \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} = \gamma^2 I(S)$$

Resolviendo estas ecuaciones parciales tenemos :

$$\frac{\partial^2 V(S)}{\partial x^2} - \gamma^2 V(S) = 0 \quad \text{y} \quad m^2 - \gamma^2 = 0 \rightarrow m = \pm \gamma$$

La solución es :

$$V(S) = A e^{\gamma x} + B e^{-\gamma x} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\frac{\partial^2 I(S)}{\partial x^2} - \gamma^2 I(S) = 0 \quad \text{y} \quad m^2 - \gamma^2 = 0 \rightarrow m = \pm \gamma$$

$$I(S) = C e^{\gamma x} + D e^{-\gamma x} \dots\dots\dots(6)$$

Las ecuaciones (5) y (6) son solución de las ecuaciones (3') y (4'). Ahora el siguiente paso es determinar las constantes A, B, C y D.

Sustituyendo en la ecuación (1'); es decir, derivando (5) con respecto a X y sustituyendo en la ecuación (3) :

$$\frac{\partial V(S)}{\partial x} = \gamma A e^{\gamma x} - \gamma B e^{-\gamma x} = \gamma C A e^{\gamma x} - B e^{-\gamma x}$$

$$-\gamma (A e^{\gamma x} - B e^{-\gamma x}) = I(S)(\gamma SL + R)$$

Sustituyendo (6) de la ecuación (6) :

$$-\gamma (A e^{\gamma x} - B e^{-\gamma x}) = (C e^{\gamma x} + D e^{-\gamma x})(\gamma SL + R)$$

Despejando las constantes :

$$-\gamma A = C(\gamma SL + R) \quad ; \quad C = - \frac{\gamma A}{C(\gamma SL + R)}$$

$$\gamma B = D(\gamma SL + R) \quad ; \quad D = \frac{\gamma B}{C(\gamma SL + R)}$$

$$\text{Si } \gamma = \sqrt{\gamma(SC + G)(\gamma SL + R)}$$

Entonces resulta que :

$$C = - \frac{\sqrt{\gamma(SC + G)(\gamma SL + R)}}{C(\gamma SL + R)} \quad A$$

$$C = - \sqrt{\frac{C(SC + G)}{C(\gamma SL + R)}} \quad A$$

$$D = \frac{\sqrt{\gamma(SC + G)(\gamma SL + R)}}{C(\gamma SL + R)} \quad B$$

$$D = \sqrt{\frac{CSC + G}{CSL + R}} \quad B$$

Reordenando las ecuaciones (5) y (6) en función solo de las constantes A y B tenemos :

Si hacemos
$$Y_0 = \sqrt{\frac{CSC + G}{CSL + R}}$$

$$VCS) = A e^{\gamma x} + B e^{-\gamma x}$$

$$ICS) = -Y_0 A e^{\gamma x} + Y_0 B e^{-\gamma x}$$

$$ICS) = Y_0 C - A e^{\gamma x} + B e^{-\gamma x}$$

Estas expresiones son las soluciones generales en una línea de transmisión en estado transitorio, tomando como referencia el extremo de generación.

Si X=0 tenemos :

$$E(0, S) = e C(0, t)$$

$$E(0, S) = A e^{\gamma 0} + B e^{-\gamma 0} ; E(0, S) = A + B ; B = E(0, S) - A$$

Por lo tanto, nos queda en función de la constante A :

$$VCS) = A e^{\gamma x} + [E(0, s) - A] e^{-\gamma x} \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$ICS) = -Y_0 A e^{\gamma x} + Y_0 [E(0, S) - A] e^{-\gamma x} \quad \dots \dots \dots (8)$$

Estas ecuaciones son tomando como referencia el inicio de la línea en el extremo generador de la misma.

La impedancia al final, es decir, X=d que es una impedancia de tipo general donde intervienen parámetros R, L y C, se puede calcular como :

$$ZrCS) = \frac{VCS)}{ICS)}$$

Sustituyendo las ecuaciones (7) y (8) tenemos :

$$Zr(S) = \frac{A e^{\gamma d} + [ECO, S - A] e^{-\gamma d}}{-Y_0 A e^{\gamma d} + Y_0 [ECO, S - A] e^{-\gamma d}}$$

$$-Zr(S) - Y_0 A e^{\gamma d} + Y_0 [ECO, S - A] e^{-\gamma d} = A e^{\gamma d} + [ECO, S - A] e^{-\gamma d}$$

$$A [-Zr(S) Y_0 e^{\gamma d} - Zr(S) Y_0 e^{-\gamma d}] + Zr(S) Y_0 ECO, S e^{-\gamma d} = A [e^{\gamma d} - e^{-\gamma d}] + ECO, S e^{-\gamma d}$$

$$A [-Zr(S) Y_0 e^{\gamma d} - Zr(S) Y_0 e^{-\gamma d} + e^{\gamma d} - e^{-\gamma d}] = ECO, S [e^{-\gamma d} - Zr(S) Y_0 e^{-\gamma d}]$$

$$A [-e^{\gamma d} [Zr(S) Y_0 + 1] - e^{-\gamma d} [Zr(S) Y_0 - 1]] = ECO, S e^{-\gamma d} [1 - Zr(S) Y_0]$$

$$A = \frac{ECO, S e^{-\gamma d} [1 - Zr(S) Y_0]}{-e^{\gamma d} [Zr(S) Y_0 + 1] - e^{-\gamma d} [Zr(S) Y_0 - 1]}$$

$$A = \frac{-ECO, S e^{-\gamma d} [Zr(S) Y_0 - 1]}{-e^{\gamma d} [Zr(S) Y_0 + 1] - e^{-\gamma d} [Zr(S) Y_0 - 1]}$$

Dividiendo entre $Zr(S) Y_0 + 1$:

$$A = \frac{-ECO, S e^{-\gamma d} [Zr(S) Y_0 - 1] / [Zr(S) Y_0 + 1]}{-e^{\gamma d} [Zr(S) Y_0 + 1] - e^{-\gamma d} [Zr(S) Y_0 - 1] / [Zr(S) Y_0 + 1]}$$

Si $K = \frac{Zr(S) Y_0 - 1}{Zr(S) Y_0 + 1}$

$$A = \frac{ECO, S K e^{-\gamma d}}{e^{\gamma d} + K e^{-\gamma d}}$$

Sustituyendo en (7) y (8) :

$$VCS = \frac{ECO.S \frac{K e^{-\gamma d}}{r^d + e^{-\gamma d}}}{r^d + e^{-\gamma d}} \frac{r^x}{e} + e^{-\gamma x} \left[ECO.S - \frac{ECO.S \frac{K e^{-\gamma d}}{r^d + e^{-\gamma d}}}{r^d + e^{-\gamma d}} \right]$$

$$VCS = ECO.S \left[\frac{K \frac{e^{-\gamma(x-d)}}{e} + e^{-\gamma(x-d)}}{r^d + e^{-\gamma d}} - \frac{e^{-\gamma(x-d)}}{e} \right]$$

$$VCS = ECO.S \left[\frac{K \frac{e^{-\gamma(d-x)}}{e} + e^{-\gamma(d-x)}}{r^d + e^{-\gamma d}} \right] \dots\dots\dots (3')$$

Ahora sustituyendo en la ecuación (8) :

$$ICS = -Y_0 \frac{ECO.S \frac{K e^{-\gamma d}}{r^d + K e^{-\gamma d}}}{r^d + K e^{-\gamma d}} + Y_0 \left[ECO.S - \frac{ECO.S \frac{K e^{-\gamma d}}{r^d + K e^{-\gamma d}}}{r^d + K e^{-\gamma d}} \right] e^{-\gamma x}$$

$$ICS = ECO.S Y_0 \left[\frac{-K \frac{e^{-\gamma(x-d)}}{e}}{r^d + K e^{-\gamma d}} + e^{-\gamma x} - \frac{K \frac{e^{-\gamma(d-x)}}{e}}{r^d + K e^{-\gamma d}} \right]$$

$$ICS = ECO.S Y_0 \left[\frac{-K \frac{e^{-\gamma(d-x)}}{e} + e^{-\gamma(d-x)} + K \frac{e^{-\gamma(x-d)}}{e} - K e^{-\gamma(x-d)}}{r^d + K e^{-\gamma d}} \right]$$

$$ICS = ECO.S Y_0 \left[\frac{e^{-\gamma(d-x)} - K \frac{e^{-\gamma(d-x)}}{e}}{r^d + K e^{-\gamma d}} \right] \dots\dots\dots (4')$$

Las soluciones (3') y (4') son las soluciones completas de las transformadas de voltaje y de corriente en función de X.

Donde Y_0 es la admitancia característica de la línea y por lo tanto $Z_0 = 1/Y_0$ la impedancia característica de la línea.

Si sabemos $Y_0 = \sqrt{\frac{(SC + G)}{(SL + R)}}$

Por lo tanto $Z_0 = \sqrt{\frac{(SL + R)}{(SC + G)}}$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{LC}} + \text{VELOCIDAD DE PROPAGACION DE LAS ONDAS (1/SEG)}$$

PARAMETROS DE DISEÑO

Como ya se mencionó anteriormente una línea de transmisión debe de cumplir un cierto número de requisitos :

1. Mecánico.
2. Térmico.
3. De regulación.
4. Pérdidas por corona.
5. Económico.

El orden en que son enumerados indica, en el caso general, su importancia relativa, de manera que el cumplimiento del primero es indispensable, en tanto que el último puede posponerse cuando hay motivos poderosos para ello.

REQUISITO MECANICO. Todo conductor debe tener la suficiente resistencia mecánica para soportar, sin romperse y sin deformarse permanentemente, los esfuerzos aplicados al mismo en el servicio normal que debe desempeñar y aún los que sean anormales, pero permisibles técnicamente.

En el caso de las líneas aéreas los esfuerzos normales son : el peso del conductor, el efecto del viento, los efectos de las contracciones a bajas temperaturas, carga de la nieve, los esfuerzos de corte en los amarres o mordazas en los aisladores, los resultados de desnudar el conductor con un instrumento cortante que destruye la superficie del metal, etc. Los anormales comprenden : la presión sobre las líneas al momento del mantenimiento, la suspensión del personal en las mismas, la tensión debida a la movilidad de los apoyos con los movimientos de la ruptura de uno o más hilos o la caída de una torre, la falla de una retenida, la presión de los árboles o ramales, etc.

REQUISITO TERMICO. Esto es que todo conductor debe alcanzar en operación normal una temperatura moderada, de acuerdo con la calidad de su revestimiento y de las características de su instalación, que no produzca deterioro notable al primero ni presente peligro para la seguridad de la última.

Si el conductor es desnudo, no hay límite de temperatura por concepto de deterioro del forro, pero lo hay por los siguientes motivos :

a) La resistencia del conductor aumenta 37% por cada 100 grados arriba de 35 grados centígrados, lo que hace mayores las pérdidas por efecto Joule en la línea.

b) La dilatación exagerada del conductor puede ser causa de que se acerque demasiado a otros conductores, ubicados en un plano inferior a tierra o que se produzca un cruzamiento de líneas.

c) El aire que rodea a un conductor muy caliente y a potencial elevado es fácilmente ionizable y puede dar lugar a que se establezca una descarga permanente por corona; acompañada de radio-interferencia, disipación de energía y corrosión química del conductor.

d) Dilatación del herraje de un aislador que soporta un conductor a temperatura elevada, puede ser causa de que el aislador se inutilice.

REQUISITO DE REGULACION.- La corriente que maneja cada conductor debe ser conducida por él en condiciones apropiadas para que el servicio que se suministre sea satisfactorio.

La regulación de una línea está íntimamente ligada con parámetros o criterios económicos. En general la regulación es una medida indirecta o calificador conocido como calidad del servicio.

REQUISITO DE PERDIDAS POR CORONA.- El aire que está en contacto o a corta distancia de un conductor con potencial elevado, se encuentra sometido a un esfuerzo dieléctrico intenso que puede llegar a ser causa de ionización. Cuando el potencial del conductor va creciendo a partir de cierto límite, se produce primeramente ionización local invisible en los puntos más salientes y rugosos del conductor. La ionización va ganando volumen a medida que sube el potencial y haciéndose sonora y visible cada vez más hasta que una descarga violenta entre polos opuestos inicia un arco que obliga a suspender el servicio de la línea.

Naturalmente la tensión de trabajo de la línea, no debe jamás llegar al extremo de producir el fenómeno hasta su punto más alto; pero tampoco debe permitirse que sobrepase en exceso al valor crítico de ionización por mucho tiempo. A causa de los

efectos nocivos sobre los conductores y sobre el sistema en general a saber, se tiene :

a) Corrosión del metal por el ozono, compuestos de oxígeno y nitrógeno, cuya formación se debe al estado de ionización del aire y en gran manera favorecida por la humedad y por la acción del ácido nítrico.

b) Disipación de cantidades grandes de energía, con un valor anual sorprendente.

c) Aparición de la tercera armónica en la línea, y radio-interferencia intensa sobre estaciones y líneas próximas.

d) Predisposición a recibir descargas atmosféricas debido a la presencia de iones alrededor de los conductores.

Una tensión crítica de ionización depende de dos factores básicos : del gradiente eléctrico en la superficie del conductor y de la rigidez específica del aire a la presión y temperaturas presentes.

REQUISITO ECONOMICO. - Si para transportar una potencia determinada, a cierta distancia y con una tensión dada se emplean conductores muy delgados, el costo de la línea y los gastos posteriores derivados del capital invertido serán pequeños; pero la energía disipada por el efecto joule será muy grande y su valor correspondiente podrá exceder y anular cualquier economía que pudiera provenir del poco capital invertido. Si por el contrario se emplean conductores de un calibre excesivo, la pérdida de energía podría resultar despreciable; pero los gastos derivados del capital invertido serán tan grandes que la línea no será costeable, siendo estos los factores a cuidar para su realización.

CRITERIOS DE DISEÑO

Como ya se dijo anteriormente, la finalidad de un sistema eléctrico de potencia es la de transportar la energía en forma confiable y económica, desde los centros de generación hasta los lugares de consumo. Sin embargo, existen dos maneras de hacer dicho transporte : en forma subterránea o aérea. La primera de ellas es excesivamente costosa, por lo que sólo se hace a nivel urbano. La transmisión aérea requiere de estructuras de soporte para los cables conductores. En este caso, cuando las tensiones a transmitir son bajas, los cables se pueden soportar mediante postes; pero, cuando son tensiones altas, se emplean comunmente las torres de acero.

Sobre el perfil de la línea, se pueden emplear cuatro tipos de estructuras : de suspensión, deflexión, atraque y de remate. Las de suspensión deberán diseñarse para resistir la acción del viento, el peso propio, el de los cables y en porcentaje mínimo, por la posible rotura del cable. Las estructuras de deflexión se diseñan; además, contra las fuerzas adicionales, que se producen por desviar de su trayectoria recta al eje de la línea. En las torres de atraque, se deberá considerar la posible pérdida de fuerza, debido a la falla de una o varias estructuras, para asegurar que su efecto no perjudique a otras torres. Finalmente, las estructuras de remate son las que en forma continua soportan, en un sólo claro, las cargas producidas por todos los cables, este es el caso de las torres que inician o terminan una línea.

La localización de dichas estructuras de soporte, sobre el perfil topográfico de una línea de transmisión, tiene como objetivos :

a) Mantener las distancias mínimas del conductor hacia el terreno para las diversas condiciones de servicio de la línea.

b) Determinar las cargas que actúan sobre cada estructura.

c) Seleccionar el tipo de estructura más adecuado en cada caso, y estar en condiciones de comparar los costos entre diferentes alternativas.

De esta manera, la importancia de una buena selección en el tipo de estructura, es vital para el funcionamiento y realización del sistema eléctrico.

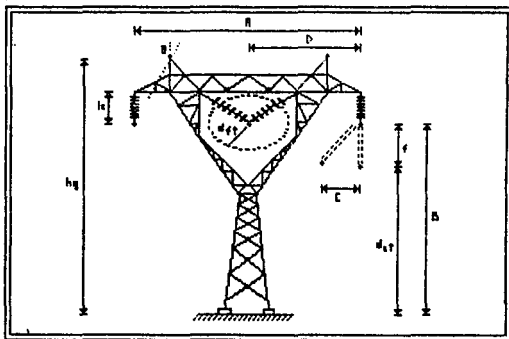
DIMENSIONAMIENTO DIELECTRICO

Para que funcione adecuadamente un sistema de transmisión, deben cumplirse determinadas condiciones durante su etapa de diseño eléctrico, las cuales definen entre otros requisitos, los niveles de aislamiento y la protección contra descargas atmosféricas. Estas disposiciones se traducen, para el diseño de estructuras, en una serie de restricciones geométricas, principalmente en cuanto a las distancias y posición relativa entre cables conductores e hilos de guarda, entre las mismas estructuras, así como terrenos circundantes.

En general, la geometría de las estructuras de soporte, deberá ser tal, que el aislamiento de la línea de transmisión se conserve en cualquier condición de operación, incluyendo las sobretensiones provocadas por factores externos o internos y considerando la influencia del medio ambiente, en cuanto a presión barométrica, temperatura, humedad, contaminación, etc.

En líneas con tensiones nominales de hasta 230 kV, las distancias de aislamiento en aire, se calcularán básicamente por efecto de impulso por rayo. En líneas con tensiones nominales mayores, dichas distancias se calcularán por efecto de impulso por maniobra.

En esta figura, se indican cuales son las distancias de aislamiento criticas para líneas de transmisión de 230 kV.



donde :

- f = Flecha del conductor.
- A = Ancho total de la torre.
- dft = Distancia de fase a tierra.
- θ = Ángulo de protección (blindaje).
- C = Máxima oscilación del conductor.
- D = Distancia entre centros de fases.
- l_c = Longitud de la cadena de aisladores.
- B = Altura de los conductores sobre el terreno.
- dct = Altura mínima del conductor sobre el terreno.
- hg = Altura de los cables de guarda sobre el terreno.

DISTANCIAS MINIMAS RECOMENDADAS

Las distancias de aislamiento por aire, de fase a tierra y de fase a fase, deberán garantizar estadísticamente, una baja probabilidad de flameo. Las distancias dieléctricas mínimas, se determinan principalmente para los impulsos provocados por descargas atmosféricas o por maniobra, según los niveles de aislamiento que requieran, de acuerdo con el criterio de coordinación de aislamiento entre los equipos de las subestaciones eléctricas y la propia línea de transmisión.

Generalmente, el concepto de distancia dieléctrica en aire, desde el punto de vista de diseño, se basa en la tensión crítica de flameo por rayo (TCF) o por maniobra (TCM) y el nivel básico de aislamiento al impulso por rayo (BL) o por maniobra (SL), respectivamente.

TENSION CRITICA DE FLAMEO. - Es el valor de la tensión, en la cual se tiene una probabilidad del 50% de flameo; a los niveles de aislamiento, BL y SL, corresponden probabilidades del 10% de flameo.

Los valores de las distancias mínimas de aislamiento en aire para instalaciones exteriores, se determinarán mediante las siguientes expresiones :

a) Para tensiones nominales de hasta 230kV

Fase a tierra y fase a fase $d_{rt} = (TCF) \sqrt{550}$

b) Para tensiones nominales mayores de 230kV

De fase a tierra $d_{rt} = [(TCM) \sqrt{550 K_2}]^{5/3}$

De fase a fase

$$D \geq n\sqrt{cf + \ell c} + 0.012 \text{ kV}$$

si $f + \ell c > 40 \text{ m}$

$$D \geq 3.8 + 0.012 \text{ kV}$$

para conductores de aluminio

$$D \geq 3.2 + 0.012 \text{ kV}$$

para otros tipos de conductores

Donde :

n = 0.6 Para conductores de aluminio

n = 0.5 Para conductores de cobre o ACSR

f = Flecha del conductor en metros

ℓc = Longitud de la cadena de aisladores (Para aisladores tipo alfiler o cadena "V", $\ell c = 0$), en metros.

kV = Voltaje de operación

k_2 = Factor que depende de las configuraciones de los electrodos.

(TCF)_d = Tensión crítica de diseño para flameo por rayo, en kV

$$(TCF)_d = \frac{K_h \text{ BIL}}{G^m \cdot 0.951}$$

K_h = Factor de corrección por humedad absoluta.

m = Exponente que depende de la configuración de los electrodos y tiene valor máximo de 1.0 (se recomienda usar este valor)

G = Factor de corrección por densidad relativa del aire respecto a la correspondiente a condiciones estándar. (temperatura ambiente de 25 grados centígrados y presión barométrica 760 mmHg sobre el nivel del mar).

$$G = \frac{0.392 \cdot b}{273 + T}$$

b = Presión barométrica en mm de Hg

T = Temperatura ambiente en grados centígrados

(TCM)_d = Tensión crítica de diseño para flameo por maniobras, kV

$$CTCMD_d = \frac{K_h \cdot SIL}{G^m \cdot 0.922}$$

BL = Basic Impulse Level
(Nivel básico de aislamiento al impulso por rayo [kV])

$$BIL = (CFO)_{\text{estándar}} (1.0-1.3\sigma)$$

σ = Desviación estándar referida al valor de (CFO)_e
Para temperatura ambiente de 25 grados centígrados y 760 mmHg se recomienda usar un valor de σ -3%, con lo que se tiene :

$$BIL = 0.961 (CFO)_e$$

SIL = Surge Impulse Level
(Nivel básico de aislamiento al impulso por maniobra [kV])

$$SIL = (TCM)_e (1.0-1.3\sigma)$$

σ = 6% para un TCM estándar, con lo que tenemos :

$$SIL = 0.922 (TCM)_e$$

CORRECCION POR CONTAMINACION ATMOSFERICA. - La tensión máxima de operación, que puede soportar una cadena de aisladores en la atmósfera contaminada, es directamente proporcional a la distancia de fuga o al número de aisladores que componen la cadena. Otros factores que intervienen, son el diámetro y el número de faldas en los aisladores. Si éstos últimos factores no cambian, el parámetro principal es la distancia de fuga.

DISTANCIA DE FUGA PARA DIFERENTES NIVELES DE CONTAMINACION

NIVEL DE CONTAMINACION "LIGERA"

Áreas sin industrias, zonas rurales sin quema de forraje o hierba, áreas que están situadas lejos del mar o a grandes altitudes sobre el nivel del mar y que no están expuestas a la brisa marina, áreas con baja densidad industrial pero sujetas a vientos frecuentes y/o lluvias, zonas agrícolas con bajo uso de fertilizantes, plaguicidas o con uso moderado.

CM) Distancia de fuga recomendada de 2.0 a 2.5 cm/kVr-n

NIVEL DE CONTAMINACION "MEDIA"

Áreas con industrias que no producen humos contaminantes, o áreas con industrias pero que están expuestas a vientos frecuentes y/o lluvias, áreas expuestas a vientos marinos pero no demasiado cerca de las costas (por lo menos a 1 km de distancia de la costa), zonas con niebla ligera, zonas rurales con uso de fertilizantes y plaguicidas.

CM) Distancia de fuga recomendada de 3.0 a 3.5 cm/kVr-n

NIVEL DE CONTAMINACION "ALTA"

Áreas con alta densidad industrial, áreas cercanas al mar (menos de 1 km de la costa), o expuestas a brisas marinas, zonas expuestas a la acción de los polvos de cemento, carbón con lluvias ligeras, combinación de algunas características anteriores con niebla, zonas urbanas con alto índice de población con humos derivados del petróleo, polvo y lluvias ligeras.

CM) Distancia de fuga recomendada de 4.0 a 5.0 cm/kVr-n

NIVEL DE CONTAMINACION "EXTRA ALTA"

Áreas de extensiones moderadas, sujetas a humos productos de procesos industriales de tipo contaminante, áreas de extensión moderada cercanas a las costas y expuestas a las brisas marinas muy fuertes, en áreas de baja densidad industrial pero expuestas a brisas marinas.

(M) Distancia de fuga recomendada mayores de 5.0 cm/kV-n

(N) De la norma EC 71-1 . Los valores de distancia de fuga recomendados, se establecen para mediciones hechas en aisladores en suspensión tipo estándar (254 x 146 mm, con distancia de fuga de 292 mm), por lo que se pueden tener ligeras variantes en los aisladores de equipos.

(O) $kV-n = \text{Tensión máxima de diseño} / \sqrt{3}$

CONSIDERACIONES ADICIONALES

A fin de determinar las cargas que transmiten los cables a la estructura y que provocan el desplazamiento angular de las cadenas de aisladores, se considerarán dos claros de diseño : claro de viento y de peso.

CLARO DE VIENTO.- Se utiliza para calcular las fuerzas horizontales transversales en cada estructura, debido al viento que actúa sobre los cables. Este corresponde a la semisuma de los claros adyacentes a una estructura de soporte.

CLARO DE PESO.- Se emplea para determinar las cargas verticales que imponen los cables a una estructura y corresponde a la suma de las distancias entre la estructura de soporte hacia los puntos más bajos de las catenarias de los cables adyacentes.

FLECHAS. - El cálculo de las flechas y tensiones en los cables, para diversas condiciones de carga y temperatura, es de principal importancia en el diseño de líneas de transmisión porque proporciona los datos necesarios para la preparación de plantillas, a fin de localizar las estructuras de soporte, así como de tablas, para lograr el tendido inicial.

Las condiciones para las que se calcularán las flechas y tensiones mecánicas en cables, serán las siguientes :

a) La temperatura ambiente mínima promedio sin presión de viento, para revisar libramiento vertical en cruces con otras líneas.

b) La temperatura ambiente mínima promedio con velocidad de viento reducida, para revisar tensiones máximas en los cables.

c) La temperatura ambiente media sin presión de viento, para revisar las tensiones en los cables en condición normal de servicio.

d) La temperatura ambiente máxima anual sin presión del viento, para revisar los libramientos respecto al terreno.

En áreas donde se considere necesario revisar alguna otra condición de diseño, ésta deberá realizarse en adición a las anteriores.

TENSIONES MECANICAS EN CABLES. - Los valores de las tensiones mecánicas máximas permisibles en los cables, se limitan a los valores recomendados por la práctica común, con objeto de evitar problemas de fatiga en los cables, así como para limitar el efecto dinámico en las estructuras de soporte, en caso de que éstas fallen.

En cables de guarda, se recomienda que las tensiones para la condición normal de trabajo y para la condición de carga más desfavorable, se aproximen al 25% y al 40% de la carga de ruptura del cable, respectivamente.

La tensión mecánica de los cables de guarda, deberá coordinarse con la tensión de los conductores, a fin de llenar los requisitos de separación entre ambos y conservar los ángulos de blindaje apropiados en todo el claro.

En cables conductores, es favorable que la tensión mecánica se aproxime al 33% de su carga de ruptura, para la condición de tendido inicial de la línea, al 25% para la condición normal de trabajo y al 40% para la condición de carga más desfavorable.

CIMENTACIONES. - El análisis y diseño de las cimentaciones para las estructuras de soporte presentan problemas particulares que surgen principalmente por las siguientes situaciones: la posición elevada de los cables provoca en las estructuras de soporte importantes momentos de volteo, mientras que las cargas verticales son relativamente bajas. Esto hace necesario diseñar las cimentaciones contra el levantamiento. Para este fin, comúnmente se utiliza el procedimiento de considerar una pirámide invertida con un ángulo β , constante e igual a 30 grados; este método es muy empleado debido a su sencillez, y a diferencia de otros no es necesario conocer con mayor precisión las propiedades del suelo, pero no es totalmente confiable.

Muchas de las fallas que se han tenido en torres de transmisión se deben a la incapacidad de la cimentación para transmitir sus cargas al terreno. Cuando han ocurrido fallas por tensión, ha sido evidente que no se cumple la hipótesis de la pirámide invertida con ángulo de 30 grados, en especial cuando el terreno es flojo y no se compacta adecuadamente; en estos

casos sería más conveniente considerar sólo el volumen que se encuentra directamente encima del área ocupada por la base de la cimentación.

Cuando ocurren fallas por compresión, generalmente se presentan por pandeo de los miembros que se emplean en los emparrillados de acero, usualmente la unión con el miembro principal de la pata de la torre.

Las acciones máximas sobre la cimentación provienen generalmente de cargas accidentales, como rotura de cables y viento máximo; por lo que, con excepción de torres con fuertes ángulos de desvío y en torres de remate, solo una parte reducida de las cargas calculadas para la cimentación tienen carácter permanente.

De esta manera, hay que tener presente, la gran diversidad de factores que intervienen en el diseño de sistemas eléctricos de potencia, especialmente en la etapa de transmisión, para poder ofrecer una alta calidad en la continuidad del servicio.

CAPITULO 2

LA DESCARGA ATMOSFERICA Y SU DESARROLLO

LA ACUMULACION DE ELECTRICIDAD EN LAS NUBES

Varias teorías han sido expuestas para explicar la acumulación de electricidad en las nubes. Entre las más conocidas están la teoría del rompimiento de las gotas de SIMPSON, la teoría de la influencia de ELSTER y GEITEL y la teoría de ionización de WILSON.

TEORIA DE SIMPSON

En esta teoría, las corrientes de aire ascendentes, que se tornan mayormente activas durante una tormenta, juegan un papel muy importante. Estas corrientes de aire transportan vapor húmedo del mar o de la superficie de la tierra, cuando alcanzan una altura y presión determinadas, se condensan transformándose en gotas de agua. Las gotas son una combinación de líquido y vapor, que al aumentar en tamaño y peso, vencen a la gravedad para formar la lluvia. En su caída, las gotas se juntan con otras y se hacen cada vez más grandes, teniendo un límite que de acuerdo con LENARD es de $1/2$ centímetro de diámetro. Las gotas que rebasan este límite son inestables y se fragmentan en gotas más pequeñas alrededor de las gotas grandes.

El fenómeno de electrificación de las tormentas ocurre, según el autor, durante el proceso de rompimiento de las gotas antes descrito.

El proceso de ruptura va acompañado de una liberación de iones negativos hacia el aire, quedando la gota cargada positivamente.

Los iones negativos se mezclan con partículas minúsculas de la nube y son transportados hacia arriba con la velocidad que corresponde a la de las corrientes ascendentes. Esto aleja a los iones negativos de la vecindad de las gotas de lluvia que se

encuentran cargadas positivamente.

Por su parte, las gotas de lluvia también suben por la acción de las corrientes, pero lo hacen con una menor rapidez, a menos que se recombinen con otras gotas, de tal manera que su tamaño las haga caer otra vez. Esto último propiciará la liberación de más iones negativos y dejará más gotas de lluvia cargadas positivamente.

Conforme transcurre el tiempo, se liberan más y más iones negativos que se transportan y acumulan en las regiones superior y posterior de la tormenta, las gotas de lluvia van adquiriendo carga positiva y se acumulan en una región restringida de la nube.

Además, si la velocidad de las corrientes ascendentes de aire fuera de 8 m/s, las gotas que pudieran ser no sólo soportadas sino transportadas hacia arriba, tendrán un tamaño límite. Si el tamaño se mantiene y la velocidad disminuye, se producirá la caída de las gotas por acción de la gravedad, lo que quiere decir que habrá lluvia.

El mismo SIMPSON y SCRASE llevaron a cabo sondeos en las nubes, utilizando instrumentos que fueron instalados en globos aerostáticos a diferentes alturas y en diversas partes de la nube, y así fué posible medir la magnitud de los gradientes de potencial y sus polaridades.

De acuerdo con esas mediciones, SIMPSON actualizó sus ideas originales y sugirió otro modo de distribución de la electricidad en las nubes. En la figura 1 se muestra la nube y las regiones con su respectiva concentración de cargas. Las líneas continuas con sus respectivas direcciones representan a las corrientes de aire; su separación será proporcional a su velocidad. La corriente de aire que entra a la tormenta por la izquierda y

pasa por debajo del frente de la nube, toma inmediatamente después una dirección ascendente. La región baja, con acumulación de carga positiva, está localizada justo en la zona donde se inician las corrientes ascendentes. Si se observa la figura se notará que, un poco más a la derecha de la zona donde inician las corrientes de aire, éstas son más débiles. Si las corrientes verticales no tienen la velocidad suficiente para mantener a las gotas, ésta será una región de lluvia y estará cargada positivamente.

Más allá de la zona con carga positiva, penetrando hacia la derecha de la figura 1, la nube estará cargada negativamente. Respecto a la región restante, al principio se pensó que la carga negativa se extendería hasta la parte alta de la nube, sin embargo, la evidencia reciente mostró que esta parte alta poseía carga positiva.

Otra posibilidad :

La temperatura que priva en la región de separación, entre la zona de acumulación de las cargas negativas en la parte inferior y la región de acumulación de las cargas positivas en la parte superior, está comprendida entre 0°C y -20°C. Entonces, si el rango de temperaturas está por debajo del punto de congelación, será fácil concluir que la generación de las cargas en la parte superior depende de la presencia de cristales de hielo y no de la presencia de gotas de agua.

La posición que guarda la zona baja, cargada positivamente, da soporte a la idea de que es un efecto del proceso del rompimiento de gotas. SIMPSON y ROBINSON confirman las conclusiones de SIMPSON y SCRASE.

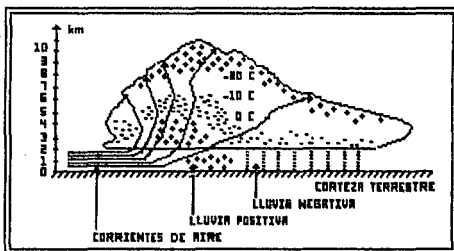


figura 1

TEORIA DE ELSTER Y GEITEL

ELSTER y GEITEL postularon una teoría diferente para explicar el fenómeno de electrificación de la nube. Ellos consideran que una gran gota va cayendo hacia la tierra, polarizándose con carga negativa en la parte superior y carga positiva en la parte inferior, debido al campo eléctrico de la tierra.

En su caída la gran gota toca gotas más pequeñas, que debido a su volumen van cayendo con menor velocidad. La gota pequeña también se polariza con carga negativa en la parte superior y con carga positiva en la parte inferior.

Cuando la gota pequeña hace contacto eléctrico con la superficie inferior de la gran gota, la carga superior de la pequeña cambia de signo y se hace positiva. La gran gota, por su parte, se cargará correspondientemente con polaridad negativa. La gota pequeña será acarreada por las corrientes ascendentes de aire tomando su carga positiva otra vez.

Estas reuniones de la gran gota y de la gota pequeña, producen un intercambio de cargas entre ellas y su separación por la acción de la gravedad y de las corrientes de aire, se repetirá una y otra vez. Así, ocurrirá una separación de cargas eléctricas que incrementarán el campo eléctrico continuamente, hasta que ocurra la descarga atmosférica.

TEORIA DE IONIZACION DE WILSON

C.T.R. WILSON sugirió otra teoría de electrificación de la nube. El explica el fenómeno observando como interaccionan las gotas de agua y los iones que existen sueltos en la atmósfera. Sus ideas son las siguientes :

Normalmente existen presentes en la atmósfera muchos iones positivos y negativos, moviéndose con velocidades cercanas a 1 cm/seg bajo la acción de un campo eléctrico de 1 volt/cm. HESS estimó un promedio de iones "pequeños" de casi 1000 (+) y 800 (-)/cm³. Por su parte GISH dió promedios de 750 (+) y 650 (-)/cm³ con valores individuales variando de 50 a 1000/cm³. También hay "grandes" iones en mayor cantidad pero de menor movilidad. HESS estimó la existencia de estos entre 1000 y 60000/cm³. Estos iones según WILSON, aumentan grandemente en número durante una tormenta, debido a la gran intensidad del campo eléctrico de las nubes. Los iones positivos viajan hacia la tierra, cargada negativamente, con una velocidad que depende de la intensidad del campo eléctrico de la región por donde pasan. Similarmente, los iones cargados negativamente viajan alejándose de la tierra.

WILSON señala que las gotas de lluvia que caen o ascienden por la acción de las corrientes de aire de la tormenta, pueden encontrar más iones. Sin embargo, para iniciar la electrificación es necesario considerar, como en la teoría de ELSTER Y GEITEL, que la separación de carga en las gotas es

debida al efecto del campo eléctrico de la tierra. Partiendo del hecho de que la tierra está cargada negativamente, a las gotas no les queda otra más que polarizarse positivamente en su superficie inferior y negativamente en la parte superior. Las gotas que caen hacia la superficie de la tierra más rápidamente que los iones positivos no pueden ser alcanzadas por éstos; por lo tanto, las gotas no pueden adquirir una carga positiva por atracción de tales iones en la parte superior, por lo que continúan cargadas negativamente.

Por otra parte, las gotas durante su caída pueden entrar en contacto con iones positivos o negativos: en el primer caso los iones serán repelidos por la carga positiva de la parte inferior de la gota y por lo tanto no podrán entrar en contacto. Sin embargo, los iones negativos que la gota encuentra serán atraídos a su parte inferior. Las gotas en su caída tendrán contactos repetidos con iones negativos y quedarán cargadas negativamente, se acumularán en la parte inferior de la nube, aumentarán el campo eléctrico y junto con el de la tierra, coadyuban al proceso de electrificación.

Las gotas que caen con mayor lentitud que los iones positivos, pueden ser alcanzados por éstos y serán atraídos a la parte superior de la gota, que se encuentra cargada negativamente. Estas gotas se cargarán positivamente por efecto de los contactos repetidos. Las gotas más pequeñas también pueden ser transportadas y cargadas positivamente por las corrientes de aire ascendentes. Por todo esto, WILSON concluye que la región superior de una nube está cargada positivamente y la región inferior negativamente.

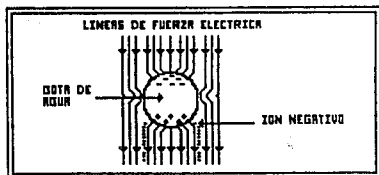


figura 2

TEORIA DE LOS CRISTALES DE HIELO

Un número importante de investigadores atribuyen a la presencia de los cristales de hielo, la separación de cargas, especialmente en la parte superior de la nube.

SIMPSON y ROBNSON atribuyen ésta separación de cargas a los impactos entre sí de los cristales de hielo, ocasionando que el aire adquiera una carga positiva y el hielo una carga negativa.

BEYERS propuso la posibilidad de la existencia de gradientes de potencial, debido al proceso al que se ven sometidas las partículas de agua, próximas a convertirse en cristales de hielo. Esta teoría predice que si la tormenta está en formación, no existirán potenciales elevados hasta que el frente de la tormenta penetre en la región o nivel donde existen los cristales de hielo (en la vecindad de la isoterma de -10°C). La primera descarga eléctrica ocurrirá dentro de la región superior de la nube, entre las zonas positivas y negativas, posteriormente se presentan descargas eléctricas de la nube a la tierra.

SOHNKE mencionó la posibilidad de electrificación debido a la fricción de las gotas de agua con los cristales de hielo o de cualquiera de estos dos, con partículas suspendidas en el aire durante su caída.

Otros investigadores mencionaron que la electrificación de la nube en su parte superior, se debe a la acción solar de los rayos ultravioletas sobre los cristales de hielo que se encuentran en la parte superior de la nube. Los cristales de hielo emiten electrones negativos y por lo tanto, quedan cargados positivamente.

TIPOS DE NUBES

Existen diferentes tipos de nube, de entre ellas el más importante para el estudio de las descargas atmosféricas es la cúmulo nimbo. Esta se caracteriza por una gran amplitud vertical y extensión horizontal limitada, fuertes corrientes de aire verticales y turbulencia, fuertes lluvias con la consecuente producción de descargas atmosféricas.

La nimbo-estrato, como la cúmulo-nimbo, es una nube de gran extensión vertical y también provoca lluvia; aunque en general ésta es más ligera que la que produce la cúmulo nimbo, pero cae por más tiempo. Este tipo de nube tiene normalmente una gran extensión horizontal, además de corrientes de aire y turbulencia menores que la cúmulo nimbo. La nube nimbo estrato es producida comúnmente por la elevación gradual del aire húmedo sobre una masa más densa de aire frío durante un frente cálido.

Otra, la nube cúmulo, agrupa desde pequeñas nubes presentes en climas agradables hasta nubes que se están convirtiendo en cúmulo nimbo. La cúmulo rara vez produce lluvia, pero es indicio de una atmósfera inestable.

Las nubes estrato y estrato cúmulo, son de pequeña altura y gran extensión horizontal, rara vez producen lluvia, aunque algunas veces pueden llegar a provocar lloviznas ligeras.

Las nubes de gran altura como la cirros, cirro estrato y cirro cúmulo y las nubes de altura media como la alto cúmulo y la alto estrato, tienen muy poca influencia en procesos de descargas atmosféricas.

Existe poca información que precise, la altura a la cual se origina el rayo. SIMPSON y SCRASE realizaron observaciones en Inglaterra, donde estimaron centros o acumulaciones de carga que ocurrían entre 457 a 9144 metros. Es claro que el origen de la descarga no coincide con el centro de carga, pero puede estar entre este mismo y la base. E.J.MNSER observó que la altitud de la base de la nube cargada está entre 153 y 305 metros. Sus observaciones confirmaron que la mayoría de las descargas ocurren en presencia de nubes cúmulo y tales descargas a tierra ocurren frecuentemente cuando las nubes están a baja altura. Hay evidencias que muestran nubes cúmulo nimbo a alturas promedio de 1676.5 metros y en algunas de ellas a sólo 198.5 metros.

El gradiente máximo registrado en una nube por SIMPSON y SCRASE fué de alrededor de 100 volts/cm. El campo entre la nube y la tierra, que es más o menos independiente de la altura, es del orden de 50 a 100 volts/cm. Así el gradiente entre la nube y la tierra es alrededor de 305 volts/cm.

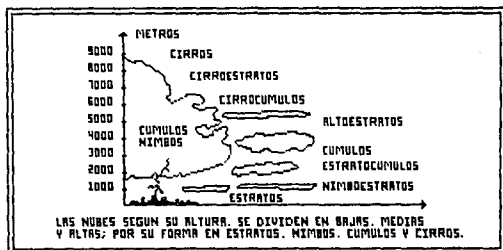


figura 3

DESCARGAS ATMOSFERICAS

COMPOSICION DE UNA DESCARGA DESCRITA POR SCHOLAND Y ASOCIADOS

Se encontró, que cada descarga a tierra, consiste de varias descargas separadas. Generalmente las descargas sucesivas son más intensas, formando ramales más densos. Cada descarga está compuesta o consiste de una porción guía viajando desde la nube a la tierra y una porción principal que viaja de regreso, moviéndose más rápido y con mayor brillantez.

La guía de la primera descarga, consiste de una serie de rayos de luz avanzando hacia abajo, paso a paso, proceso que es denominado como escalonamiento. La longitud de cada paso es de casi 50 metros, completado éste, se realiza una pausa de 100 microsegundos, extendiéndose su luz a gran distancia y comenzando el siguiente paso con mayor brillantez.

La proliferación de ramales que se observa en la porción principal de la primera descarga, se debe exclusivamente a que la porción guía que la procedió, marcó trayectorias o ramificaciones descendentes.

De hecho, el curso que toman paso a paso las porciones guía, marcan la trayectoria que seguirán todas las descargas que componen al rayo. La trayectoria en zig-zag se debe a los cambios de dirección que ocurren en pasos sucesivos.

De esta manera, las porciones guía de descargas subsecuentes, que toman parte, son generalmente de carácter obscuro. Siguen la trayectoria encendida por la primera porción guía, pero no se ramifican.

Si una porción guía de una primera descarga o de una sucesiva, forma ramificaciones, por excepción, éstas se verán

mucho más brillantes, más iluminadas por la porción principal (de regreso), de la descarga.

Sin embargo, si transcurre un intervalo de tiempo grande, antes de que ocurra una descarga subsiguiente, caso inusual, se produce un lanzamiento escalonado como el de la porción guía de la primera descarga.

Las porciones principales subsiguientes, 2a, 3a, etc., cuya trayectoria es de regreso o de movimiento hacia arriba, siguiendo inevitablemente la marca que la porción guía dejó en su viaje a tierra. No es raro ver como en su viaje de retorno, la porción principal se ramifica, aunque si esto ocurre, siempre será a lo largo de las vías encendidas por la porción guía precedente.

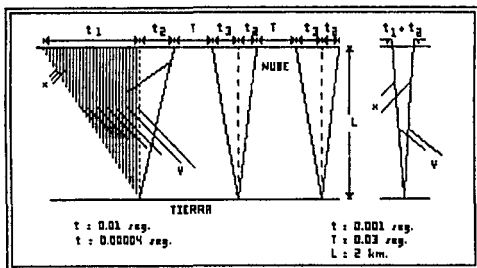


figura 4 y 5

Otros mecanismos observables en algunas descargas, como la Y de la figura 4, la guía aún se está moviendo a lo largo de un ramal, cuando es atrapada por la porción principal que regresa; en otras, como en X , una rama de la porción guía cesó antes de que se iniciará.

La brillantez o luminosidad máxima y la mayor duración de la porción principal (que retorna), se presenta casi a nivel de tierra; de hecho la intensidad vista en los ramales decrece tan pronto como aumenta la altura.

En la figura 4, se representa esquemáticamente una descarga vertical directa, captada por el lente de una cámara de BOYS, con desplazamiento horizontal.

El tipo de registro, se realizó con un movimiento lento de la cámara. Para la primera descarga se muestra en las figuras 4 y 5. Estos mismos resultados fueron obtenidos por WALTER en 1902 a través de una cámara lenta de un sólo lente, teniendo un efecto similar a las fotografías tomadas por LARSEN. En ambos casos, la velocidad de las cámaras fué lenta y con poca sensibilidad, para poder observar el desarrollo del paso guía.

DIFERENCIA ENTRE LA GUIA DE LA PRIMERA DESCARGA Y SUBSECUENTES

La diferencia que existe entre la guía de la primera descarga y las subsecuentes, implica una diferencia vital en sus mecanismos de avance. Los rayos subsecuentes siempre siguen la trayectoria trazada por una descarga previa que pudiera cambiar lateralmente en presencia del viento. Unas son las características, incluida la velocidad, de un rayo que avanza a través de una canal ionizado, y otras diferentes si el canal es virgen (no ionizado). Los mecanismos de avance son diferentes.

La velocidad de los rayos suelen ser superiores a 100,000 km s, aunque la velocidad efectiva de todo el proceso en conjunto es alrededor de 150 km/s. Nunca se ha observado una velocidad menor a 100 km/s. Esta última es la velocidad real de los rayos que proceden al paso de la guía y constituyen lo que se conoce como rayo piloto.

Esta sugerencia equivale a decir : una corriente negativa de aire vírgen viaja hacia abajo, al frente de una porción guía, con una velocidad igual a la de la misma porción guía. Cualquier proceso de descargas subsecuentes, usarán el canal ionizado provisto por el rayo piloto que les precedio.

En la figura 6, se presenta el movimiento del rayo piloto y la porción guía de los rayos.

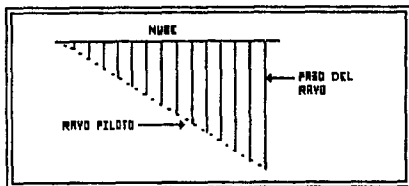


figura 6

La figura muestra lo que hubiera sido captado por una cámara con el lente y la película moviéndose de derecha a izquierda, si fuera posible registrar al rayo piloto (línea punteada), como lo es con la porción guía que le sigue.

La razón por la cual el rayo piloto no puede ser retratado es que su brillo es poco intenso porque la conductividad de su raíz es baja.

El rayo piloto es el único de cuatro presentes que avanza en aire vírgen. La velocidad se ubica en el rango de $10E+6$ km/s - debajo de la cual no puede proseguir - a $20E+7$ km/s.

SCHONLAND encontró que el número de descargas atmosféricas varia de 1 a 27, con casi el 50% en forma directa, pero el

promedio de este tipo , es de 4 . El tiempo entre cada descarga se encuentra entre 0.001 a 0.53 segundos, con promedio de 0.03 segundos.

Por ejemplo : En una investigación realizada en el Suroeste de Africa, se determinó que la velocidad efectiva de la guía escalonada, tiene un rango de 100 a 2000 km/s, con una velocidad frecuente de 150 km/s, longitudes de paso que van de 10 a 206 metros y tiempos entre cada paso de 31 a 91 microsegundos.

La velocidad de la porción principal (de regreso), tiene un rango de 20,000 km/s a 144,000 km/s, con promedio de 52,000 km/s y el más frecuente es de 35,000 km/s. Todas estas velocidades, fueron comparadas con la de la luz, que es de 300,000 km/s.

PROCESOS ESCALONADOS ASCENDENTEMENTE

En otra investigación (EDIFICIO EMPIRE STATE), se descubrió, que en la mayoría de los casos, la guía de escalonamiento, se dirigía de la parte alta del edificio hacia la nube. Sólo en algunos casos se observó lo contrario. No importando la forma de escalonamiento (ascendente o descendente) ni la polaridad de la nube (positiva o negativa), la dirección de propagación de la guía inicial depende de la configuración de los 2 electrodos que son la nube y la tierra.

Cuando la guía escalonada es ascendente (tierra a nube) y no presenta una porción principal (de regreso), puede deberse a una baja movilidad de cargas en la nube.

Cuando la guía de la descarga se aproxima a la tierra, la carga de ésta, se mueve y se concentra en objetos altos de gran conductividad. Sin embargo, no es necesario tener objetos de gran altura, para que se presente una descarga atmosférica.

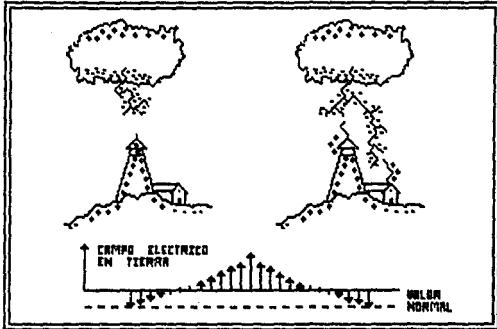


figura 7

MECANISMO DE DESCARGAS MÚLTIPLES

El mecanismo de este proceso es descrito por SCHONLAND, mostrándose en la figura 10. La guía del rayo en la primera descarga, acarrea consigo una cantidad substancial de cargas negativas, las cuales se distribuyen en el propio canal y en sus ramales, como se ilustra en la figura 8(a).

Las descargas posteriores, transportan una cantidad menor de cargas negativas, ésto se explica porque usualmente no están ramificadas. La porción principal (de regreso) inicia su viaje ascendente (con polaridad positiva), tan pronto como llegan a tierra, uno de los ramales guía. Esta etapa se ha podido fotografiar en escasas ocasiones, su presencia, más bien, se ha supuesto. Esta etapa es ilustrada en la figura 8(b). La longitud de los rayos ascendentes es de 3 a 15 metros.

Hecho el contacto, entre la guía y la tierra, los rayos ascendentes se integran al canal de la guía. Esto se presenta en la figura 8(c).

Cuando los rayos ascendentes han penetrado la nube, la carga restante se dirige al canal ionizado en forma escalonada e iluminada. Por lo general, para que ocurra una segunda descarga tiene que existir otro centro de carga diferente en la nube, ésto se ilustra en las figuras 8 (d)(e) y (f).

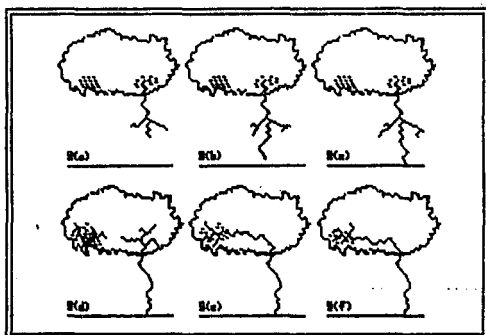


figura 8

FRENTE DE ONDA Y DURACION

Surge justo ahora una pregunta de especial interés : ¿Cómo es que se produce el incremento súbito de la corriente, cuando una descarga atmosférica le pega a un objeto conductor, ubicado en la superficie de la tierra? - como una torre de una línea de transmisión-.

Es innegable, la existencia de cargas en movimiento, caracterizados por una corriente que circula por la torre antes de que sobre ella incida la porción guía del rayo. Tan pronto como esta última se aproxima a la torre, la concentración de carga aumenta rápidamente y alcanza un valor máximo que ocurrirá, - probablemente - en el momento del contacto. El frente de la onda, quizás esté o quede determinado por la velocidad de propagación de la porción guía medida a lo largo de los pocos metros que debe recorrer. Digamos que 100 metros se recorren entre 2 y 30 microsegundos.

Es posible que ocurra una falla de aislamiento en alguna cadena de aisladores o en algún otro sitio, en cuyo caso, la velocidad de propagación pudiera ser mucho mayor.

Si la guía es escalonada, la propagación se suspende entre escalones, por lo que el frente de la onda, consistirá de una serie de impulsos cortos, separados por intervalos que pudieran ser tan largos, como 100 microsegundos, seguidos por la descarga principal en el instante del contacto.

El proceso de incremento de la corriente en función del acercamiento de la porción guía (a impulsos sucesivos) se hace notar en la figura 9. Si la porción guía fuera continua, la onda o velocidad de crecimiento de la corriente será menor.

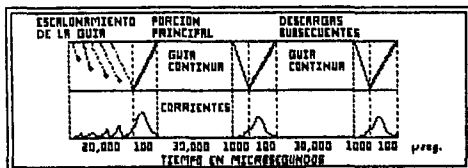


figura 9

La figura 9 es más sugestiva de lo que parece a simple vista, pues informa cualitativamente el proceso total. Así : Después de que la porción principal toca tierra, la carga es rápidamente acarreada a través del canal desde la nube a tierra, por acción brillante y de rápida propagación de la porción principal (de regreso).

Este proceso es continuamente progresivo y congruente con el avance de la punta de la porción principal del rayo. La figura sugiere un aumento rápido de la corriente desde un valor bajo - unos cientos de amperes - hasta 100-200 kiloamperes, en un tiempo que va de 1 a 10 microsegundos.

Inmediatamente después, la magnitud de la corriente disminuye (cola de la onda), pero lo hace más lentamente - permanece en un valor elevado - durante el período en el cual la porción principal descarga la carga presente en el espacio entre la nube y la tierra.

Entonces : la forma de la onda de la corriente está determinada por la velocidad de descarga a través del canal, velocidad que depende de la velocidad de retorno de la porción principal y de la distribución de las cargas.

BELL y PRINCE, obtuvieron un oscilograma que muestra el incremento súbito del potencial causado por una descarga directa sobre una línea de transmisión. LEWIS y FOUST, lo interpretaron como una corriente de descarga, cuyo incremento se expresa mediante la relación :

$$i = -300 e^{-0.5t}$$

donde i = Corriente en amperes
 t = Microsegundos

Otro hecho importante es que, al progresar la porción principal del rayo, en su tránsito hacia arriba, decrece en intensidad al acercarse a la nube. Se sugiere que a través del contacto con la tierra, existe una alimentación pequeña de energía adicional, que proviene del centro de carga de la nube. Así, para una nube de 1600 metros de altura con una velocidad de propagación de $1/10$ de la velocidad de la luz, la duración del flujo de la corriente es de 54 microsegundos.

En resumen, el mecanismo de una descarga atmosférica, presenta la siguiente secuencia:

Las características de una descarga atmosférica, son ahora bien conocidas, así, como lo resultados de análisis de fotografías, oscilogramas, etc.

1) Cuando el gradiente eléctrico en algún punto de la carga concentrada de la nube, excede el valor de ruptura por humedad y aire ionizado (10 kV/cm), un rayo eléctrico es enviado a la tierra a $1/6$ de la velocidad de la luz, progresando solamente cada 50 m hasta antes de interrumpir la emisión de brillo de luz en su punta. Aparentemente la pausa se debe a la formación de carga en la punta del rayo, porque no puede ser detenida, debido al gradiente que produce la ruptura. Pero, después de un intervalo de 100 microsegundos, se realiza otro envío, repitiéndose hasta su terminación. El tiempo requerido por la guía escalonada para llegar a tierra puede ser alrededor de 20,000 microsegundos y la trayectoria queda determinada por las condiciones locales del aire y del campo eléctrico de la tierra. Una ilustración que describe el escalonamiento de la guía, se presenta en la figura 10.

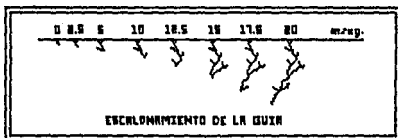


figura 10

2) Al contacto con la tierra, fluye una densa corriente por la guía escalonada, a $1/10$ de la velocidad de la luz, trayendo corrientes que van de 1000 a 200,000 amperes. Esto es llamado porción principal. Su luminosidad decrece conforme se acerca a la nube. Su duración es de 100 microsegundos o más, el diámetro del núcleo ha sido estimado entre 1 y 2 centímetros, pero la corona envolvente puede ser más grande y su desarrollo, se ilustra en la figura 11.



figura 11

3) Después de que se completa el regreso de la descarga, la corriente es más pequeña, del orden de 1000 a 100 amperes, que siguen fluyendo. Tales corrientes pueden persistir hasta 20,000 microsegundos. El potencial en el punto inicial de la ruptura en la nube es reducido, esto atrae una descarga a este punto de las regiones adyacentes de la nube. Consecuentemente un depósito adicional de carga, llega a ser disponible en la masa de la nube, creando una nueva ruta llamada trayectoria preferente.

4) La guía de descarga durante descargas múltiples, progresa hacia la tierra, con una velocidad uniforme del 3% de la velocidad de la luz y sin ramales. Esto es referido como una guía continua. Cuando esta guía hace contacto con la tierra, sigue un regreso de la misma naturaleza, con corrientes bajas, hasta que se disipe la energía disponible en la nube. Hasta 42 descargas múltiples han sido observadas, pero el promedio es de 3. El intervalo entre cada descarga es de 0.001 a 0.53 segundos, con un promedio de 0.03 segundos, la descarga múltiple puede ser de 1 segundo. Esta información se muestra en la figura 12 y 13.

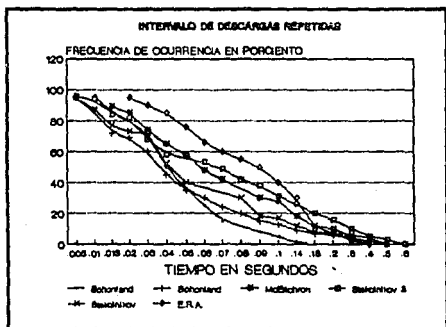


figura 12

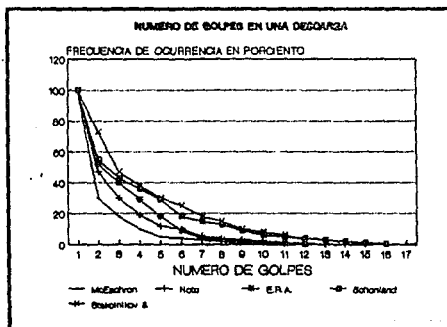


figura 13

5) La duración total de la descarga del último rayo es de 1 segundo, mostrándose en la figura 14.

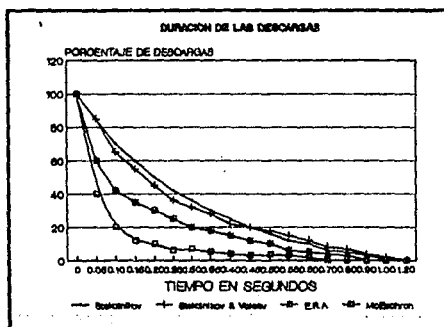


figura 14

6) La corriente transmitida a la tierra puede tener un valor de cresta de 220,000 amperes, los datos estadísticos están en la figura 15.

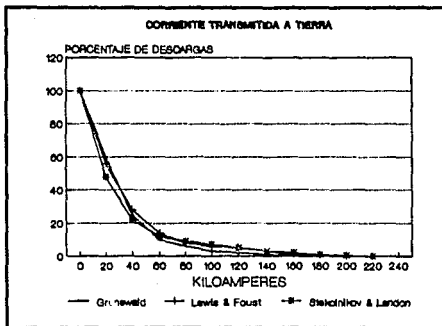


figura 15

7) Los valores de elevación de corriente en la descarga están reportados por tres investigadores, como se muestran en la figura 16.

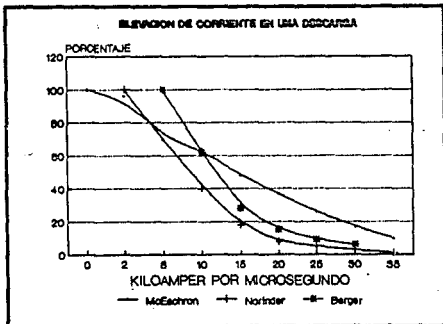


figura 16

9) La figura 9 muestra gráficamente los efectos de la guía y los golpes principales del frente de onda y de cola, se muestran en la figura 17.

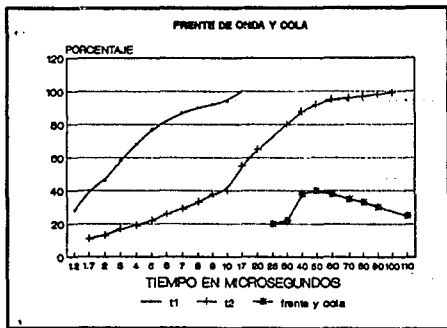


figura 17

INSTRUMENTOS EMPLEADOS EN LA MEDICION DE DESCARGAS

La importancia de la protección en líneas de transmisión contra descargas atmosféricas, es el conocimiento de la magnitud, duración y forma de onda de voltaje, así como para corriente. Las características de la descarga determinan las ondas resultantes que se presentan en los sistemas eléctricos. De esta manera, llega a ser deseable tener instrumentos, capaces de medir las características de las descargas atmosféricas.

Una dificultad encontrada en el desarrollo de los instrumentos, es el rango de registro de las características y del tiempo, ya que unas corrientes pueden llegar hasta 200000 amperes y los tiempos varían en orden de microsegundos, ya que en ocasiones el tiempo completo de la descarga puede ser de 1 seg.

La mayor probabilidad de que se presente una descarga en un punto dado, se presenta en zonas de gran altura, por lo que se instalan los instrumentos en ese lugar, suendo éstos diferentes para obtener la información deseada.

LA CAMARA DE BOYS

Algunos de los conocimientos del mecanismo de la descarga, se obtuvieron a través de la cámara de CHARLES V. BOYS, en 1900.

La cámara original tuvo 2 lentes idénticos, con una longitud focal de 6 pulgadas y espaciados 4 pulgadas a partir del centro, montado en un disco, el cual podía girar manualmente a una velocidad cercana a 12 m/s. Atrás de los lentes tiene una placa fotográfica. Con los lentes girando, las 2 imágenes de la descarga se tomaban en dirección opuesta. De una comparación de las dos películas y conociendo la longitud focal de los lentes, velocidad y distancia del golpe, es posible determinar la velocidad de los componentes de la descarga.

Este tipo de cámara, está representado en la figura 18. Considerando que el tambor está en reposo, los rayos de luz de un objeto en movimiento será la trayectoria de A a B, pasando al prisma inferior, enfocándose los lentes a la película con trayectoria a a b; de manera semejante, el prisma superior y los lentes trazan la trayectoria a' a b'. Pero si el tambor se encuentra girando, la película se distorsiona, grabando al prisma inferior de a a c, y grabando al prisma superior, a lo largo de la trayectoria de a' a c'. Realizando una comparación de las dos imágenes, se obtiene la cantidad de distorsión, con la cual se puede medir la velocidad del objeto en movimiento.

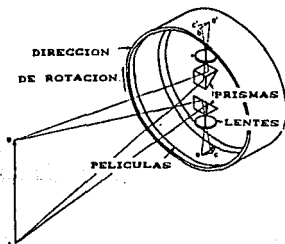


figura 18

SPARK GAPS

El primer intento que se desarrolló, fué un dispositivo rudimentario, consistiendo de gaps en paralelo con diferentes espaciamientos. El primero prevé la ruptura por corto circuito y los demás, la salida del sistema. Una alta resistencia fué instalada en serie a cada gap. El gap de ruptura máxima fué señalado con un papel, que indicó la medición del voltaje. PEEK

utilizó gaps de esfera y de agujas en paralelo, para obtener la medición de la forma de onda, ya que la comparación de la distancia de los gaps describen una forma de onda.

EL KLYDONOGRAPH

Fué el primer instrumento para la medición de ondas de voltaje, inventado por J.F.PETERS en 1924. Emplea la técnica del grabado de figuras de LICHTENBERG, que están en función de la magnitud, polaridad y forma de onda del voltaje.

El Klydonograph consiste de un electrodo cilíndrico, sobre la superficie lisa de una placa aislante, sostenido por un electrodo. El voltaje mínimo para grabar las figuras es de 2kV y el máximo 18kV, sin embargo, para altos voltajes se pierde la transparencia de la fotografía.

Para una polaridad específica se tienen diferentes características en las figuras, para voltajes positivos y negativos. Para cualquier polaridad, si la distancia del centro de figura a su borde, no es simétrico, es función del voltaje aplicado.

La interpretación de la polaridad en las figuras, para un mismo voltaje, ya teniendo su registro, se realiza por comparación entre las figuras, si alguna es por lo menos 2 veces mayor que la otra, se tiene polaridad positiva y se asigna negativa a la menor.

Además, puede registrar varios voltajes de manera simultánea en líneas de transmisión, así como los tiempos de ocurrencia, si el movimiento de la película es lento.

Se le ha empleado en conjunto, con una resistencia en derivación para la medición de corrientes y con un bobina en

serio, para unirse al circuito, sin embargo, la precisión de la medición es del orden del 25 al 50 % .



OSCILLATORY SURGE DUE TO AN ARCING GROUND

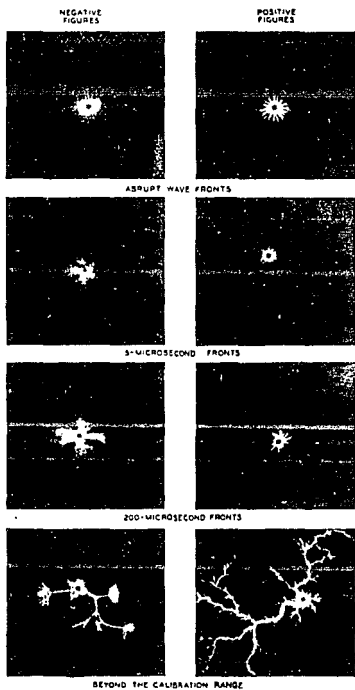


figura 19

EL OSCILOGRAFO DE RAYO CATODICO

La emisión del cátodo, consiste de un haz de electrones que son acelerados por una campo eléctrico en un tubo. El primero fué producido por F. BRAUN en 1897. En 1913, ZENNEK empleó el primer rayo cátodico para registrar el fenómeno de la descarga, fotografiando al rayo y registrándolos en una pantalla fluorescente. DUFOURT, desarrolló el primer oscilógrafo de rayos cátodicos para registrar transitorios. Realizando modificaciones, para que el rayo chocara en una placa fotográfica, siendo éste, el primer oscilógrafo para el estudio de los rayos, producidos en forma artificial en una línea de transmisión.

Su aplicación ha sido en la medición de voltajes por efecto capacitivo en líneas de transmisión así como para ondas de corriente a través de una resistencia en derivación en donde el voltaje de la resistencia se aplica a las placas del oscilógrafo

AMPERIMETRO MAGNETICO POR ONDAS DE CRESTA

Fué desarrollado por FOUST y KUEHNI, el cual es capaz de medir la magnitud de la cresta y polaridad de las ondas de corriente. Consiste de unas piezas de acero con un magnetismo remanente, colocándose alrededor del conductor que se desea medir. El magnetismo remanente es una función de la magnitud de la corriente producida por ondas en una sola dirección. La polaridad de la onda es indicada por la dirección de magnetización. Fué usado para la medición de corrientes en descargas directas en líneas de transmisión, brazos de torre, hilos de guarda, conductores de fase y pararrayos.

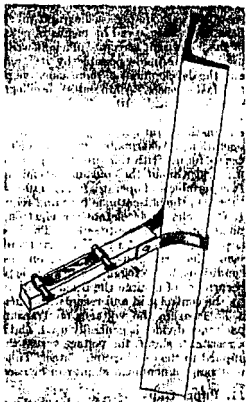
La unión magnética está usualmente en escudra, asegurando que el conductor coincida con sus ejes en la dirección normal de las líneas de fuerza magnética. Diversas uniones se emplean en

diferentes puntos para la medición de corrientes y para distinguir las polaridades, así como oscilaciones. Figura 20



(a)

- (a) Link.
(b) Link in position on transmission-line tower.



(b)

figura 20

OSCILOGRAFO DE LAMPARA CRATER

Un oscilógrafo magnético no puede registrar perfectamente frecuencias de alrededor de 10000 ciclos/seg, tampoco formas de onda y magnitudes de cresta de corrientes producidas por las descargas. Pero, es capaz de registrar longitud de onda en corrientes bajas, dando la duración total del número de componentes en una descarga.

El oscilógrafo de lámpara de cráter supera estas dificultades. Usa una lámpara cráter de neón como fuente de luz la cual comienza su funcionamiento por medio de un transitorio de 20 microsegundos.

FULCHRONOGRAPH

Este dispositivo es capaz de medir la forma de onda y la duración de la corriente de cola. La parte esencial del fulchronograp es la rueda de aluminio girando. El fulchronograp cuenta con una velocidad alta de 3450 rpm. y una velocidad inferior de 60 rpm. Tiene 408 ranuras en la periferia de la rueda de aluminio, con remanencia magnética, separados 9 mm. Las ranuras pasan entre angostos carretes, donde el flujo de corriente puede ser medido. La función de éste dispositivo, es similar al amperímetro magnético de ondas de cresta, sólo que se tiene que introducir el tiempo de rotación de la rueda.

La unidad de alta velocidad es dividida de 17000 microsegundos en intervalos de 43 microsegundos, para baja velocidad en 1 revolución por segundo, en intervalos de 2500 microsegundos. Para descargas múltiples, rara vez, ésta última es de 1 segundo o tienen intervalos de más de 0.5 segundos. Con estos factores hacen posible determinar la forma de onda y la magnitud con que son registrados por las dos ruedas, la principal desventaja de éste dispositivo es la incapacidad de medir altos rangos de frentes de onda. Figura 21.

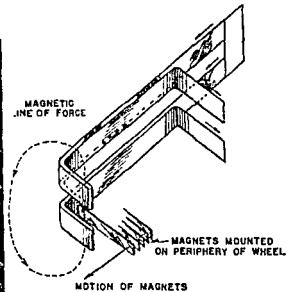
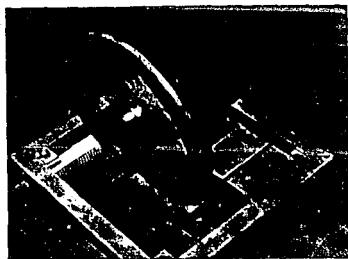


figura 21

REGISTRO MAGNETICO DE FRENTE DE ONDA

Es un dispositivo capaz de registrar características de la corriente de descarga. Consiste de 3 circuitos con resistencias e inductancias a diferentes constantes de tiempo. Estos son conectados a través de una inductancia, llevando la onda de corriente a una bobina. Las uniones de cada campo en los inductores, registran su máxima corriente. Las diferentes constantes de tiempo, proveen que las corrientes respondan a cambios instantáneos en la corriente principal, eliminando efectos de oscilación por alta frecuencia en los frentes de onda. Si las resistencias no están presentes, la corriente en la bobina auxiliar, en cualquier caso, puede ser proporcional al cambio de la onda de corriente, y la corriente máxima en ellos es proporcional a la corriente máxima del frente de onda.

Cuando las inductancias son conectadas al circuito auxiliar la corriente máxima en uno de ellos, es proporcional al promedio de elevación de la onda de corriente en el rango definido para el alcance de la cresta. Figura 22.

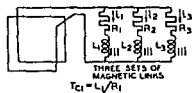
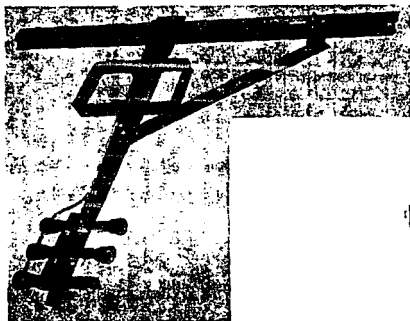
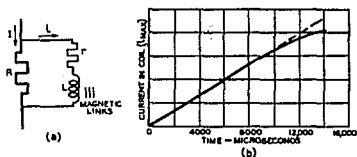


figura 22

INTEGRADOR DE ONDA MAGNETICA

Este dispositivo registra la carga total o bien la integral de la corriente de una onda de descarga. Consiste esencialmente de una derivación no inductiva que transporta corriente, conectándose con un inductor. Despreciando la resistencia del inductor, esta corriente instantánea sólo es igual al tiempo integral de la corriente. Si no es oscilatoria, el valor máximo de ésta corriente es la integración total. Cubre un amplio rango, en 3 uniones dentro del campo de la bobina. El campo que magnetiza las uniones es función de la corriente, y el efecto de la resistencia en la bobina, es un retardo del tiempo para una medición exacta. Figura 23.



(a) Schematic diagram.
(b) Response curve.

figura 23

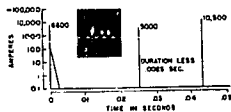
REGISTRO FOTOGRAFICO DE LA ONDA DE CORRIENTE

Registra características de la descarga y corrientes continuas de bajas magnitudes, a través de fotografías de la luminosidad del flujo de la corriente, que pasa por un gap. La imagen de la película produce una apertura especial de las

barras que tiene construídas de manera no uniforme, con movimiento perpendicular en su dirección. Las barras dirigen la imagen con la dirección de la película para determinar su tiempo. La amplitud y densidad de la imagen, proporciona la magnitud de la corriente. Al aumentar la corriente, la densidad de la película se satura, incrementándose la distancia desde el centro del eje. Pero, más allá de esta región, puede medirse la magnitud, con la distancia de los ejes. La precisión es de 1 a 1 pero los rangos son de 0 a 1500 kiloamperos, con un tiempo de 600 microsegundos para descargas de 1 segundo. Figura 24.



(a)



(b)

(a) Surge-current recorder with cover removed.
(b) Typical record.

figura 24

REGISTRO DE TORMENTAS ELECTRICAS

Las mediciones que se han hecho del grado de potencial eléctrico de la tierra y la ionósfera, realizadas en distintos puntos del planeta han demostrado que este gradiente varía durante el día en intensidad, alcanzando un máximo momentáneamente en la tierra. Este pico ocurre al atardecer y en las primera horas de la mañana (hora de Greenwich). En este período de tiempo ocurre precisamente un máximo de tormentas eléctricas a escala mundial, sobre Africa Ecuatorial y en Sudamérica. Esta relación podría proporcionar el mecanismo para la corriente de retorno, de ser así, el gradiente de potencial sería mayor cuando la actividad de tormentas eléctricas fuera máxima; ya que tanto en la tierra como en los conductores, el pico ocurriría en todo el plano simultáneamente.

En México, las nubes de tormenta eléctrica se producen generalmente durante la época de lluvias, por efecto combinado del calentamiento de las capas superficiales de aire húmedo, levantamiento orográfico o inestabilidad convectiva. Ocasionalmente, la nube de tormenta se puede producir en el invierno por un levantamiento brusco del aire tibio húmedo sobre la superficie inclinada de un frente frío (comúnmente llamado Norte) en la planicie costera del Golfo de México. La energía producida proviene en ambos casos de la liberación del calor latente de condensación del aire húmedo que asciende y se expande adiabáticamente. El aire húmedo del Este, que es forzado ha ascender, choca contra las barreras montañosas de la Sierra Madre occidental y Oriental, produciendo la distribución de tormentas. En la cuenca de México, por ejemplo, se observa que las laderas y lomeríos del poniente de la Cd. de México, que reciben el impacto de la corriente húmeda del Este, se tiene un mayor número de tempestades eléctricas y, al mismo tiempo, son más lluviosas en comparación con la zona de la planicie de la cuenca. En las vastas zonas montañosas de México, las tormentas

eléctricas tienen en la época de lluvias un máximo de ocurrencia por la tarde o en las primeras horas de la noche, cuando los efectos combinados del calentamiento y el levantamiento orográfico producen su máximo.

En cambio sobre el mar, la diferencia de temperatura entre el agua y el aire es mayor por la noche y las tormentas eléctricas ocurren consecuentemente al terminar el día.

El rayo es el resultado de la descarga de la electricidad estática. La descarga calienta el aire a unos 10000 grados centígrados y la tremenda expansión de la columna de aire origina una onda de presión hacia fuera, que viaja a 300 m/s. Los rayos que caen en la tierra producen en ocasiones incendios al caer sobre árboles o estructuras prominentes. Las regiones donde se registran más tormentas eléctricas (más de 80 al año) en el mundo, se encuentran en la India, Africa Ecuatorial, Indonesia, el alto Amazonas y las Antillas; en los E.U.A. se localizan en la porción norte de la península de Florida.

Algunos de los lugares con mayor ocurrencia de días con tempestades eléctricas en México, son :

LUGAR		NO. TORMENTAS ANUALES	PRECIPITACION ANUAL (mm)
Cosamaloapan,	Veracruz	61	1400
San Rafael,	México	60	1082
Colima,	Colima	48	861
Tepeyahualco,	Puebla	40	577
Tacubaya,	D. F.	36	721
Valle Nacional,	Oaxaca	44	3790
Jesús Carranza,	Veracruz	48	2317
Teziutlán,	Puebla	31	1585

Para tener una idea de la distribución anual de días con tormentas eléctricas en la República Mexicana, se presenta el siguiente mapa :



CAPITULO 3

MODELADO Y ESTIMACION DEL RIESGO EN LINEAS DE TRANSMISION

Las consecuencias que trae consigo el fenómeno de descargas atmosféricas son de gran importancia, sobre todo cuando involucran al sistema de transporte de energía.

Los efectos de los transitorios de voltaje y de corriente (más el primero), son los de mayor relevancia; por lo que, el conocimiento preciso de sus parámetros predominantes, nos indicará los puntos críticos que deberán ser vistos con el mayor cuidado, para poder reducir las probabilidades de falla y por consiguiente las salidas del sistema.

Como se vió en el capítulo 2, si una descarga atmosférica incide en una torre o cerca de ella, siempre se presentará irremisiblemente una sobretensión, que será mayor, entre más cerca esté del punto donde ocurrió la descarga. ¿ Qué tanto se elevará el potencial de la torre ? Esto dependerá de un cúmulo de factores, siendo los más importantes :

- 1) La magnitud de la corriente de descarga, la cual circulará hacia ambos lados del lugar en donde se presenta e inducirá tensiones en los conductores paralelos.
- 2) Ubicación de la falla con respecto a las terminales de la línea.
- 3) Método de puesta a tierra.
- 4) Colocación de los conductores en la torre y la ubicación de la torre.
- 5) Resistencia de tierra promedio de la línea y la resistencia al pie de la torre.
- 6) Número, material y sección del cable de guarda.
- 7) Número, material y sección de los conductores de fase.
- 8) Resistividad del terreno.

Nuestro propósito es la reproducción del fenómeno por medios digitales y se basarán en la teoría de la propagación de ondas viajeras.

No obstante que la propagación de las ondas puede ser representada de manera muy estricta, a través de un modelado matemático, pero, las analogías permiten su observación y entendimiento de manera muy eficaz. El fenómeno de la propagación de las ondas puede visualizarse o apreciarse si se observa el tránsito de las ondas en el agua, o si se emplean medios mecánicos.

Una de tantas analogías muestra como se propagan las ondas sin distorsión ni atenuación a lo largo de una línea. La figura 1 es una representación lograda por C. F. Wagner.

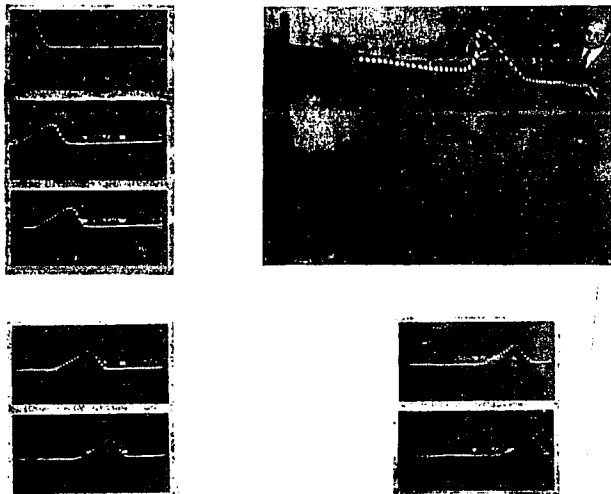


figura 1

La onda de corriente y voltaje presentan la misma forma y en cualquier instante son proporcionales. La constante de proporcionalidad es conocida como la impedancia característica de la línea (Z), siendo $Z = \sqrt{L/C}$ con unidades en ohms.

En la figura 2 se presentan dos ondas viajeras, el voltaje que es positivo está referenciado a tierra, de la misma forma la corriente positiva tiene la misma dirección de propagación.

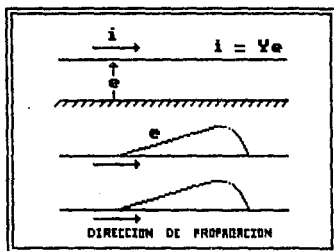


figura 2

La impedancia característica de un conductor aéreo con regreso a tierra es :

$$Z = 60 \ln (2h/r) = 138 \text{ LOG}_{10} (2h/r)$$

Donde : h altura del conductor
r radio del conductor

La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas es igual a la velocidad de la luz, 300000 km/seg, pero la diferencia en las líneas de transmisión es que el conductor funge como guía. En términos de las constantes de la línea, esta velocidad es igual a $1/\sqrt{L/C}$.

ELECTROS DE DESCARGAS ATMOSFERICAS EN LINEAS DE TRANSMISION

Las líneas de transmisión de alto voltaje deben estar diseñadas, de tal manera que, presenten una protección casi perfecta contra las descargas atmosféricas, para evitar dentro de lo posible, la salida de la línea. Una descarga directa sobre una línea de transmisión puede iniciar un arco entre fases o bien de fase a tierra, siendo esta la más frecuente. Este arco en ocasiones se autoextingue, dependiendo del valor instantáneo del voltaje de fase y de las características de la descarga atmosférica.

Por su parte, el backflash se presenta cuando una descarga atmosférica cae sobre una torre o hilo de guarda y el sobrevoltaje resultante es capaz de provocar un arco que va de la torre hacia el conductor.

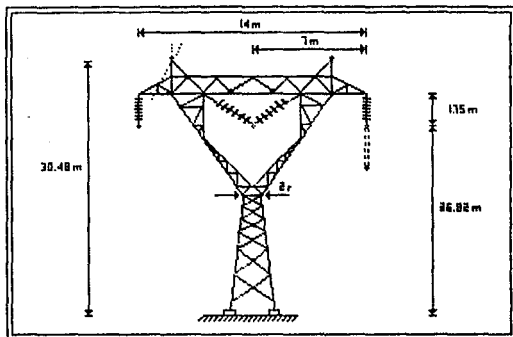
Para ilustrar las ideas, se ha escogido como prototipo o ejemplo, una línea de 230 kV. Como primera aproximación se supone que la línea tiene 2 conductores, uno de fase y el otro de guarda (en realidad son tres de fase; pero se considerará sólo el que está más alejado por razones prácticas). La corriente de la descarga se dividirá y seguirá tres trayectorias a saber: el hilo de guarda que va hacia la torre de la derecha, el hilo de guarda que va hacia la torre de la izquierda y la estructura de la torre, todo conforme a sus respectivas impedancias. Las corrientes del hilo de guarda, inducirán ondas de voltaje y corriente en el conductor de fase, como se ilustra en la figura 3. Si el valor de pico excede el voltaje crítico de flashover (Tensión crítica de flameo, CFO), para cualquier tipo de cadena de aisladores o gaps, entonces puede ocurrir un backflash.



SECRETARÍA DE ENERGÍA Y TRANSMISIÓN

DISPOSICIÓN GEOGRÁFICA DE LAS LINEAS DE TRANSMISIÓN DE 230 kV.





Resistencia de la torre (Z_T) en ohms :

$$Z_T = 60 [\ln (\sqrt{2} 2H/r) - 1]$$

Resistencia al pie de la torre (R_{TT}) en ohms :

$$R_{TT} = \rho / (2\pi r)$$

Donde :

- ρ = Resistividad del terreno.
- r = Radio de la torre.
- H = Altura de la torre.

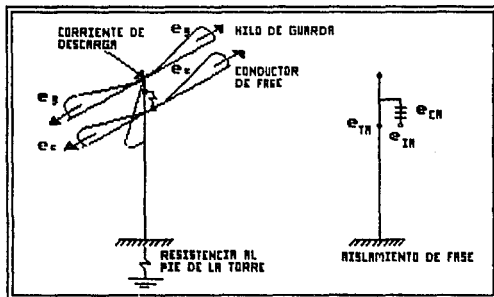


figura 3

Para una descarga en la torre, la velocidad inicial de crecimiento (pendiente) del voltaje, está dado por la siguiente ecuación :

$$E = \left[\frac{S}{2/Z_g + 1/Z_T} \right]^{-1} \dots\dots(1)$$

- donde :
- S es la corriente de descarga.
 - Z_g es la impedancia característica del hilo de guarda.
 - Z_T es la impedancia característica de la torre.

Este valor inicial de la velocidad de crecimiento del voltaje se ve alterado posteriormente por las ondas reflejadas en la resistencia concentrada, ubicada al pie de la torre (R_{TT}). Un valor típico de la impedancia característica de la torre (Z_T) es de 200 ohms, por lo que es correcto considerar que $R_{TT} < Z_T$ y como consecuencia las reflexiones son negativas, traduciéndose así en una disminución del pico de voltaje, presente en lo alto de la torre.

Si hacemos las aproximaciones siguientes : de que $Z_T = Z_g/2$ y de que $R_{TT} \ll Z_T$, entonces lo que muestra la figura 4 es el valor cuantitativo del voltaje en lo alto de la torre, excluyendo del cálculo a las reflexiones de las torres adyacentes.

Las fórmulas que se aplican son aproximadas :

$$E_T = Z_T \tau_T I / T_F \quad \dots\dots(2)$$

$$E_{TT} = R_{TT} I + E_T \quad \dots\dots(3)$$

$$E_F = R_{TT} I \quad \dots\dots(1)$$

Donde :

τ_T es el tiempo de viaje o de tránsito de las ondas en la torre.

T_F es el tiempo del frente de onda de la corriente.

I es la magnitud del pico de la corriente.

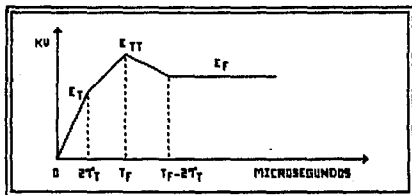


figura 4

Se ha supuesto, también, que el tiempo de cola de la onda de descarga es infinito. Debe notarse que E_T representa una

caída de voltaje en la inductancia de la torre, la cual eventualmente desaparece.

Cuando se incluye el efecto de las reflexiones en las torres adyacentes, el tiempo de cola se reduce, a pesar de la suposición de que la corriente tenga una cola infinita. Esto ocurre porque las ondas que inciden en la cima de las torres adyacentes ven una impedancia característica Z_0 en paralelo con Z_T . Las ondas que regresan reflejadas al punto de golpe son negativas y por lo tanto, reducen el voltaje de la torre.

Como la línea de transmisión y las torres adyacentes forman un circuito simétrico a la izquierda y a la derecha, alrededor de la torre golpeada, la línea puede ser plegada alrededor del punto de descarga, como se muestra en la figura 5, esto es válido y útil para simplificar el análisis. La torre golpeada conserva intactos los valores de la impedancia característica y resistencia al pie de la torre, mientras que los circuitos que conectan con las otras torres, se representarán con todos sus parámetros tomados a la mitad de su valor.

Si la descarga ocurre a la mitad del claro, las impedancias y las resistencias al pie de la torre pueden ser plegadas alrededor del punto donde incide la descarga. En este caso todas las impedancias características y las resistencias al pie de la torre se dividen a la mitad. En cualquiera de los dos casos, solo se tomará en cuenta un número limitado de torres adyacentes. El número de torres que pueden tener un efecto sobre el voltaje de pico está dado por el tiempo del frente de onda de la descarga T_f y el tiempo de viaje o de tránsito de las ondas en la torre T_a , calculándose a través de la siguiente relación :

$$\text{No. de torres} = T_f / 2T_a, \text{ donde } T_a = \pi$$

Más allá de la última torre considerada, la línea se representa mediante una impedancia concentrada, conectada a la

terminación. Si se trata de conductores múltiples, entonces la terminación es una matriz de resistencias propias y mutuas, cuyos valores se escogen, de tal modo que no provoquen reflexiones.

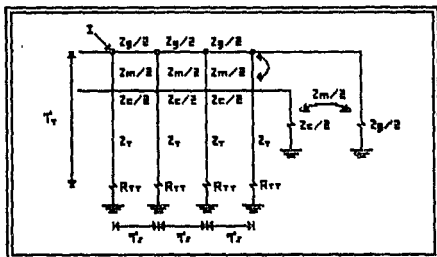


figura 5

La geometría de la torre se muestra en la figura 6. Sólo uno de los conductores de fase, el exterior, está simulado. La razón es que el aislamiento de este conductor estará sometido al máximo esfuerzo, debido a que el voltaje inducido es inferior al que se presenta en el conductor central. Por su parte, los hilos de guarda han sido concentrados para formar un conductor equivalente.

Las impedancias características modales y la impedancia característica de fase, están dadas en la tabla 1. Las líneas, por haber sido plegadas y por lo tanto supuestas paralelas, están representadas por la mitad de sus impedancias modales, anotadas en forma matricial. Las torres están modeladas como si fueran un sólo conductor a tierra, con una impedancia de 200 ohms y una velocidad de onda semejante a la de la luz. El tiempo total de viaje en la torre es de 0.102 microsegundos. La distancia desde

la punta de la torre hacia los conductores de fase no está modelada; aunque se sabe, que a una onda de impulso le toma un cierto tiempo finito en viajar desde la punta de la torre hasta ese punto. Ese mismo tiempo finito es el requerido para que el voltaje aparezca en el conductor de fase. Este efecto no puede ser modelado en el EMTP.

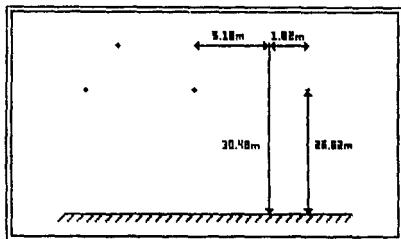


figura 6

Tabla 1 Impedancia característica en línea de 230 kV.					
MODO	Z (Ω)	V (km/seg)	FASE DOMINANTE		
			Z _g (Ω)	Z ₀ (Ω)	Z _m (Ω)
1	523.18	115846	316.48	480.80	93.60
2	274.08	115846			
Matriz de Transformación Modal			+ T ₁ = $\begin{bmatrix} 0.91097 & -0.41247 \\ 0.41247 & 0.91097 \end{bmatrix}$		

La corriente de impulso se ha supuesto con una magnitud de -1000 amperes y el tiempo de cola de 80 microsegundos. El tiempo frontal fué un parámetro variable en el estudio (1 microsegundo, 2 microsegundos, ...). La figura 7 muestra la forma de onda de la corriente. Dado que el modelo del sistema es

lineal, los resultados del EMTP pueden ser expresados en términos de kV por kA de la corriente de impulso (pudiera decirse que este resulta ser un valor específico peculiar).

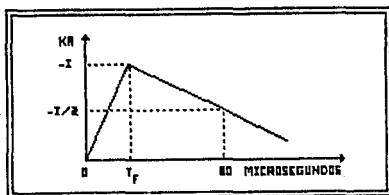


figura 7

Un modelo para simular al sistema y someterlo a diferentes tipos de onda de impulso sobre la torre, están mostrados en la figura 8. Como puede observarse la longitud del claro supuesto es de 322 m. Los datos de entrada para este modelo se encuentran en la tabla 2. El tiempo de viaje a lo largo del claro es de 1.074 microsegundos para cada modo. El paso de integración es de 1/10 del tiempo de viaje del tramo más pequeño; este es el que corresponde a las torres.

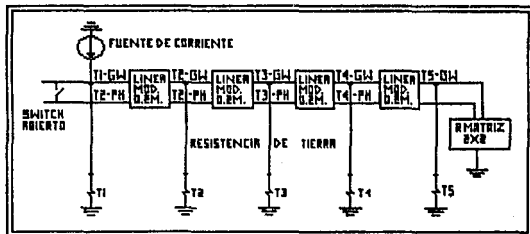
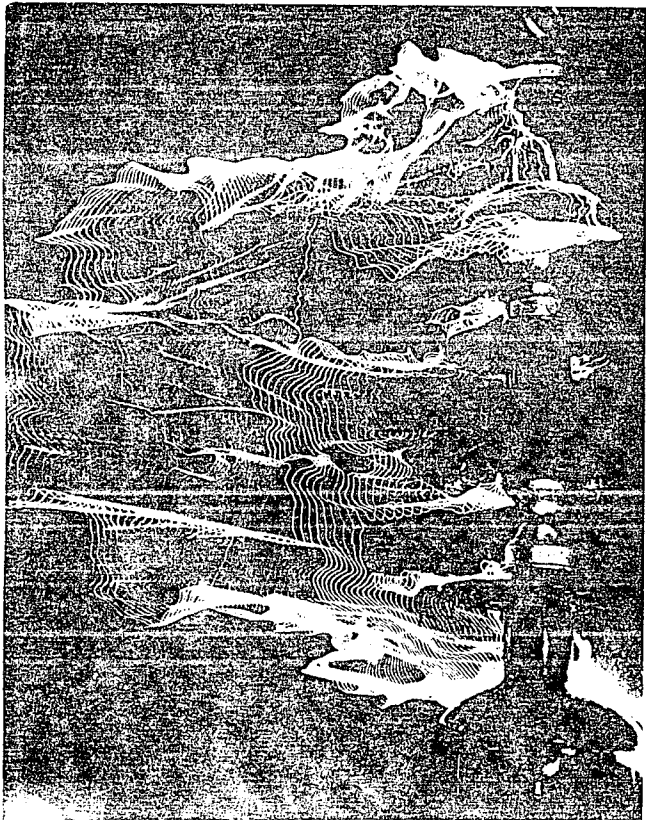


figura 8



Se analizaron 3 casos para una descarga, para un tiempo de frente de onda de 2 microsegundos con R_{TT} de 50 ohms y 20 ohms, así como otro de 1 microsegundo para R_{TT} de 50 ohms.

En la figura 9 se presenta el voltaje en la punta de la torre y el de fase con $R_{TT} = 50 \Omega$ y $T_F = 1 \mu\text{seg}$. El voltaje en la punta aumenta, desde un tiempo de 0 hasta 0.20 microsegundos aproximadamente, en ese momento se presenta, ya de vuelta, la primera reflexión proveniente de la base de la torre. El valor pico de disturbio se alcanza en 1 microsegundo y la onda de reflexión de la torre elimina el voltaje inductivo. Desde 1.2 hasta 2.15 microsegundos, el voltaje en la punta de la torre parece adoptar un valor constante cuando llegan las reflexiones de las torres adyacentes, reduciendo la cola de la onda.

Usando las ecuaciones 2, 3 y 4 se obtienen E_T , E_{TT} y E_F :

$$E_T = 200 \left(\frac{0.102}{1} \right) = 20.4 \text{ kV} \quad \text{vs} \quad 18 \text{ kV} \quad \text{en figura 9 (5)}$$

$$E_{TT} = 50 + E_T = 70.4 \text{ kV} \quad \text{vs} \quad 48 \text{ kV} \quad \text{en figura 9 (6)}$$

$$E_F = 50 \text{ kV} \quad \text{vs} \quad 38 \text{ kV} \quad \text{en figura 9 (7)}$$

Las fórmulas aproximadas están basadas en la suposición de que $Z_T = Z_g/2$; por otra parte, en el modelo se usaron valores de $Z_g/2 = 158.23$ ohms y $Z_T = 200$ ohms. Aún así, la aproximación sirve como comprobación gruesa de los resultados.

En las figuras 10,11,12 y 13 se presentan los voltajes en la punta de la torre y en el conductor de fase, esto en las torres 2,3,4 y 5 respectivamente. Las ondas que se propagan se ven atenuadas por las reflexiones negativas que ocurren en la punta y en la base de cada torre.

En la torre 5, la impedancia característica y la resistencia al pie de la torre contribuyen a la formación de una terminación no perfecta del hilo de guarda, razón por la cual aparecen voltajes reflejados.

ESTIMACION DEL RIESGO

Todo lo anterior tiene sentido si de alguna manera, los resultados nos permiten estimar el riesgo o probabilidad de que la línea salga de servicio por una sobretensión. Es más, tendrá más sentido si nos permite tener una noción cuantitativa del efecto de las medidas correctivas sobre esa probabilidad. Así la manera más adecuada de comparar todos estos casos, consiste en relacionar la resistencia al pie de la torre, los tiempos del frente de onda, los voltajes en la punta de la torre (K_{TT}) y la tensión que somete a esfuerzos al aislamiento, dada en unidades de tensión por amper de corriente de descarga. Todas estas cifras se muestran en la tabla 3.

Tabla 3 Resultado del estudio sobre posibilidades de ocurrencia del backflash						
Caso No.	Descarga en	RIT Ω	T_f μseg	K_{TT} kV/kA	K_{IA} kV/kA	I_c kA
1	Torre 1	50	1	48.0	34.0	51.8
2	Torre 1	50	2	43.0	30.5	44.8
3	Torre 1	20	2	25.5	18.0	75.8

Para propósito de ilustración, vamos a suponer que la cadena tiene 12 aisladores; la longitud de la cadena es de 69 pulgadas o 5.75 pies. Para una onda de impulso de polaridad negativa estándar de 12/50, la tensión que debe soportar el aislamiento

es de 170 kV/ft. Por lo tanto el CFO (estándar) es de 977.5 kV. Este valor puede ser ajustado o corregido para ondas no estándar por medio de la siguiente relación :

$$CFO_{NS} = \left[0.58 + \frac{1.39}{\sqrt{T_F}} \right] CFO \quad \dots\dots(8)$$

Para calcular la corriente crítica (que produciría flashover en presencia de una descarga atmosférica), la tensión que resiste la cadena de aisladores deberá ser ajustada para voltaje nominal. Para este sistema un voltaje de pico razonable es de :

$$V_{PF} = \frac{230}{\sqrt{3}} \sqrt{2} (1.05) = 197.2 \text{ kV} \quad \dots\dots(9)$$

Tabla 4
Esfuerzo de aislamiento en
función del frente de onda

T_F μseg	CFO_{NS} kV	$CFO_{NS-K} V_{PF}$ kV
1	1926	1763
2	1528	1385

CFO_{NS} : no estándar

La corriente crítica puede ser calculada como :

$$I_c = \frac{CFO_{NS-K} V_{PF}}{K_{IA}} \quad \dots\dots(10)$$

donde $K = 0.551$ para líneas con arreglo de conductores verticales y $K = 0.827$ para líneas con arreglo horizontal (nuestro caso). Para corrientes de impulso mayor que I_c , se asume que ocurre un backflash. El esfuerzo a que se somete la cadena de aisladores para varios frentes de onda se muestra en

la tabla 4, mientras las corrientes críticas se han anotado en la tabla 3. La distribución de probabilidad de la corriente de descarga está descrita por una distribución normal logarítmica $\text{Ln}(33.3, 0.605)$, (ésta es similar a una distribución Gaussiana o Normal) la cual está dada por :

$$Z = \frac{\text{LN}(I/33.3)}{0.605} \quad \text{para } I > 20 \text{ kA} \quad \dots\dots(11)$$

Con el valor Z, se entra a las tablas de distribución Normal y se determina la probabilidad de exceder la corriente crítica, o bien, de que ocurra un flashover. En este caso, se supone que la descarga atmosférica cae en el hilo de guarda y los resultados obtenidos, se muestran en la tabla 5.

El número de descargas sobre el hilo de guarda puede ser calculado. Asumiendo un nivel isoceraúnico de 30 días de tormenta por año, la densidad de las descargas es :

$$N_g = 0.063 (30)^{1.25} = 4.4 \text{ golpes/km}^2 \quad \dots\dots(12)$$

Tabla 5 Probabilidad de Flashover				
Descarga localización	R+r Ω	I _c kA	Z	P (I > I _c) por unidad
Torre 1	50	44.8	0.490	0.3121
Torre 2	20	75.8	1.360	0.0859

El área expuesta de los hilos de guarda es, aproximadamente :

$$A = L (2 R_A + S_g) \quad \dots\dots(13)$$

donde L es la longitud de la línea, S_g es la separación de los hilos de guarda (34 pies o 10.36 m en nuestro caso) y R_A es un radio de atracción dado por :

$$R_A = 14.4 h^{0.4} \dots\dots(14)$$

donde H es la altura de la torre en metros (100 pies o 30.48 m en nuestro caso). Por lo tanto :

$$R_A = 14.4 (30.48)^{0.44} = 64.76 \text{ m} \dots\dots(15)$$

El número de descargas sobre el hilo de guarda por unidad de longitud sobre la línea es :

$$\frac{NCG}{L} = N_g (2R_A + S_g) (4.4 \text{ golpes/km}^2/\text{año}) [2(0.0648\text{km}) + 0.0104\text{km}]$$

$$\frac{NCG}{L} = 0.62 \text{ golpes/km/año} = 1.00 \text{ golpes/milla/año} \dots\dots(16)$$

Debido a que la altura de los hilos de guarda es menor en la mitad del claro que en la torre, se supone que el 60% de las descargas terminan en la torre y sólo el 40% a la mitad del claro, siendo estas últimas muy poco frecuente y por lo tanto de baja probabilidad de falla por backflash.

La tasa de salidas está dada por :

$$LFOR = \frac{NCG}{L} (0.6) (P \text{ de tabla 5}) \dots\dots(17)$$

Con $R_{TT} = 50$, el LFOR es aproximadamente 19/100 millas/año y con $R_{TT} = 20$, el LFOR es 5/100 millas/año. El LFOR con la resistencia al pie de la torre con un valor pequeño, puede ser aceptable.

El diseño para la protección contra descargas atmosféricas, es una parte del diseño de líneas de transmisión, pero los requerimientos de aislamiento para contaminación y manejo de interruptores, también deben tomarse en cuenta.

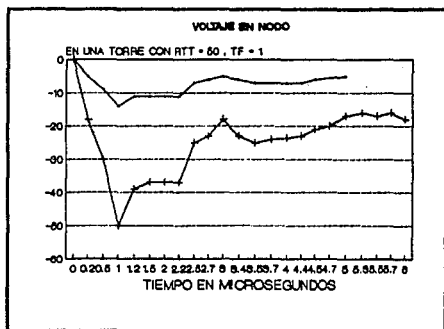


figura 9

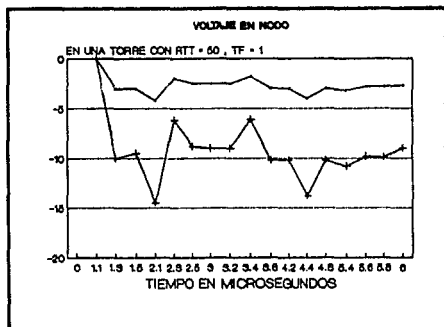


figura 10

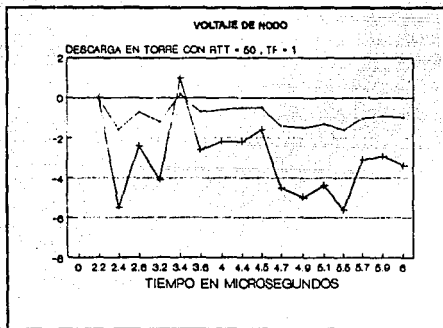


figura 11

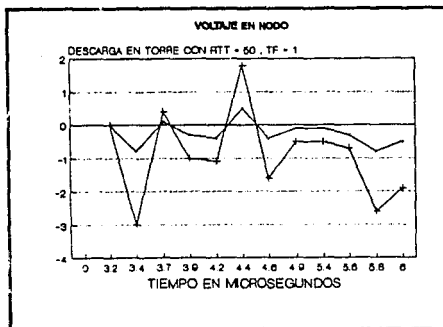


figura 12

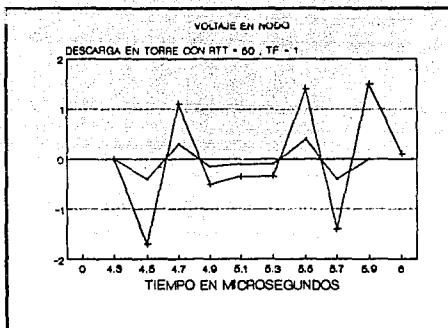


figura 13

En la figura 14, se presentan los voltajes a través del aislador de la torre 1.

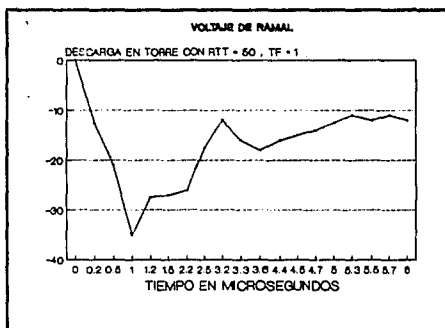


figura 14

Las figuras 15 y 16, presentan el voltaje en la punta de la torre acoplado con el voltaje de fase y el aislamiento para $R_{TT} = 50$.

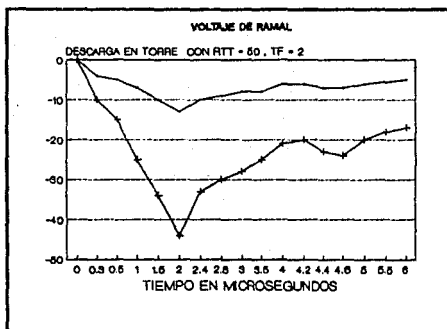


figura 15

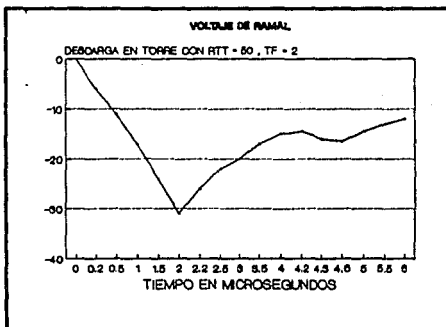


figura 16

Las figuras 17 y 18, presentan estos voltajes para $R_{rr} = 20$

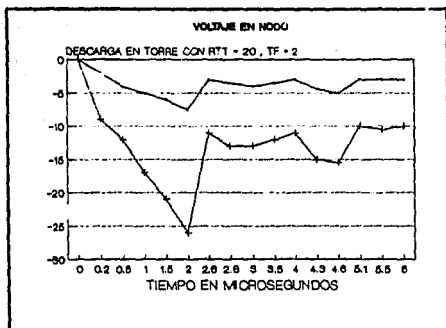


figura 17

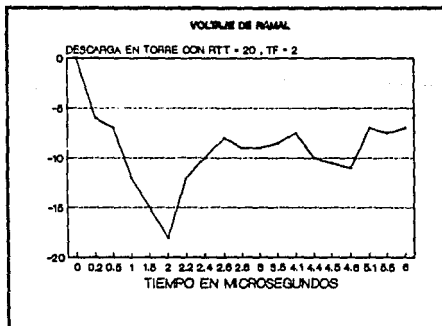


figura 18

CAPITULO 4

EL EMP, RESULTADOS Y CONCLUSIONES

ELECTRO-MAGNETIC TRANSIENTS PROGRAM
(E M T P)

El Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) es el software que se utiliza para la simulación de fenómenos transitorios, electromagnéticos, electromecánicos y de control, en sistemas eléctricos de potencia.

Fue desarrollado en 1960 por el Dr. HERMANN DOMMEL, quien lo llevó a Bonneville Power Administration (BPA). Desde entonces, el EMTP ha sido expandido y distribuido por la dirección de BPA. Sin embargo, sus desarrollos no solo han sido por ésta, sino también, por diversas universidades y empresas que lo han adquirido, ya que una de las ventajas que presenta es la gran flexibilidad en el modelado de sistemas, aplicables a una amplia variedad de estudios, como : la coordinación de aislamiento, diseño de equipo de medición, especificaciones de dispositivos de protección, diseño de sistemas de control, solución a problemas de fallas en equipos, etc., características que lo han llevado a ser de gran utilidad para la industria.

En este caso, el EMTP se utilizó para el estudio de descargas atmosféricas sobre una línea de transmisión de 230 kV, visualizando de manera gráfica, el comportamiento del voltaje en los conductores de fase y en los hilos de guarda.

Para la representación física de la línea de transmisión se elaboró una mascarilla, que contiene los siguientes parámetros :

- | | | |
|----------------------------------|---|-----------------------|
| 1) Número de circuitos | : | 1 |
| 2) Número de conductores de fase | : | 3 |
| 3) Número de hilos de guarda | : | 2 |
| 4) Conductor de fase | : | ACSR 900 MCM |
| a) Resistencia (RA) | : | 0.1185 ω milla |
| b) Reactancia (XA) | : | 0.3930 ω milla |
| c) Diámetro (ODIAM) | : | 1.1620 pulgadas |

- 6) Hilo de guarda : ACERO 3/8 DE PULGADA
- a) Resistencia (RA) : 5.4900 Ω /milla
 - b) Reactancia (XA) : 1.0400 Ω /milla
 - c) Diámetro (ODIAM) : 0.3750 pulgadas
- 6) Distancia entre torres : 0.2 millas
- 7) Altura mínima del claro
- a) Conductor de fase : 80 pies
 - b) Hilo de guarda : 92 pies
- 8) Distribución en plano X-Y para conductores de fase e hilos de guarda.
- | | X (pies) | Y (pies) |
|------------------|----------|----------|
| Fase | 0.000 | 88.000 |
| Hilo de guarda 1 | 6.000 | 100.000 |
| Hilo de guarda 2 | 40.000 | 100.000 |
- 9) Resistividad del terreno : 100 Ω /metro
- 10) Frecuencia : 60 Hertz

Esta información es la que procesa el EMTP para determinar los parámetros de línea, dentro del modulo de LINE CONSTANTS.

A continuación se presenta la tarjeta de entrada de datos del LINE CONSTANTS y sus resultados.

BEGIN NEW DATA CASE

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS : PROBABILIDAD DE FALLA DE UNA LINEA DE TRANSMISION, EN PRESENCIA DE DESCARGAS ATMOSFERICAS.

AUTOR : LOPEZ MARDUEZ JUAN JOSE
MONTAÑO FRIAS HECTOR

" PARAMETROS FISICOS DE UNA LINEA DE

TRANSMISION DE 230 KV, QUE TIENE
3 CONDUCTORES : 3 DE FASE Y 2
HILOS DE GUARDA "

-----+++++-----+++++
\$ERASE

LINE CONSTANTS

C --- DATOS DE LOS CONDUCTORES

C ---

C COLUMNA :

C 3 FASE E HILO DE GUARDA.
C 4-8 CORRECCION POR EFECTO PIEL.
C 9-16 RESISTENCIA [OHMS/MILLA].
C 17-19 EL 3 ELIMINA EFECTO PIEL.
C 19-26 REACTANCIA [OHMS/MILLA].
C 27-34 DIAMETRO [PULGADAS].
C 35-42 DISTANCIA HORIZONTAL [PIES].
C 43-50 ALTURA DE CONDUCTORES [PIES].
C 51-58 ALTURA DEL CLARO [PIES].

C *****-----*****

1	0.0	0.11850	3	0.3730	1.162	0.00	88.00	50.000
2	0.0	3.49000	3	1.0400	0.3750	6.00	100.00	75.000
3	0.0	3.49000	3	1.0400	0.3750	40.00	100.00	75.000

BLANK TERMINA TARGETA DE DATOS DE CONDUCTORES

C TARGETA DE DATOS DE FRECUENCIA

C

C COLUMNA :

C 1-8 RESISTIVIDAD [OHMS/MILLA].
C 9-18 FRECUENCIA [HERTZ].
C 19-20 CORRECCION POR CARSON
C 30-35 IMPRIME MATRIZ CAPACITANCIA.
C 37-42 IMPRIME MATRIZ DE IMPEDANCIAS.
C 43-52 DISTANCIA ENTRE TORRES [MILLAS].
C 70 LINEAS NO TRANSPUESTAS

100.0 60.0 1 111111 111111 1 0.200

*PUNCH

BLANK TERMINA TARGETA DE DATOS DE FRECUENCIA
BLANK TERMINA LA TARGETA DE DATOS DE LA LINEA
BLANK TERMINA EL CASO

BLANK

BLANK

BLANK

*STOP

De manera similar, para la obtención de la información gráfica, se debe de crear una tarjeta de entrada, la cual requiere de los resultados del LINE CONSTANTS, para proporcionar un archivo de información gráfica, en los puntos de interés, en nuestro caso, las 5 torres modeladas.

A continuación, se presenta la tarjeta de entrada para la creación del archivo de gráficos (TP1) y sus resultados.

BEGIN NEW DATA CASE

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS : PROBABILIDAD DE FALLA DE UNA LINEA DE TRANSMISION, EN PRESENCIA DE DESCARGAS ATMOSFERICAS.

AUTOR : LOPEZ MARQUEZ JUAN JOSE
MONTAÑO FRIAS HECTOR

" DESCARGA ATMOSFERICA SOBRE UNA TORRE DE TRANSMISION DE 230 kV .

```

-----*****-----*****
1.020E-8  6.0E-6  60.  0.
-----
40000  1  1  1  1  0  0  2  0  0

```

--- Z CARACTERISTICA DE TERMINACION

```

-----
1T5-PH 288.88
2T5-GW 58.1936 191.2276

```

--- RESISTENCIA AL PIE DE LA TORRE

```

T1GRND 50.0
T2GRND 25.0
T3GRND 25.0
T4GRND 25.0
T5GRND 25.0

```

--- TORRES COMO LINEAS DE TRANSMISION

```

-----
C aaaaaabbbbb R Zc v long k
-1T1-GW T1GRND 0. 200.0 9.8E8 100.0 1
-1T2-GW T2GRND 0. 100.0 9.8E8 100.0 1
-1T3-GW T3GRND 0. 100.0 9.8E8 100.0 1
-1T4-GW T4GRND 0. 100.0 9.8E8 100.0 1
-1T5-GW T5GRND 0. 100.0 9.8E8 100.0 1

```

--- LINEA NO-TRANSPUESTA

```

-----
C aaaaaabbbbb k f
#VINTAGE. 1
-1T1-PH T2-PH 0. 0.28694E+03 0.18628E+06 .20E+00 1 2
-2T1-GW T2-GW 0. 0.17321E+03 0.18628E+06 .20E+00 1 2

```

--- TI matrix:

```

-----
0.999864 -0.1877585
0.000000 0.0000000
-0.016491 0.9822152
0.000000 0.0000000

```

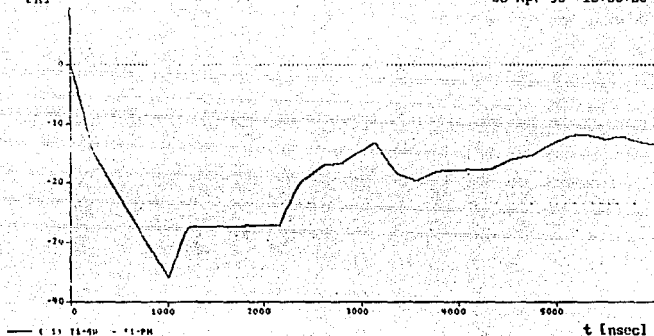
```

C
C
C
C
C aaaaaabbbbbbbxxxxxxxxxyyyyyy
#VINTAGE, 1
-1T2-PH T3-PH T1-PH T2-PH
-2T2-GW T3-GW T1-GW T2-GW
C
#VINTAGE, 1
-1T3-PH T4-PH T1-PH T2-PH
-2T3-GW T4-GW T1-GW T2-GW
C
#VINTAGE, 1
-1T4-PH T5-PH T1-PH T2-PH
-2T4-GW T5-GW T1-GW T2-GW
#VINTAGE, 0
# ---
BLANK:
C --- SWITCHES:
C aaaaabbbbbb-----+++++++
T1-GW T1-PH          1.0
C
BLANK:
C --- FUENTES:
C          amp.      freq.      time-0      amp.      time-1      tstart
C aaaaaxkx-----+++++++ttttttttt-----
12T1-CW -1      -1000.          1.E-6      -500.      80.E-6      0.
C
BLANK:
C -- NOMBRE DE LOS NODOS A IMPRIMIR :
C aaaaaabbbbbbb:ccccddddddeeee.....ggggghhhhhhiiiiikkkkk
T1-GW T1-PH T2-GW T2-PH T3-GW T3-PH T4-GW T4-PH T5-GW T5-PH
BLANK

```

Ik1

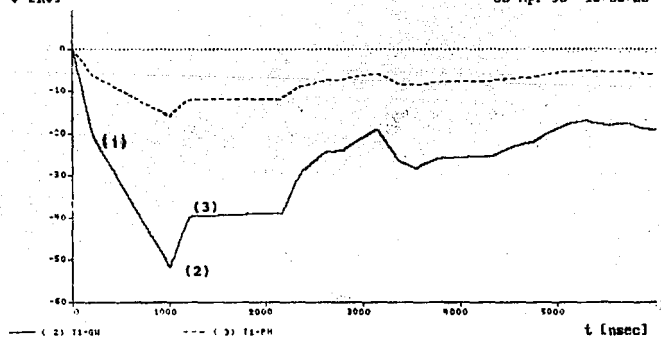
30-Apr-93 15:03:26



CASO 1 ESFUERZO DE AISLAMIENTO
MIA = -35.928 (KV/KA)
RIT = 50 ohms , TF = 1 microsegundo

v [KV]

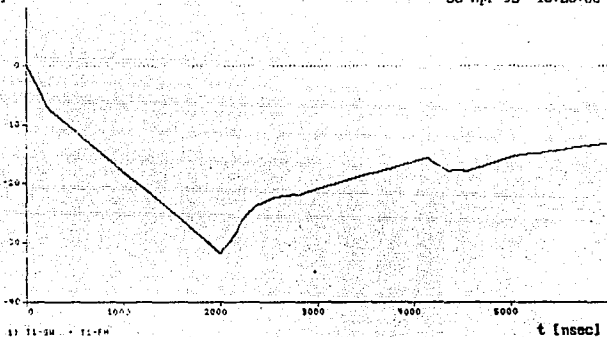
30-Apr-93 15:03:26



CASO 1 VOLTAJES EN LO ALTO DE LA TORRE 1
KIT = -51.644 (KV/KA)
RIT = 50 ohms , TF = 1 microsegundo

[k]

30-Apr-93 15:25:06



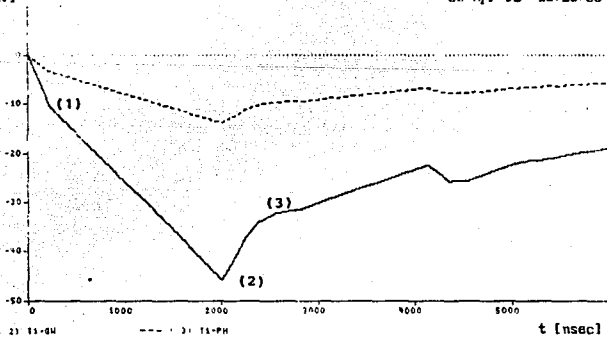
CASO 2 ESFUERZO DE AISLAMIENTO

KIA = -31.746 [KV/KA]

RTT = 58 ohms , TF = 2 microsegundos

v [KV]

30-Apr-93 15:25:06



CASO 2 VOLTAJES EN LO ALTO DE LA TORRE 1

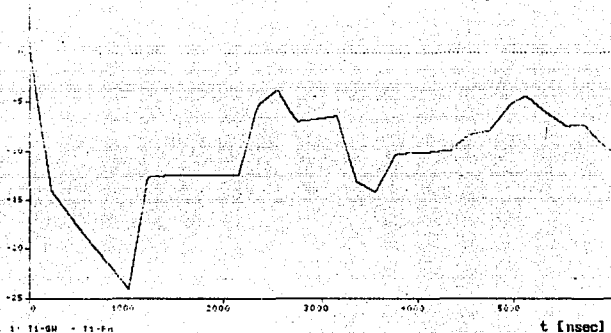
KIT = -45.632 [KV/KA]

RTT = 58 ohms , TF = 2 microsegundos

105

[1]

30-Apr-93 15:33:53



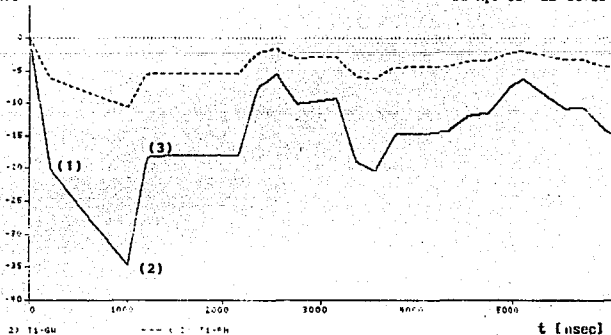
CASO 3 ESFUERZO DE AISLAMIENTO

K10 = -24.112 [K/KAL]

RTT = 20 olms , TF = 1 microsegundo

V [KV]

30-Apr-93 15:33:53



CASO 3 VOLTAJES EN LO ALTO DE LA TORRE 1

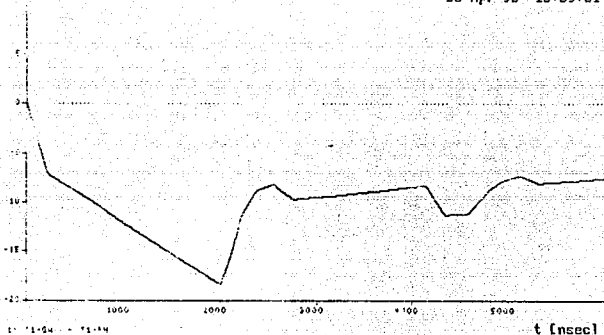
K10 = -34.658 [K/KAL]

RTT = 20 olms , TF = 1 microsegundo

106

[k]

30-Apr-93 15:39:31



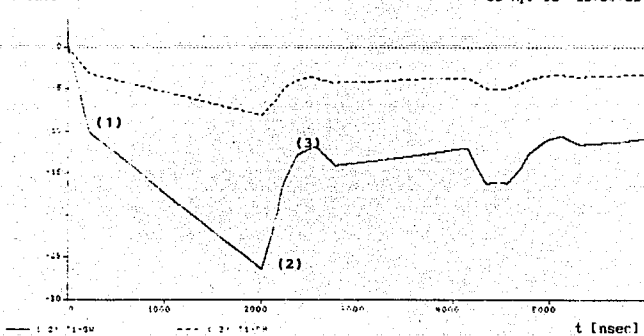
CASO 4 ESFUERZO DE AISLAMIENTO

KIA = -18.351 [KU/KA]

KIT = 20 ohms , TF = 2 microssegundos

v [KV]

30-Apr-93 15:39:31



CASO 4 VOLTAJES EN LO ALTO DE LA TORRE

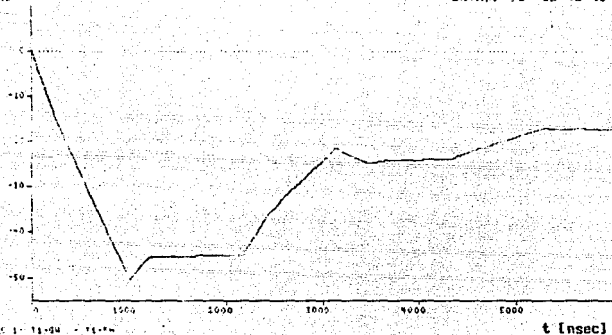
KIT = -26.379 [KV/KA]

KIT = 20 ohms , TF = 2 microssegundos

107

[k]

30-Apr-93 15:46:49



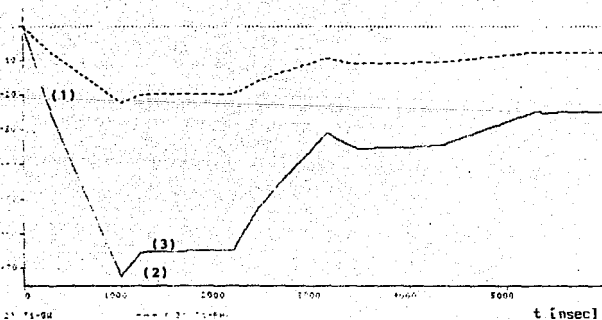
CASO 5 ESFUERZO DE AISLAMIENTO

KIA = -58.254 [KV/Ka]

RIT = 100 ohms , TF = 1 microsegundo

v [KV]

30-Apr-93 15:46:49



CASO 5 VOLTAJES EN LO ALTO DE LA TORRE 1

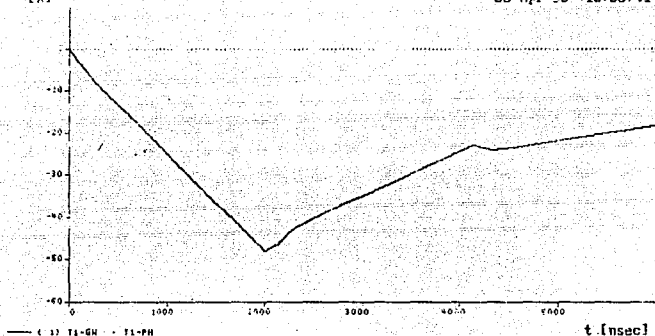
KIT = -72.236 [KV/Ka]

RIT = 100 ohms , TF = 1 microsegundo

108

[k]

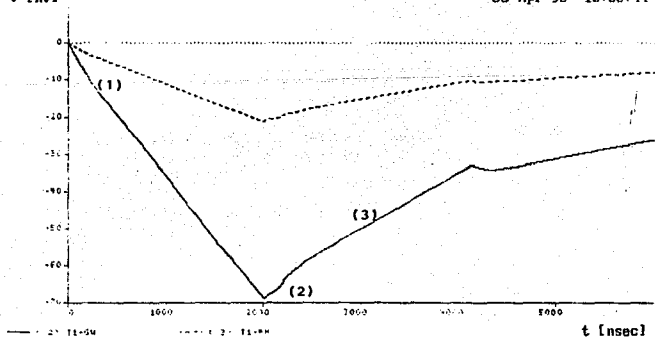
30-Apr-93 15:56:41



CASO 6 ESFUERZO DE AISLAMIENTO
 $KIA = -47.958 \text{ [KV/KA]}$
 $RIT = 100 \text{ ohms}$, $TF = 2 \text{ microsegundo}$

v [KV]

30-Apr-93 15:56:41



CASO 6 VOLTAJES EN LO ALTO DE LA TORRE 1
 $KIT = -60.936 \text{ [KV/KA]}$
 $RIT = 100 \text{ ohms}$, $TF = 2 \text{ microsegundos}$

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En estas gráficas, se identifican las variaciones en los puntos de interés, ya sea del conductor de fase e hilo de guarda. Considerando una onda de polaridad negativa debido a que ésta se presenta con mayor frecuencia durante una descarga atmosférica y somete a mayores esfuerzos los aislamientos.

En el punto (1) de las gráficas se hace presente la primera reflexión que proviene de la resistencia al pie de la torre (R_{TT}), en donde incide la descarga.

En el punto (2), es cuando se alcanza el valor máximo de voltaje en lo alto de la torre (K_{TT}).

En el punto (3), se hace presente la primera reflexión de las torres adyacentes, la cual reduce el voltaje en lo alto de la torre y parece adoptar un valor constante, lo cual no se logra por los efectos de las reflexiones negativas de las demás torres adyacentes.

Después de este punto, se observa que actúan un número mayor de reflexiones en cada una de las torres que van reduciendo el voltaje ocasionado por la descarga hasta valores que ya no afectan los niveles de aislamiento.

En general, de manera similar ocurre en las demás gráficas, este tipo de comportamiento, defasándose en el tiempo en cada torre y con voltajes cada vez menores.

La siguiente tabla 1 muestra los datos del CFOs y CFO para una línea de 230 kV, que tiene inicialmente una cadena de 12 aisladores de 254 mm x 146 mm y los conductores en forma horizontal ($k = 0.827$).

TABLA 1		
T_F	CFONS	CFO - KVFF
[μ seg]	[kV]	[kV]
1	1926	1763
2	1528	1365

Con las gráficas de la simulación y la tabla anterior se completa la tabla 2 .

TABLA 2						
TABLA DE RESULTADOS DEL BACKFLASH						
CASO	PUNTO DONDE CAE EL RAYO	RTT	T_F	K_{TT}	K_{IA}	I_c
		[Ω]	[μ seg]	[kV \cdot kA]	[kV \cdot kA]	[kA]
1	TORRE 1	50	1	-51.644	-35.928	-49.07
2	TORRE 1	50	2	-45.632	-31.746	-42.99
3	TORRE 1	20	1	-34.658	-24.112	-73.12
4	TORRE 1	20	2	-26.379	-18.351	-74.38
5	TORRE 1	100	1	-72.236	-50.254	-35.08
6	TORRE 1	100	2	-68.936	-47.958	-28.46

En la tabla 3 se tienen las probabilidades del Flashover para cada uno de los casos contenidos en la simulación.

TABLA 3						
PROBABILIDAD DEL FLASHOVER						
CASO	RTT [ω]	T _F [μ seg]	I _c [kA]	Z	P (I > I _c)	P [%]
1	50	1	49.07	0.84	0.2611	26.11
2	50	2	42.99	0.42	0.3372	33.72
3	20	1	73.12	1.30	0.0968	9.68
4	20	2	74.38	1.33	0.0918	9.18
5	100	1	35.08	0.09	0.4641	46.41
6	100	2	28.46	-0.26	0.6026	60.26

El número de descargas atmosféricas sobre una línea de transmisión, en especial, sobre el hilo de guarda se obtuvo de la siguiente manera:

Tomando la densidad de rayos a tierra del mapa que proporcionó COMSION FEDERAL DE ELECTRICIDAD (CFE), Ahora el siguiente paso es el cálculo del área de atracción de la torre :

$$RA = 14.4 \left(30.48 \right)^{0.44} = 64.76 \text{ m}$$

$$A = L \left(2 (64.76) + 10.36 \right) = L 139.887 \text{ m}^2$$

Estimando el número de descargas en el hilo de guarda, por unidad de longitud y tomando una densidad de 4 descargas por km² al año, tenemos:

$$\frac{N(G)}{L} = 4 \times (0.139887) \cdot 0.56 \text{ [Descarga/km/año]}$$

El número de salidas se estima, igual que en el capítulo 3, con un 60% de probabilidad en la torre y 40% en el claro de esta.

$$LFOR = \frac{N(G)}{L} (0.6) \text{ (P de la tabla 3)}$$

$$LFOR = (0.56) (0.6) (0.2611) = 8.77 \text{ Salidas cada 100 km al año}$$

En la siguiente tabla se encuentran los resultados ya procesados.

TABLA 4			
NUMERO DE SALIDAS DE LA LINEA DE 230 kV			
C A S O	RTT (μ)	TF (μ seg)	NUMERO DE SALIDAS (100 Km/ año)
1	50	1	9
2	50	2	12
3	20	1	3
4	20	2	3
5	100	1	16
6	100	2	20

Como se aprecia en la tabla anterior, el índice de salidas es inferior, si la resistencia al pie de la torre es muy baja o el tiempo del frente de onda de descarga es menor. Sin embargo, no es tan evidente, la acción del frente de onda para resistencias al pie de la torre muy bajas, caso contrario para resistencias altas.

TABLA B. LA DISTRIBUCION NORMAL ESTANDAR

(I) Area bajo la curva normal a la derecha de z

Ejemplos: La probabilidad de una sola de obtener una z mayor o igual que 2.18 es 0.0166.
 Esta es también la probabilidad de una sola de obtener una z menor o igual que -2.18.
 Para una probabilidad de dos colas, duplicar el valor tabulado. Por tanto, la probabilidad de obtener una z mayor o igual que 2.18 o menor o igual que -2.18 es $2 \times 0.0166 = 0.0332$.

z	.00	.01	.02	.03	.04	.05	.06	.07	.08	.09
.0	.5000	.4960	.4920	.4880	.4840	.4801	.4761	.4721	.4681	.4641
.1	.4602	.4562	.4522	.4483	.4443	.4404	.4364	.4325	.4285	.4245
.2	.4207	.4168	.4129	.4090	.4052	.4013	.3974	.3935	.3895	.3857
.3	.3821	.3783	.3745	.3707	.3669	.3632	.3594	.3557	.3520	.3483
.4	.3446	.3409	.3372	.3336	.3300	.3264	.3228	.3192	.3156	.3121
.5	.3085	.3050	.3015	.2981	.2946	.2912	.2877	.2843	.2810	.2776
.6	.2743	.2709	.2676	.2643	.2611	.2579	.2546	.2514	.2483	.2451
.7	.2420	.2389	.2358	.2327	.2296	.2266	.2236	.2206	.2177	.2148
.8	.2119	.2090	.2061	.2033	.2005	.1977	.1949	.1922	.1894	.1867
.9	.1841	.1814	.1788	.1762	.1736	.1711	.1685	.1660	.1635	.1611
1.0	.1587	.1562	.1539	.1515	.1492	.1469	.1446	.1423	.1401	.1379
1.1	.1357	.1335	.1314	.1292	.1271	.1251	.1230	.1210	.1190	.1170
1.2	.1151	.1131	.1112	.1093	.1075	.1056	.1038	.1020	.1003	.0985
1.3	.0968	.0951	.0934	.0918	.0901	.0885	.0869	.0853	.0838	.0823
1.4	.0808	.0793	.0778	.0764	.0749	.0735	.0721	.0708	.0694	.0681
1.5	.0668	.0655	.0643	.0630	.0618	.0606	.0594	.0582	.0571	.0559
1.6	.0548	.0537	.0526	.0516	.0505	.0495	.0485	.0475	.0465	.0455
1.7	.0446	.0436	.0427	.0418	.0409	.0401	.0392	.0384	.0375	.0367
1.8	.0359	.0351	.0344	.0336	.0329	.0322	.0314	.0307	.0301	.0294
1.9	.0287	.0281	.0274	.0268	.0262	.0256	.0250	.0244	.0239	.0233
2.0	.0228	.0222	.0217	.0212	.0207	.0202	.0197	.0192	.0188	.0183
2.1	.0179	.0174	.0170	.0166	.0162	.0158	.0154	.0150	.0146	.0143
2.2	.0139	.0136	.0132	.0129	.0125	.0122	.0119	.0116	.0113	.0110
2.3	.0107	.0104	.0102	.0099	.0096	.0094	.0091	.0089	.0087	.0084
2.4	.0082	.0080	.0078	.0075	.0073	.0071	.0069	.0068	.0066	.0064
2.5	.0062	.0060	.0059	.0057	.0055	.0054	.0052	.0051	.0049	.0048
2.6	.0047	.0045	.0044	.0043	.0041	.0040	.0039	.0038	.0037	.0036
2.7	.0035	.0034	.0033	.0032	.0031	.0030	.0029	.0028	.0027	.0026
2.8	.0025	.0025	.0024	.0023	.0023	.0022	.0021	.0021	.0020	.0019
2.9	.0019	.0018	.0018	.0017	.0016	.0016	.0015	.0015	.0014	.0014
3.0	.0013	.0013	.0013	.0012	.0012	.0011	.0011	.0011	.0010	.0010
3.1	.0009	.0009	.0009	.0008	.0008	.0008	.0008	.0008	.0007	.0007
3.2	.0007	.0007	.0007	.0006	.0006	.0006	.0006	.0005	.0005	.0005
3.3	.0005	.0005	.0005	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0004	.0003
3.4	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0003	.0002

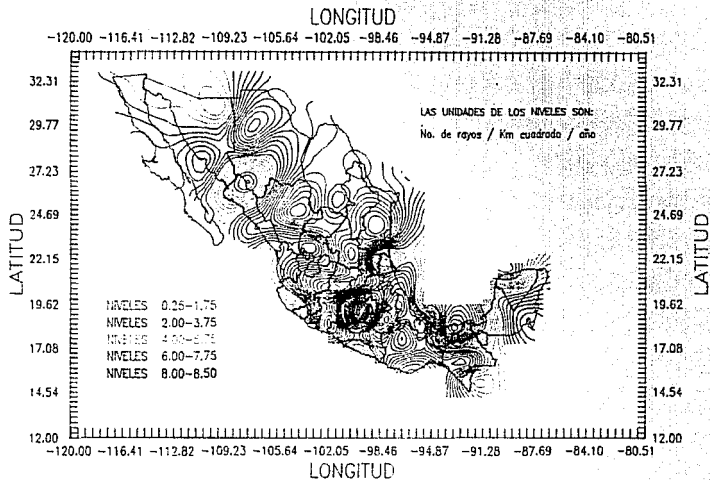
(II) Valores críticos de z

Ejemplos: Para una prueba de dos colas con $\alpha = 0.05$, rechazar la hipótesis nula si z es mayor o igual que 1.96 o si z es menor o igual que -1.96.

Para una prueba de una cola con $\alpha = 0.05$, si se necesita una prueba de cola superior, rechazar la hipótesis nula si z es mayor o igual que 1.645. Si se necesita una prueba de cola inferior, rechazarla si z es menor o igual que -1.645.

z	Nivel de significación de una cola, α			
	0.1000	0.0500	0.0250	0.0125
z	Nivel de significación de dos colas, α			
	0.2000	0.1000	0.0500	0.0250
1.282	1.445	1.640	2.241	2.324
2.576	2.807	3.890	3.291	3.719

MAPA DE DENSIDAD DE RAYOS A TIERRA 1991



BIBLIOGRAFIA

- [11] ABRAMOWITZ AND STEGUN, Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables.
- [12] ANDERSON J.G. Transmission Line reference book, Capítulo XII.
- [13] BEWLEY L.V., Traveling Waves on Transmission Systems, Ed. Dover 1967.
- [14] BYERS HORACE AND ROSCOE R., Thunderstorm structure and circulation.
- [15] BYERS HORACE, Electric fields inside the thunderstorm.
- [17] CHALMERS, J. ALAN, Atmospheric Electricity, Vol. XI.
- [18] ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE, Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Primer, 1985.
- [19] ESPINOSA Y LARA ROBERTO, Sistemas de Distribución, Ed. Limusa, México 1990
- [101] HARPER ENRIQUEZ GILBERTO, Estudio de sobretensiones transitorias en sistemas eléctricos y coordinación de aislamiento. Vol II. México.
- [111] HELLMAN HAL, Light and Electricity in the atmosphere.
- [121] INGENIERIA HIDRAULICA EN MEXICO, Revista, Vol. XXIV, 1970.
- [131] KOLOKOLOV V.P., Studies in atmospheric electricity, Ed. Gidrometeoizdat, Leningrad 1972.
- [141] LUCA CARLOS, Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica.

- [15] Manual de Diseño y Normalización de líneas de Transmisión,
Cía de Luz y Fuerza del Centro, S. A., 1980
- [16] Manual de Obras Civiles de C.F.E. Estructuras para
Transmisión de Energía Eléctrica, Sección C, Métodos de
análisis y Diseño.
- [17] SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL, Rayos, Fuerza Aérea
Argentina, Comando de regiones aéreas, boletín informativo
número 7.
- [18] VIQUEIRA LANDA JACINTO, Redes Eléctricas, Vol. I y II,
Ed. Representaciones y Servicios en Ingeniería, México.
- [19] WESTINGHOUSE ELECTRICAL CORP. Electrical Transmission
and Distribution Reference book, 1950.