

CRITERIOS PARA PROTECCION DE SUBESTACIONES
CONTRA SOBREVOLTAJES

Sigcha, Carlos
Ingeniero Eléctrico
Incecl - Subestaciones

RESUMEN

Este trabajo proporciona lineamientos y criterios que debe seguir el ingeniero de subestaciones, con el objeto de evaluar las características de las ondas de entrada a una subestación provenientes de líneas de transmisión conectadas a la misma, así como las características de pararrayos, los niveles de aislamiento de equipos, tanto con métodos-determinísticos como probabilísticos.

También se considera la aplicación específica en Subestaciones del Sistema Nacional de Transmisión de INCECL, así como una discusión de las tendencias que se considerarán en la mejora de los diseños.

INTRODUCCION

En la protección del aislamiento en subestaciones aisladas en aire es necesario estimar.

- 1.- La onda máxima de voltaje que pueda ocurrir en una subestación con o sin dispositivos de protección.
- 2.- El margen entre el voltaje máximo que pueda ocurrir y el nivel permitido por los dispositivos de protección.
- 3.- El número probable de salidas que pueden suceder en una subestación como resultado de ondas producidas por descargas atmosféricas y por maniobras.

Una vez que se ha estimado el voltaje de impulso en una subestación proveniente de una línea de transmisión, se analizará la coordinación del aislamiento, es decir, la selección o especificación de rigidez dieléctrica de equipos, distancias fase a tierra y fase-fase, la distancia de fuga de la porcelana externa y la capacidad, número y localización de pararrayos.

El procedimiento usual de un estudio de coordinación del aislamiento es el siguiente:

- 1.- Selección de la capacidad del pararrayos.
- 2.- Determinación de las distancias de fuga del aislamiento de porcelana, en base a las condiciones de contaminación y la conversión a BIL y BSL.
- 3.- Localización del pararrayos junto al transformador y determinación del BIL y del BSL del transformador y de sus bushings usando las características de protección del pararrayos.
- 4.- Determinación del BIL del resto de equipos, y las distancias requeridas debido a descargas-atmosféricas con un solo pararrayos en el transformador. Si los BIL y distancias son excesivas, adición de pararrayos y determinación nuevamente del BIL y de las distancias.
- 5.- Determinación del BIL del resto de equipos, y las distancias fase a tierra y entre fases requeridas por maniobras.

CRITERIOS PARA PROTECCION DE SUBESTACIONES

CONTRA SOBREVOLTAJES

Para la coordinación del aislamiento en subestaciones deben considerarse tanto los sobrevoltajes de maniobra como los debidos a descargas atmosféricas.

En el primer caso, pueden emplearse 2 métodos, de determinístico y probabilístico. Este último consiste en ajustar el SFOR (frecuencia de rayos que terminan en un conductor de fase y resulta en un con-torneo del aislamiento de la estructura) a 0.9 del de la línea.

Para la protección contra descargas atmosféricas, se usa una aproximación probabilística basada en el tiempo medio entre fallas (el inverso de este parámetro es el período de retorno).

Ya que la gran mayoría de ondas se transmiten a la subestación por la línea, el diseñador debe conocer la metodología de diseño de la línea, de modo de poder calcular las ondas que llegan a la subestación.

Los sobrevoltajes de maniobra que aparecen en el equipo de la subestación se definen por un estudio en el TNA, por la distribución de sobrevoltajes de maniobra en el extremo de la línea. Sin embargo, las ondas por descargas atmosféricas, llamadas "ondas entrantes", necesitan un estudio más detallado.

1. La onda de entrada

El voltaje de la onda de entrada, su magnitud y forma, es función de la distancia entre la subestación y el punto de la descarga del rayo o punto de con-torneo (zona vulnerable), las características de resistencia del aislamiento de la línea, el diámetro del conductor, la resistividad de la tierra, si el evento inicial es un "contorneo" o una falla del apantallamiento, la magnitud de la corriente del rayo y el índice de refracción de la Subestación. En consecuencia, la magnitud y forma de la onda de entrada deben tratarse en términos probabilísticos.

La Longitud de la zona vulnerable es una función no solo de la atenuación y distorsión, sino también del índice de refracción de la Subestación.

A medida que la onda viaja a lo largo de una línea, sufre atenuación y distorsión debido a corona, efecto skin, resistividad de la tierra y acoplamiento, y cuando alcanza la subestación, su forma puede ser cambiada por reflexión.

Primero consideremos los voltajes que se producen en el conductor como una falla del apantallamiento o como resultado de un "contorneo".

1.1 Voltaje sobre el conductor en el punto de con-torneo

El voltaje causado por descargas atmosféricas puede aparecer sobre un conductor de fase debido a 3 razones: 1. falla del apantallamiento, 2. "contorneo" y 3. ondas inducidas desde un punto cercano en el que se produjo una descarga. La última no es de importancia en líneas de alto voltaje, sino solo en distribución.

1.2 Falla del apantallamiento

Las líneas se diseñan de modo que la probabilidad - contorneo por falla del apantallamiento sea casi ce ro. En consecuencia, la máxima onda de voltaje es igual al CFO (polaridad negativa) de esta línea. El número de fallas del apantallamiento puede calcular se usando el modelo geométrico de Wagner. En forma general, el número de fallas de apantallamiento está entre 0 y 0.6/100 km/año. (1)

La corriente crítica I_c , aquella sobre la cual ocurrirá el contorneo es $I_c = \frac{2 \times CFO}{Z_c}$ (1) Donde Z_c es la impedancia de onda del conductor.

Según la teoría del modelo geométrico se puede obtener las siguientes ecuaciones para el número de fallas de apantallamiento.

$$N(SF) = 2 N_g L \int_0^{I_m} D c f(I) dI \quad (2)$$

Donde N_g es la densidad de descargas a tierra, I_m es la máxima corriente, $f(I)$ es la densidad de probabilidad de la corriente de descarga, L es longitud de la línea y Dc está dada en la Figura 1.

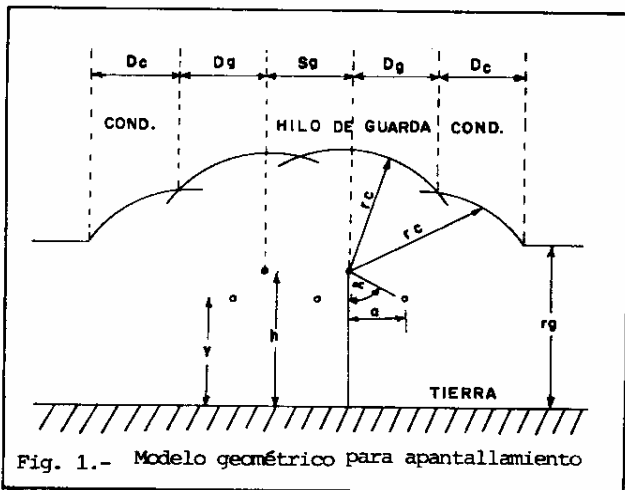


Fig. 1.- Modelo geométrico para apantallamiento

Y para $N(SFFO)$, el número de contorneos por falla del apantallamiento.

$$N(SFFO) = 2 N_g L \int_{I_c}^{I_m} Dc f(I) dI \quad (3)$$

En la figura 2 se puede visualizar la gráfica de $N(SF)$ en función de I_c .

Podemos calcular también la función de distribución acumulativa de corrientes que causan fallas del apantallamiento, la cual está grafizada en la Fig. 3 La forma de la distribución depende principalmente de I_c , que corresponde a una distribución de valor extremo positivo.

Estas ondas de corriente crean una onda de voltaje y una gradiente que vienen dadas por las siguientes expresiones

$$E = I \cdot \frac{Z_c}{z} \quad (4)$$

$$Sv = SI \cdot \frac{Z_c}{z} \quad (5)$$

donde I es la magnitud de la corriente del rayo, SI es la gradiente de la corriente y Sv es la gradiente de la onda de voltaje.

Usualmente, en el rango de corrientes que causan

fallas del aislamiento, MS/I puede ser tratada como una constante independiente de I .

Si I_c varía entre 5 y 10 kA puede usarse un valor - constante de 17 kA/usec. (1). Hay que destacar con respecto a los parámetros de las descargas atmosféricas, que el valor medio de la cola es de alrededor de 92 useg. (1)

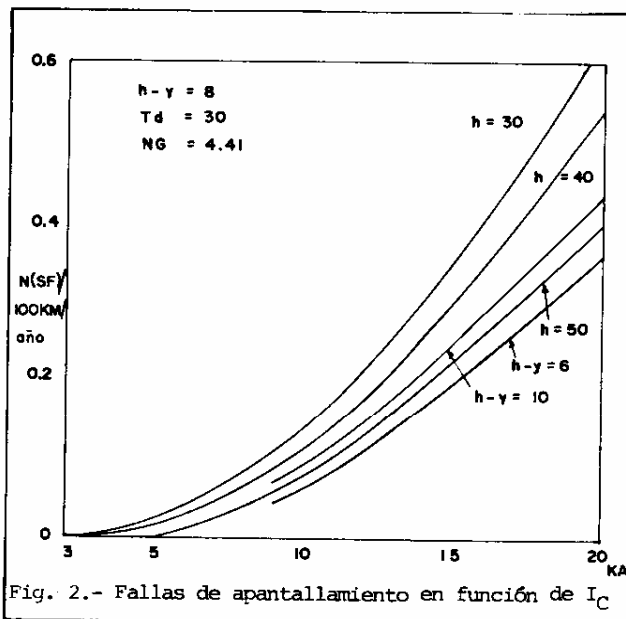


Fig. 2.- Fallas de apantallamiento en función de I_c

1.3 Contorneo

Un "Contorneo" es la disrupción del aislamiento de la línea o de una torre que puede ocurrir como producto de una descarga atmosférica que termina en una torre o en los hilos de guarda.

En la figura 4 ilustra el fenómeno. En la Figura 5 se muestra el proceso cuando una descarga, con un frente que se incrementa linealmente, termina en una torre. Un voltaje e_{TT} aparece sobre la torre y aplica un voltaje $e_c = C e_{TT}$ en el conductor, donde C es el factor de acoplamiento.

Entonces se puede expresar la siguiente relación:

$$e_{IA} = e_{TA} - e_c = e_{TA} - C e_{TT} \text{ o } e_{TT} (1-c) \quad (6)$$

donde e_{TA} es el voltaje sobre la torre, opuesto al conductor de fase.

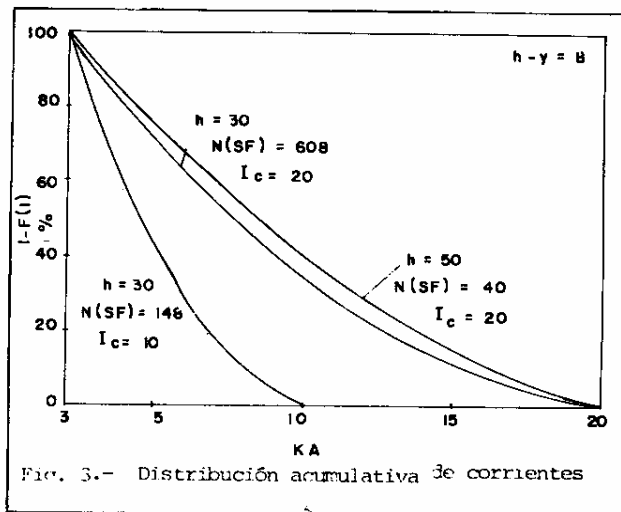


Fig. 3.- Distribución acumulativa de corrientes

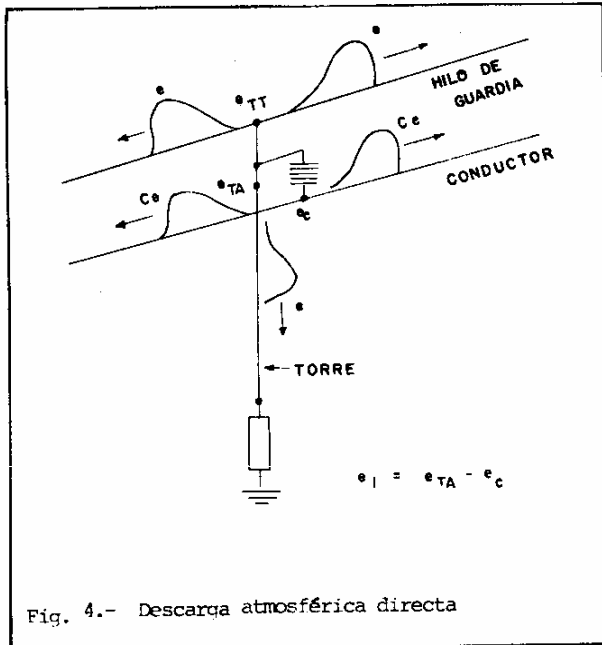


Fig. 4.- Descarga atmosférica directa

Si asumimos que el voltaje a través del aislamiento alcanza el valor crítico para producir contorneo, - conservativamente se supone que el tiempo para contorneo ocurre en la cresta de voltaje. El voltaje a frecuencia industrial $K_{PF} e_{PF}$ es de polaridad opuesta a la onda de voltaje. Para considerar su efecto en la onda de entrada es necesario incluir el efecto de la constante K_{PF} , la cual depende de la configuración de las fases en la torre. e_{PF} es el voltaje máximo línea a neutro.

El voltaje resultante sobre el conductor se ilustra en la Figura 5 (B). El voltaje alcanza un máximo de aproximadamente e_{TT} que se compone de una onda $e_{s'} = e_{TT} + K_{PF} e_{PF}$

El voltaje pico aplicado al aislamiento sería:

$$V_{IA} = V_{TA} - C A V_{TT}$$

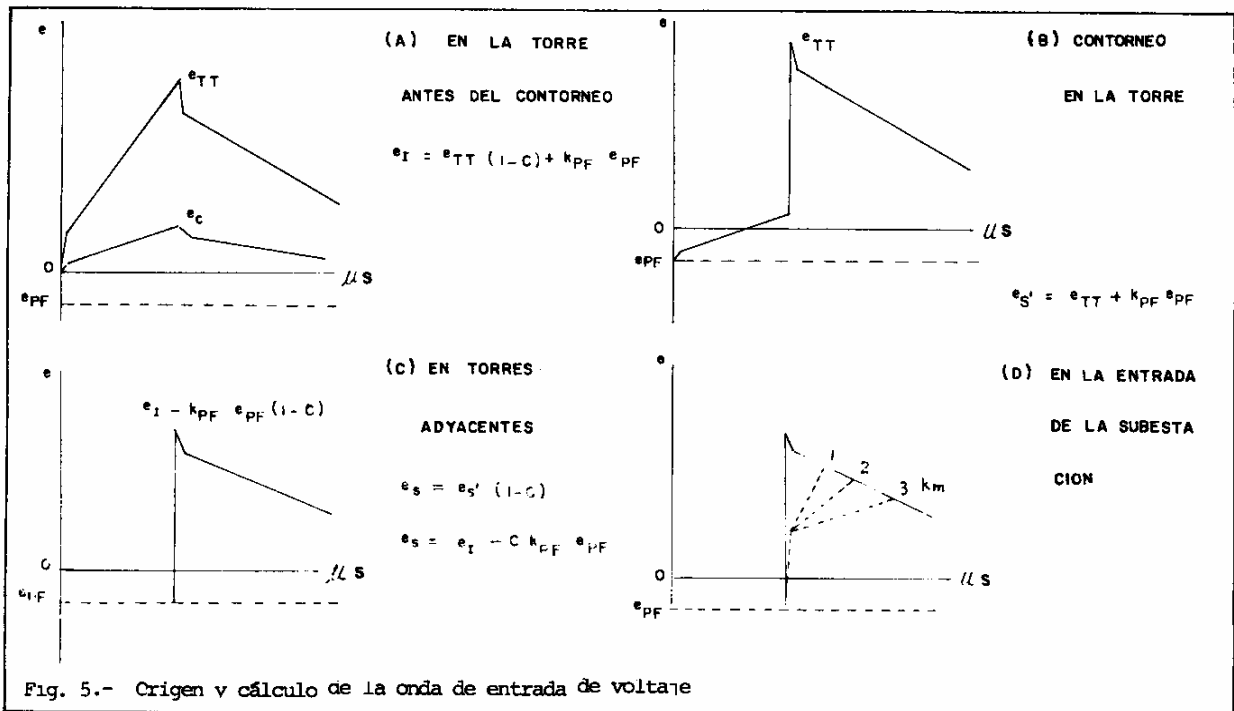


Fig. 5.- Origen y cálculo de la onda de entrada de voltaje

1.4 Voltaje a la entrada de la Subestación

Las ondas que viajan hacia la S/E son atenuadas y - y distorsionadas por 3 fenómenos.

1.- Consideremos el caso de un contorneo. Antes del contorneo el voltaje sobre el conductor es simplemente el voltaje acoplado (E) menos K_{PF} . Luego del contorneo, el voltaje en el conductor y el hilo de guardia son prácticamente iguales. Si asumimos que en la próxima torre el hilo de guardia es puesto "perfectamente a tierra", entonces el voltaje sobre el hilo de guardia debe ser 0. Esto implica que el voltaje acoplado desaparece y que la onda de voltaje pico es decrecida por el factor (1-c). Esto es, la onda de voltaje sobre el conductor es $(E_{TT} + K_{PF} e_{PF})$, la onda de voltaje transmitida es $(1-c) (E_{TT} + K_{PF} e_{PF})$, y el voltaje total es $(1-c) (E_{TT} + K_{PF} e_{PF})$.

El factor de acoplamiento c es $\frac{ZM}{Zg}$, donde ZM es impedancia mutua de onda entre el hilo de guardia y el conductor.

La Figura 5 (C) ilustra la reducción en magnitud - causada por la reducción del voltaje en el hilo de guardia a 0 (2). La onda de voltaje es reducida a $e_{s'} = e_{s'} (1-c)$. Además, el voltaje acoplado desaparece. La onda resultante de voltaje es

$$e_s = e_I - C K_{PF} e_{PF} \quad (6)$$

donde e_I es el voltaje crítico de contorneo para una onda de voltaje no estándar que aparece a través del aislamiento de la línea, CFO NS, es decir,

$$e_s = CFO NS - C K_{PF} e_{PF} \quad (7)$$

o también

$$e_s = e_{TT} (1-c) + K_{PF} e_{PF} - C K_{PF} e_{PF} \quad (8)$$

Para fallas del apantallamiento, asumimos que la falla del apantallamiento ocurre "cerca" de una torre antes que en la torre, lo cual resulta en un voltaje e_{TT} sobre el conductor y $C e_{TT}$ sobre el hilo de guardia. En este caso, $C = \frac{Zm}{Zc}$. A medida que es-

tas ondas pasan el punto de discontinuidad, el voltaje en el hilo de guardia cae a 0 y el voltaje en el conductor decrece a $(1 - \frac{Zm2}{Zc \cdot Zg}) e^{-\frac{z}{TT}}$. Una buena aproximación es $(1-c2) e^{-\frac{z}{TT}}$

1.5 Atenuación y distorsión

La atenuación y distorsión debidas al efecto corona fueron medidas en el Tidd H.V. Project, y ya que no existen datos adicionales, se ha considerado, que el frente de onda es retrasado $1\mu s$ por km de viaje.

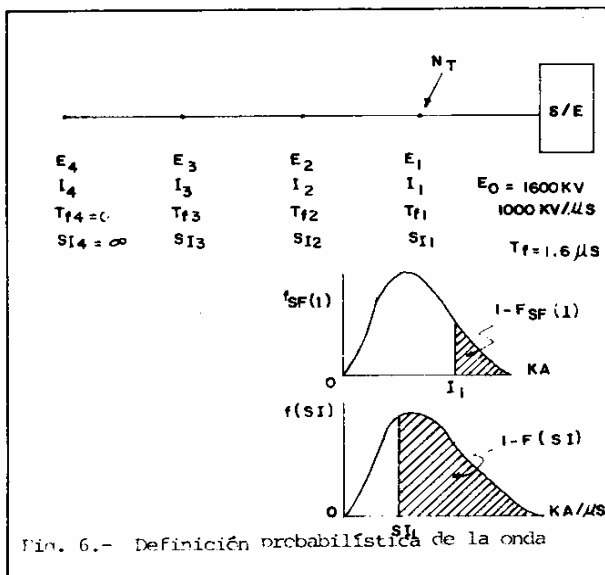
Ya que la onda debida a un "contorneo" tiene una ω la corta, la atenuación es considerable. Sin embargo, para la onda debida a falla del apantallamiento con colas largas, la atenuación es pequeña.

Hay que anotar, a su vez, el efecto de la resistividad del terreno en la atenuación producida en ondas por fallas en el apantallamiento, cuya magnitud es del orden de 2-3% por km.

1.6 Ondas de entrada en fallas de apantallamiento de la Subestación

Describamos en términos probabilísticos la onda de voltaje de entrada en la llegada a una subestación con el cálculo del número de ondas que llegan a la subestación mediante los siguientes pasos:

- 1.- De la figura 2 obtenemos N (SF) en fallas/100 km/año, o también en fallas/año, para una corriente Io dada. Considerar que la curva es dibujada para $Td = 30$. Para otros valores, deberá corregirla.
- 2.- Distribución de voltajes y corrientes en el punto de descarga con la formula (4) $Zc = \frac{2 \times E}{I}$
- 3.- Distribución de la pendiente de la onda en el punto de descarga.
 $f(SI) = \ell n N (M = 17 \text{ kA}/\mu\text{seg}, B = 0,555)$
- 4.- Para considerar la atenuación y distorsión se asumirá un retardo de $1\mu s/\text{km}$ para el frente y una atenuación de 2%/km
- 5.- Se asume que todas las colas son de $92\mu\text{seg}$.
Ahora nos ayudaremos del esquema de la Figura 6.



6.- Se calcula el tiempo de frente con la relación $Tf = E_0/Sv$, estos datos son los iniciales, en el punto de entrada de la Subestación.

7.- El voltaje E_1 en la primera torre debe ser $E_1 = E_0(1+0.02 \times \text{vano})$

$Tf1$ será $Tfo - \text{vano} (\mu\text{seg})$ con el vano expresado en km.

La corriente de descarga tendrá una cresta de $E_1 = \frac{E_1}{Zc/2}$ y una gradiente $S1 = I1/Tf1$.

8.- De la distribución de corrientes, hay que encontrar la probabilidad de que $I > I1$, o sea, $1 - F_{SF}(I)$

Hemos asumido que es una distribución de valor extremo. Entonces:

$$\mu = u + \gamma \cdot \beta$$

$$\gamma = 0.57722$$

$$\beta = \frac{\mu - u}{\gamma} = \frac{5.5 - 3.5}{0.57722} = 3.46 \quad (\text{de la figura 3})$$

Es necesario hallar la variable reducida y

$$Y = \frac{X - u}{\beta} = \frac{I1 - u}{\beta}$$

con la cual se calculará la probabilidad requerida.

9.- De la distribución logarítmica-normal de SI, hay que calcular la probabilidad requerida de que $SI > S1$ es decir $[1 - F(SI)]$. Para ello, calculamos la variable reducida $Z = \frac{\ln SI - \ln M}{\beta}$

Con el valor de Z en las Tablas estandar de la función de distribución acumulativa normal obtendremos la probabilidad buscada.

10.- En conclusión, el número de ondas con una magnitud igual o mayor que E_0 y velocidad de crecimiento mayor o igual a S desde la torre número 1 es:

NT (número de fallas de apantallamiento por año / torre)

$$N \left[1 - F_{SF}(I) \right] \left[1 - F(SI) \right] \quad (9)$$

$$NT = \sum_{i=1}^n Ni \quad (10)$$

siendo n la torre que corresponde a la torre en que $Tf = 0$. La inversa de NT es el MIBF en años, tiempo medio entre fallas, o período de retorno.

Como consecuencia de este tipo de análisis, es posible afirmar que, para un valor dado de onda de voltaje cresta, a medida que aumenta la velocidad de crecimiento de la onda, aumenta el número de fallas de apantallamiento.

También se puede decir que, para un valor dado de onda de voltaje cresta, para un valor mayor de la pendiente de voltaje, mayor es el período de retorno.

Hay que destacar que el máximo valor de las ondas causadas por fallas de apantallamiento es $10 \text{ kA} \times \frac{Zc \cdot \Omega}{2}$, suponiendo que la Ic es 10 kA.

1.7 Voltajes de entrada ocasionados por contorneo

De acuerdo a lo establecido en una sección precedente, el voltaje cresta sobre un conductor en el punto

de descarga es aplicado a través del aislamiento en la torre adyacente. Si estos voltajes exceden el CFONS de esta onda de voltaje no estandar, ocurrirá un contorno del aislamiento de la línea.

El voltaje cresta por "contorneo" puede obtenerse para la corriente crítica. A medida que aumenta la corriente, también aumenta este voltaje. Sin embargo, se puede demostrar que llega un valor de corriente para el cual, la onda de voltaje disminuye. Es decir, hay un rango de corriente para el cual se desarrollarán voltajes significativos en la subestación, las cuales se denominan corriente crítica y corriente máxima.

Luego es necesario calcular el período de retorno para varias magnitudes y gradientes de voltaje. Esto puede calcularse de una manera similar que para fallas por apantallamiento, sin embargo, hay que anotar que el frente de onda en la subestación no es una función de la corriente de descarga o de la gradiente de corriente, ya que, en el punto de descarga, el frente para todos los casos es esencialmente 0. Antes, procedamos a calcular el máximo y mínimo voltaje que ocurrirá en la subestación como resultado de contorneos en varias torres desde la subestación, en función de las corrientes mínima y máxima para la cual se desarrollarán voltajes significativos.

Como producto de análisis de varios investigadores, se ha logrado graficar la forma de la curva de la onda de descarga a torres para diferentes voltajes, de las cuales se desprende que la cola de estas curvas es de alrededor de $7.6 \mu\text{seg}$ (1). Usando esta cola, la ecuación de voltaje cresta, para cualquier torre puede calcularse con la ecuación:

$$e = E - t/11 \quad (1) \quad (11)$$

donde E es el máximo voltaje que se presenta en la primera torre desde la subestación.

También puede calcularse la gradiente en $\text{kV}/\mu\text{seg}$. Los voltajes acoplados calculados y las gradientes pueden graficarse en la Figura 7 para 1 a 10 torres desde la Subestación.

Utilizando esta figura pueden obtenerse el número de ondas que exceden valores específicos de voltaje cresta y gradiente.

De la figura 7 puede observarse que todas las ondas correspondientes a las torres 1, 2 y 3 cumplen con estos requerimientos, pero que solo aquellas ondas que exceden 1600 kV contribuyen de la torre 4.

Para el análisis de la contribución desde la torre 4 es necesario conocer primero los voltajes producidos por contorneo para las corrientes máxima y crítica en esta torre. Entonces la corriente de descarga necesaria para producir un voltaje de entrada de por ejemplo 1600 kV es:

$$I_N = \frac{1600 - E I_c}{I_m - E I_c} (I_m - I_c) + I_c$$

Previamente, se deberá calcular la probabilidad de que la corriente sea superior a la corriente crítica y a la corriente máxima, dado que conocemos la densidad de probabilidad de la corriente de descarga, con la expresión

$$P = \int_{I_c}^{\infty} f(I) \cdot dI \quad (12)$$

De esta probabilidad y conociendo $N(G)$, número de descargas en el hilo de guardia/100 km/año y asumiendo que 60% de las ondas terminan en las torres, (1) obtendremos el número de ondas/100 km/año que

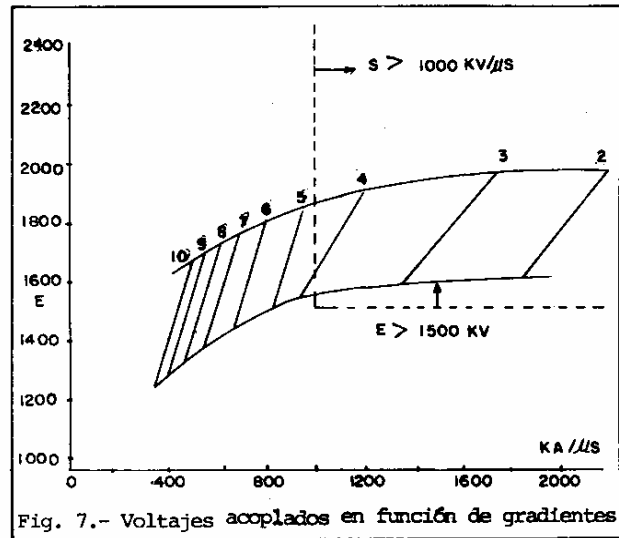


Fig. 7.- Voltajes acoplados en función de gradientes

exceden los voltajes producidos :

$$N_{T1} = P \times N (G) \times 0.6 \quad (13)$$

$$o \quad N_{T1} = \frac{P \times N (G) \times 0.6 \times D}{100} \quad (14)$$

en ondas/torre/año, donde D es la longitud del vano en km. Conocido el número de ondas producidas por las corrientes máxima y crítica, la diferencia entre ambas será la efectiva frecuencia de ondas N_{T1}

Luego hay que calcular la probabilidad de que.

$$P = [I_m > I > I_N]$$

Por lo tanto el número de ondas será:

$$N_{T2} = P \times N (G) \times \frac{0.6 \times \text{vano} (km)}{100} \quad (15)$$

en ondas/torre/año

En consecuencia, el número total de ondas será igual en este caso a $N_T = 3N_{T1} + N_{T2}$

y $1/N_T =$ período de retorno.

Similares tipos de cálculos conducen a las curvas de la Fig. 8.

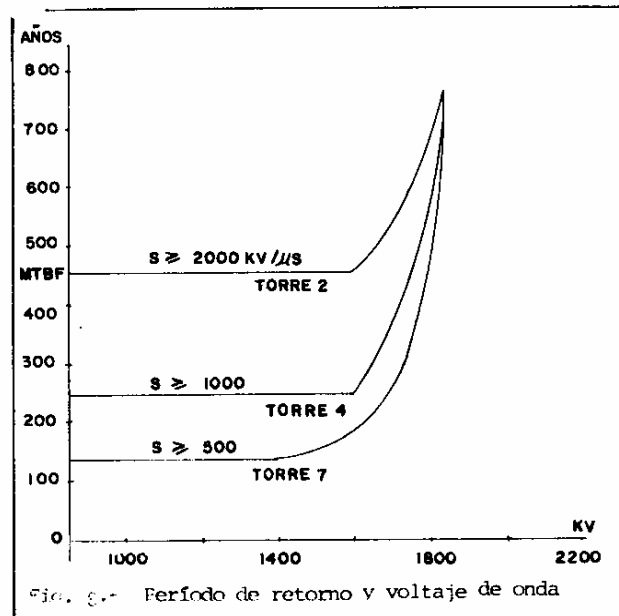


Fig. 8.- Período de retorno v voltaje de onda

El número de torres en estas curvas es la última torre que sustancialmente contribuye al MITBF.

Ahora asumamos como criterio de diseño un valor específico de período de retorno, por ejemplo 450 años, si trazamos una línea horizontal en la Fig. 8 obtenemos valores de gradiente y voltaje cresta, los cuales son solo expresados entre 1600 y 1800 kV para gradientes que varían de 500 a 2000 kV/ μ seg. Por lo tanto, el único valor límite que podría usarse para el citado tiempo entre fallas es 2000 kV/ μ seg y 1600 kV.

Veamos ahora un método aproximado para obtener este resultado. La relación entre las corrientes máxima y mínima puede tomar un valor promedio de 1.3. Basados en esta premisa, asumimos que el voltaje máximo de onda es 1.2 x CFO (1).

Este es el voltaje que aparecería en la entrada de la subestación debido a un "contorneo" en la torre 1. Nuevamente asumamos que la atenuación es de 1 μ seg/km y la onda tiene una cola de 7.6 μ seg.

Si partimos de la idea de que la onda de voltaje en la subestación proveniente de la primera torre es 1.2 x CFO, se puede calcular la magnitud del voltaje, la gradiente, el número de ondas/año y el período de retorno para esta torre y el resto de torres de la línea, valores que son muy cercanos a los obtenidos con el método exacto.

1.8 Comparación entre "contorneo" y falla del apantallamiento

De una comparación de los análisis precedentes se puede concluir que un "contorneo" origina magnitudes y gradientes de voltaje mayores que fallas del apantallamiento.

A medida que decrece el nivel de voltaje, tiende a decrecer el número de fallas del apantallamiento, mientras que el número de "contorneos" tiende a incrementar. En consecuencia, para menores niveles de voltaje, el "contorneo" tendrá un efecto más severo.

1.9 Efecto del número de ondas de entrada

Resumiendo lo tratado en secciones precedentes acerca de las ondas viajeras, podemos puntualizar dos ideas importantes: (1) las ondas de entrada provenientes de "contorneo" son de principal importancia, y que, aquellas provenientes de fallas del apantallamiento pueden desprejiciarse, y (2) la magnitud y forma de la onda de voltaje y el período de retorno, pueden calcularse fácilmente por un método aproximado.

Ahora corresponde especificar el criterio para diseño. Usualmente para subestaciones aisladas en aire, los niveles de aislamiento se basan en una onda la cual será excedida, en término medio, cada 100 a 200 años.

Sin embargo, para subestaciones aisladas en gas (GIS) el criterio usado por la mayoría de investigadores se refiere a un lapso de alrededor de 500 años, el cual se basa en que la consecuencia de falla en una subestación de este tipo es mayor que para una subestación convencional.

Al referirnos a la metodología del método aproximado, digamos que la descarga que terminaba en la torre N° 1 produciría una onda de voltaje igual a 1.2 x CFO y una gradiente de 1.2 x CFO /vano o mayor en la subestación.

Por otra parte, el número de ondas se deberá calcular simplemente con la expresión.

$$N = N_T \times \frac{D}{100} \quad (16)$$

donde N_T es el número de descargas en la torre N° 1 para corrientes entre la crítica y la máxima.

El período de retorno R viene dado entonces por la expresión.

$$R = \frac{100}{N_T D} \quad (17)$$

Similantemente, se puede calcular el número de ondas producidas luego de una descarga en la torre 2 como:

$$N_T^2 = 2N_T \times \frac{D}{100}$$

y desde luego el período de retorno será:

$$R = \frac{100}{2N_T D}$$

Entonces considerando m torres tendremos:

$$R = \frac{100}{m N_T D} \quad (18)$$

Hay que anotar que N_T no es la rata de interrupciones por "contorneo", pero alcanza un valor cercano a este, de ahí que podemos escribir

$$N_T = \frac{N(BF) D}{100}$$

donde N(BF) está expresado en contorneos/100 km/año.

Consideremos por ejemplo que N_T es 0.01/100km/año, una onda desde la quinta torre, para un vano de 400 metros. Entonces m D, la distancia de viaje es 2 km. En este caso el período de retorno es 20 años, o podemos hablar de una onda de 20 años. En definitiva, para este caso, una onda de 20 años es equivalente a una onda de 2 km.

Examinemos ahora el efecto de otras líneas en la subestación. Es evidente que si hay dos líneas entrando a la subestación, ocurrirán el doble de ondas considerando una distancia específica fuera de la subestación. Refiriéndose al ejemplo anterior, el período de retorno para una línea fue de 20 años; para 2 líneas será de 10 años.

En consecuencia la ecuación para el período de retorno tomará la siguiente forma:

$$R = \frac{100}{N(BF) m n D} \quad (19)$$

donde n es el número de líneas

Supongamos que la longitud del vano se reduce a la mitad. Entonces, para la misma frecuencia N(BF) de contorneos, N_T deberá ser la mitad y el período de retorno será el mismo para un valor constante de mD. Como conclusión, el período de retorno es independiente de la longitud del vano.

Con propósitos de ilustración asumamos que $N_T=0.002/100/km/año$, es decir que N(BF) será 0.5/100km/año para un vano de 400 m. En la siguiente tabla anotaremos el período de retorno para diferentes combinaciones de mD y n.

Consideremos una subestación con 4 líneas. Si todas las líneas se hallan en servicio, 100% del tiempo, entonces usaremos una onda de 0.4 km. Sin embargo, surge la pregunta, qué onda debería usarse en el caso de una subestación con 4 líneas, pero con solo una línea en servicio.

Tabla I

Período de retorno (años) en función de la distancia desde la S/E

m	mD (km)	n = 1	n = 2	n = 3	n = 4
1	0.4	500	250	167	125
2	0.8	250	125	83	63
4	1.6	125	63	42	31
8	3.2	63	31	21	16
16	6.4	31	16	10	8
32	12.8	16	8	5	4

Para analizar esto, necesitamos datos sobre la frecuencia o probabilidad de 1, 2, 3 y 4 líneas en servicio. En consecuencia, la ecuación del período de retorno quedaría así:

$$R = \frac{100}{N(BF) \cdot n \cdot m \cdot pD} \quad (20)$$

donde p es la probabilidad o proporción de tiempo de que n líneas estén en servicio.

Ya que existen pocos datos estadísticos referentes a la proporción de tiempo en que una sola línea se halla en servicio en una subestación con varias líneas, se asume en forma general que, para este tipo de subestaciones, todas las líneas están en servicio virtualmente el 100% del tiempo.

Para el caso de una línea en servicio, se asumirá una onda de 3 a 6 km (3).

Habíamos visto en una sección precedente que el voltaje cresta en torres más alejadas de una subestación depende de la cola de la onda de entrada.

Como consecuencia de la simulación realizada por investigadores en un modelo digital (1), para torres de 500 y 230 kV, se encontró que la región de la onda de voltaje posterior al punto de contorneo responde a la ecuación

$$E = e^{-\frac{t}{0.693 T_T}} \quad (21)$$

donde T_T es el tiempo de la cola de la onda y en general varía entre 8 y 26 μ seg.

Se sugiere usar $T_T = 10 \mu$ seg para un valor de TFR de 20 Ω , esto es, la resistencia al impulso de pie de torre.

A una distancia $L = mD$ de una subestación, el retardo de tiempo en el frente causado por el efecto corona será 1μ seg/km $\times L = L$ (en μ seg). De aquí se puede encontrar la intersección de la cola de la onda con el retardo del frente, lo cual establece la cresta y la gradiente de voltaje, con las expresiones:

$$E = 1.2 \times CFO \cdot e^{-\frac{(L - \text{vano})}{0.693 T_T}} \quad (22)$$

$$SV = E/L \quad (23)$$

Es conveniente expresar R en función de L y N(BF) como:

$$R = \frac{100}{n L N(BF)} \quad (24)$$

y finalmente

$$L = \frac{100}{n R N(BF)} \quad (25)$$

En resumen, el método propuesto consiste en la aplicación de los siguientes pasos: seleccionar un período de retorno, calcular L, calcular E y encontrar SV. Es decir que a una subestación llegará una onda con las características calculadas y con una cola de 10 μ seg. En término medio, estos valores serán excedidos una vez en R años.

Si en la etapa inicial de una subestación se construye una sola línea, la magnitud y gradiente de voltaje se ven disminuidos notablemente.

Puede demostrarse que, independientemente del frente de la corriente de descarga ocurre la misma onda de entrada (1).

2. El Pararrayos

En esencia el pararrayos es un dispositivo usado para reducir los sobrevoltajes por descargas atmosféricas y por maniobra, de modo que puedan especificarse menores BIL'S y BSL'S

Como una primera aproximación, podría pensarse en un "chispero". Sin embargo, la característica tiempo - voltaje de este dispositivo no protege el aislamiento de los equipos para tiempos cortos, y además la descarga del chispero origina una falla y en consecuencia una salida en la subestación.

Es decir, que la característica del pararrayos debería confrontarse con la del aislamiento, y además no debería originar una falla.

Como un paso siguiente en el desarrollo del pararrayos, se colocó una serie de "chisperos" y se añadió una resistencia para cada uno de ellos.

Para conseguir la interrupción de la corriente de falla (en corriente cero), el valor de la resistencia debe ser grande, pero tendremos el problema de que, para una onda de corriente mayor, esta resistencia producirá altos voltajes. Para solucionar este problema, se ideó una resistencia no lineal, la cual tiene alta resistencia en bajas corrientes y baja resistencia en altas corrientes. Esta resistencia se fabricó de silicón carbide (SiC). Para regular la división de voltaje para ondas por descargas atmosféricas se colocó divisores capacitivos a través de cada "chispero".

A más de las características descritas, el pararrayos debe soportar la energía, la corriente y el voltaje aplicadas a el y producidas dentro de él.

Luego de la descarga, el voltaje a través del "chispero" se reduce a 0 y en consecuencia toda la energía resultante de la corriente a través del pararrayos debe ser absorbida por la resistencia no lineal conocida comúnmente como "bloque".

La energía almacenada en una línea de transmisión es $1/2 CE^2$, donde E es la magnitud del sobrevoltaje de maniobra.

A medida que se incrementa el voltaje del sistema, la energía almacenada se incrementa con el cuadrado del voltaje, no así el número de "bloques" que solo se incrementa linealmente con el voltaje del sistema. En consecuencia, la energía que debe ser almacenada y disipada por un bloque se incrementa directamente con el voltaje.

Para evitar que toda la energía se disipe a través del "bloque", es decir para que parte de la energía permanezca en la línea, se ideó el "chispero activo", en base a las técnicas de interrupción del arco usadas en disyuntores.

Luego de la descarga, se produce un campo que fuerza al arco hacia el exterior, de modo que este se elonga y se enfría, produciendo un voltaje contrario, el cual limita la corriente y energía a través del pararrayos.

Una mejora posterior en los pararrayos consistió en la introducción del "chispero de control", que tiene la ventaja de decrecer la variación del voltaje de encendido y permitir voltajes de encendido menores, sobre todo en tiempo cortos.

En la actualidad existe un nuevo material del "bloque", esto es, ZnO, el cual tiene una característica extremadamente no lineal que permite el flujo de solo una pequeña corriente cuando el voltaje normal de 60 Hz es aplicado al pararrayos. Cuando aparecen sobrevoltajes más altos el pararrayos lleva una corriente más grande y logra reducir el voltaje.

2.1 Selección de Características de Pararrayos

El voltaje nominal del pararrayos es el máximo voltaje de estado estacionario a través de sus terminales, en el cual el pararrayos operará satisfactoriamente mediante la extinción de los arcos y con la restauración del dispositivo a sus condiciones de aislamiento normales.

El sobrevoltaje temporal (TOV) a través de los terminales del pararrayos es causado por fallas, donde el voltaje en la fase sana se incrementa aún más. Para sistemas con el neutro puesto a tierra, pueden usarse las curvas de la Figura 9 para determinar el "coeficiente de puesta a tierra". Un coeficiente de 80% significa que el voltaje sobre la fase sana durante una falla incrementará a 80% del voltaje línea a línea. En consecuencia, el voltaje nominal del pararrayos debe ser igual o mayor que este voltaje.

Para sobrevoltajes temporales sostenidos, la capacidad del pararrayos debería ser igual o mayor que el voltaje sostenido (en R.M.S), lo cual asume que alguna onda causará la operación del aparato. Si se asume que no ocurre esto, entonces deberá especificarse que el pararrayos soportará 1.3 veces su voltaje nominal por 10 seg.

Como límites de aplicación conservativos para pararrayos aplicados en subestaciones donde la fuente primaria es una línea de transmisión, los fabricantes han establecido los siguientes límites que pueden soportar los pararrayos.

- 1.- 1/2 ciclo de 2.0 p.u. y 10 ciclos de 1.3 p.u., 10 ciclos de 1.2 p.u. y 40 ciclos de 1.15 p.u.
- 2.- 2 medios ciclos de 1.6 p.u., 10 ciclos de 1.25 p.u., 10 ciclos de 1.2 p.u. y 40 ciclos de 1.15 p.u.

2.1.1 Características de protección del pararrayos. Las características de protección pueden dividirse en 2 áreas: voltaje de encendido y voltaje de descarga, los cuales pueden visualizarse en la Figura 10.

2.1.1.1 Características de encendido. El voltaje de encendido del pararrayos es una función de la forma de la onda de impulso de voltaje. Los fabricantes consideran 3 tipos de voltaje de encendido.

- 1.- Encendido de frente de onda (FOW). Es el voltaje que se incrementa linealmente con un gradiente de 100 kV/ μ seg por cada 12 kV de la capacidad del pararrayos, hasta 240 kV. So-

bre este valor se especifica una gradiente de 2000 kV/seg.

- 2.- Encendido para onda de 1.2/50. El encendido por impulso de descargas atmosféricas, con una onda de 1.2/50, es la máxima magnitud de un impulso 1.2/50 seg. que puede aparecer a través de los terminales del pararrayos, resultando en un encendido en 3 μ seg o más tarde. Realmente el encendido ocurre en 1.5 seg, o no ocurre. Por lo tanto, esta característica es definida como el máximo impulso de 1-2/50 μ seg que el pararrayos permitirá en sus terminales sin que se produzca encendido.
- 3.- Encendido de impulso por maniobra. Es el máximo voltaje de impulso por maniobra que produce encendido para frentes de onda de 30 a 2000 μ seg.

De los análisis de resultados de pruebas realizadas por diversos fabricantes, se ha reconocido que la curva voltaje de encendido - tiempo por descargas atmosféricas es constante después de 1.0 a 1.2 μ seg. Mediante un análisis de regresión se obtuvo la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{A}{1 - \frac{B}{\sqrt{t}}} \quad \text{Si } t \leq 1 \text{ seg} \quad (26)$$

donde E_{s1} es el voltaje de encendido para $t = 1$ μ seg, A y B son constantes cuyo valor es 0.80 y 0.20 respectivamente.

Considerando que $S = E_s/t$, se obtiene la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{1}{4} \left[8\sqrt{S} + \sqrt{B^2 S + 4A E_{s1}} \right]^2 \quad (27)$$

Para usar esta última ecuación, es necesario primero conocer t, luego E_{s1} , para luego calcular E_s con diferentes valores de S.

- 4.- Encendido a 60 Hz. Para pararrayos con capacidades iguales o superiores a 60 kV, este voltaje debe ser mayor o igual a 1.35 veces la capacidad nominal del pararrayos. Para pararrayos de menor capacidad, debe ser igual a 1.50 p.u. o mayor.

2.1.1.2 Características de descarga

- 1.- Voltaje de descarga al impulso por descargas atmosféricas.

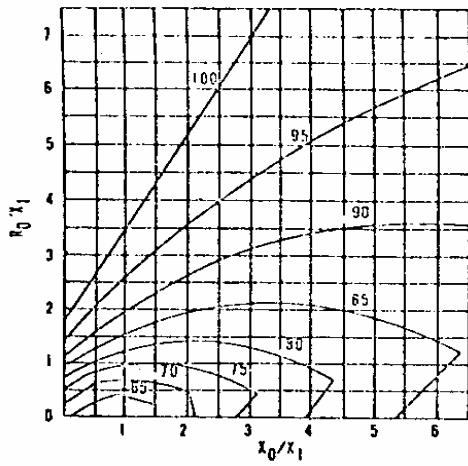
La Norma ANSI C62 establece que los fabricantes deben especificar el voltaje de descarga al impulso por descargas atmosféricas para corrientes de 1.5, 3, 5, 10 y 20 kA usando un impulso de corriente de 8/20 kA.

Los valores máximos del voltaje de descarga y de la corriente de descarga no son coincidentes en el tiempo, ya que el voltaje de descarga no es solo función de la magnitud de corriente sino también de la gradiente de corriente.

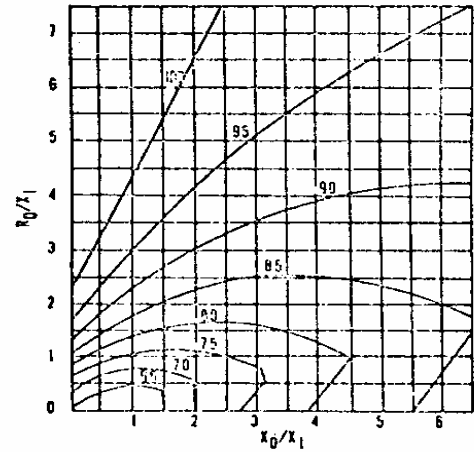
Si se asume que el voltaje de descarga E_d es solo función de la magnitud de corriente I_d , la relación entre estos dos parámetros viene dada, aplicando el método normal, por:

$$E_d = 1.055 E_N I^{1/\alpha} \quad \text{o} \quad 1.321 E_N I^{1/\alpha} \quad (28)$$

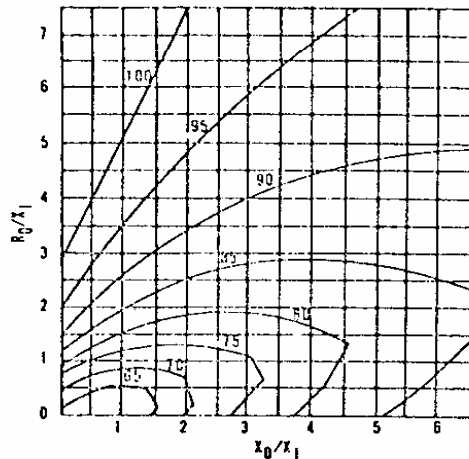
donde E_N es el voltaje máximo nominal del pararrayos. Las fórmulas son válidas para corrientes entre 5 y 40 kA α varía entre 5 y 6 para pararrayos



a) Condiciones de voltaje despreciando resistencias de secuencia positiva y negativa



b) Condiciones de voltaje para R1=R2=0.1X1



c) Condiciones de voltaje para R1=R2=0.2x1

Fig. 9.- Voltaje máximo línea a tierra en el lugar de la falla para un sistema conectado a tierra bajo condiciones de falla

de S_1C y entre 12 a 20 para pararrayos de ZnO, para la primera y segunda ecuación respectivamente.

Si se considera el efecto de S_I y S_V en el encendido, E_d puede modelarse (1) mediante la siguiente ecuación:

$$E_d = k E_N I^{1/\alpha} S_I^{1/\beta} \quad (29)$$

donde k , α y β son constantes y S_I es la gradiente de corriente. Después de pruebas realizadas en algunos laboratorios de investigación, se ha logrado definir estos coeficientes, de modo que la ecuación (29) quedará como:

$$E_d = 1.30 E_N I^{1/4} \sigma 1.46 E_N I^{1/30.9} S_I^{1/18.2} \quad (30)$$

La primera ecuación corresponde a pararrayos de SiC y la segunda a pararrayos de ZnO.

En cualquier caso, I deberá estar comprendida entre 5 y 40 kA.

2.1.2 Cálculo de voltaje y corriente de los pararrayos, Supongamos que una onda viajera entra a una subestación; el voltaje de la onda sea E el gradiente S_V y la impedancia de onda de la línea Z .

La siguiente ecuación expresa las relaciones del circuito equivalente.

$$2E = I_A Z + E_d \quad (31)$$

$$I_A = \frac{2E - E_d}{Z} \quad (32)$$

Para encontrar I_d seguiremos un método iterativo, con la consideración de que

$$S_I = \frac{2S_V}{Z} \quad (33)$$

Este método establece los siguientes pasos:

- 1.- Con los valores de S_V y Z calcular S_I
- 2.- Asumir E_{d1} y calcular I_{A1} con la ecuación (31)
- 3.- Conocidos S_V e I_{A1} , calcular E_{d2} con la ecuación (30)
- 4.- Nuevamente calcular I_{A2}
- 5.- Continuar el proceso hasta que los dos últimos valores de I_A y E_d sean prácticamente iguales.

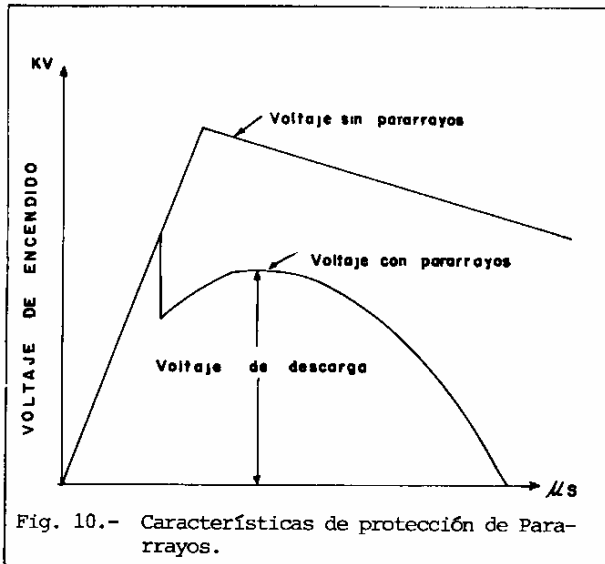


Fig. 10.- Características de protección de Pararrayos.

les. Luego del cálculo de E_d , es necesario hacer una verificación, tanto en el caso del análisis del FOW como en el de ondas de maniobra, de los valores calculados con los valores especificados por los fabricantes.

En algunos casos, varios investigadores no toman en cuenta el efecto de la gradiente de corriente. Para obtener IA y E_d se usará la ecuación:

$$E_d = E_o + IA - R \quad (34)$$

donde E_o y R son constantes que pueden variar entre dos valores de corriente normalizadas, de acuerdo a la Tabla N° II

Tabla N° II

Rango de IA	E_o	R
5 - 10	1.22	0.034
10 - 20	1.35	0.021
20 - 40	1.56	0.0105

La ecuación (33) es entonces resuelta por métodos gráficos según lo explicado por Bewley (5) y grafizado en la Figura 11. Para cualquier I hay cierto E_d y un correspondiente T de la curva de la izquierda, de modo que E_d puede ser dibujado directamente en función de t.

3. Selección de niveles de aislamiento de transformadores y equipos

En esta sección consideraremos 2 aspectos: selección del BIL y BSL del transformador y la selección del BIL del resto de equipos en una Subestación. En realidad, no podemos seleccionar el BIL de disyuntores, ya que el BIL se ha estandarizado para cada nivel de voltaje, sin embargo de lo cual tenemos la opción de seleccionar el aislamiento de aisladores tipo estación y de seccionadores.

En general se considera que el BIL de todos los equipos corregido por cualquier condición de funcionamiento debe ser mayor que el BIL interno del equipo principal, es decir, de los transformadores.

3.1 Niveles de aislamiento de transformadores, En los estudios de coordinación de aislamiento, a este equipo se le da una atención preferencial.

La primera regla es aplicar un pararrayos lo más cercano posible al transformador, ya que tratándose el aislamiento del transformador de un aislamiento-

no autorestaurador, la falla del mismo podría repercutir en una falla de la subestación y en un largo tiempo de reparación.

Normalmente, para establecer el BIL requerido del transformador, se añade un margen del 20% a las características de protección del pararrayos. Esto es, el valor de onda cortada de $3 \mu\text{seg}$ del transformador en 1.10 BIL se hace igual a 1.20 del voltaje de encendido de frente de onda, y el valor de onda completa, es decir, el BIL, se hace igual a 1.20 del voltaje de descarga. Cuando se conoce la onda de voltaje en el transformador, debe dejarse cierto margen, entre 10 y 30% entre el valor de voltaje en el transformador y la resistencia de aislamiento en el mismo, para considerar la incertidumbre en la terminación de ciertos parámetros de cálculo.

Se han establecido márgenes de protección de 20 y -15% para ondas por descargas atmosféricas y por maniobra respectivamente. En consecuencia se aplican las siguientes ecuaciones:

$$\text{BIL} = 1.2 \left[\text{voltaje de encendido } 1.2/50 \right] \quad (35)$$

$$= 1.2 \left[\text{voltaje de descarga} \right] \quad (36)$$

$$= (1.2 / CW) \left[\text{encendido por frente de onda} \right] \quad (37)$$

donde CW es el nivel de onda cortada en P.U. del BIL. El BIL seleccionado es el mayor valor entre las 3 ecuaciones de arriba.

El voltaje de descarga utilizado en las ecuaciones anteriores es el resultante del análisis de la sección 2.1.1.2 y 2.1.2.

Por otra parte, con referencia a las ondas de maniobra se puede plantear:

$$\text{BSL} = 1.15 \left[\text{encendido por onda de maniobra} \right] \quad (38)$$

O también, el BIL equivalente para obtener este BSL es:

$$\text{BIL} = \frac{1.15}{0.83} \left[\text{encendido por onda de maniobra} \right] \quad (39)$$

Lo único que falta por determinar ahora es la corriente de descarga. Las ecuaciones anotadas son las reglas usadas para determinar el aislamiento interno, BIL y BSL de un transformador y bushings.

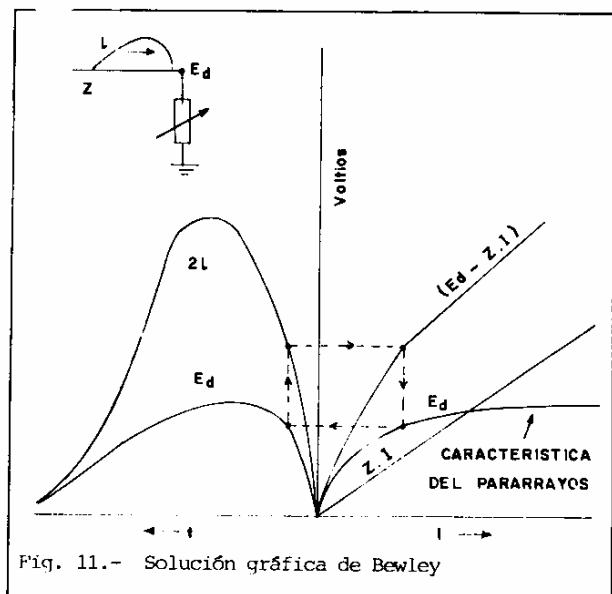


Fig. 11.- Solución gráfica de Bewley

El aislamiento externo de los bushings debe determinarse usando factores de corrección por temperatura, estando expuestos a condiciones atmosféricas requieren un BIL mayor, ya que el BIL es especificado para condiciones al nivel del mar. Para bushings de porcelana se tiene:

$$\text{BIL} = \frac{1.2}{\text{RAD}} \left[\text{voltaje de encendido } 1.2/50 \right]$$

$$= \frac{1.2}{\text{RAD}} \left[\text{voltaje de descarga} \right]$$

$$\text{BIL} = \frac{1.2}{(\text{CW})\text{RAD}} \text{ encendido por frente de onda}$$

$$\text{y BSL} = \frac{1.15}{\text{RAD}} \left[\text{encendido por onda de maniobra} \right]$$

$$\text{siendo } \text{RAD} = \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} = \frac{P}{P_0} \frac{t_0 + 273}{t + 273} \quad (40)$$

$$= 0.386 \times \frac{P}{t + 273} \quad (41)$$

$$\text{o } \text{RAD} = 0.997 - 0.106 \times A \quad (42)$$

donde P es medida en mm Hg y A es la altitud de la instalación en km.

$$\text{y } n = 1.12 - 0.12 \times S \quad (43)$$

El valor de S, la distancia de encendido a través del bushing puede estimarse usando la ecuación de Gallet - LeRoy para un chispero varilla-placa y, ya que, para aislamiento autorestaurador, el BIL y el BSL estadísticos se definen en el punto de 10% de probabilidad de contorno, según la Norma ANSI C92.1.197 X

$$\text{BSL} = \text{CFO} - 1.28\omega f = \text{CFO} (1 - 1.28\omega f / \text{CFO}) \quad (45)$$

Si asumimos un valor de $\omega f / \text{CFO} = 5\%$, la ecuación de Gallet Leroy viene expresada por:

$$\text{CFO} = \frac{3450}{1 + \frac{8}{S}} \quad (45)$$

El procedimiento de cálculo es iterativo, debiendo se asumir primero un valor de S, luego calcular n, luego calcular BSL, después calcular S y comenzar de nuevo el proceso con el cálculo de n, hasta que los 2 últimos valores de S sean similares. Finalmente se calculará el BSL corregido para estas condiciones.

3.2 Determinación del número de pararrayos requerido. Una vez que se ha localizado los pararrayos junto al transformador, corresponde definir el BIL del resto de quipos, es decir, nos referimos principalmente a disyuntores, seccionadores y aisladores para soporte de barras.

En realidad, no podemos seleccionar el BIL de disyuntores, ya que el BIL se ha estandarizado para cada nivel de voltaje. Sin embargo de que hay la opción de seleccionar el aislamiento de seccionadores y aisladores soporte, solo el BIL y el BSL de los disyuntores es considerado.

Ahora el problema radica en determinar si además de los pararrayos localizados junto al transformador, es necesario instalar otros adicionales.

Consideremos la condición de una onda de 1/2 milla para una subestación de 4 líneas. La condición más crítica representa para una subestación con una sola línea, para la cual el voltaje E de la on-

da viajera es máximo. Para una falla del apantallamiento, sin contorno, no hay reflexiones en el punto de incidencia y entonces

$$E = \frac{2e}{n} \quad (46)$$

siendo n el número de líneas

Para la mayoría de subestaciones de 230/138 y 138/69 kV del Sistema Nacional de Transmisión se ha normalizado los esquemas de doble barra y de barra principal y transferencia respectivamente. Ver figura 12.

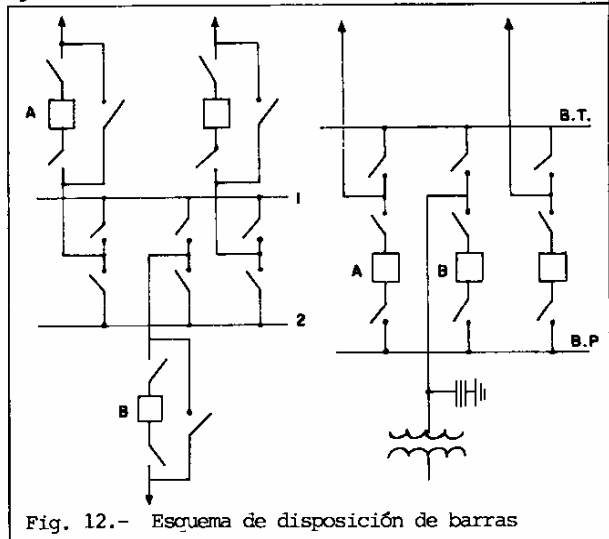


Fig. 12.- Esquema de disposición de barras

La condición de una subestación con una sola línea en servicio ocurrirá cuando se abran los seccionadores y las líneas salgan del servicio. Estas condiciones de contingencia tienen una baja probabilidad de ocurrencia.

Para cualquiera de los 2 esquemas, asumamos que la condición más crítica ocurre cuando las líneas 1 y 3 salen del servicio, en cuyo caso el disyuntor B es el más alejado desde el transformador, el objetivo es determinar si el pararrayos puede proteger este disyuntor y el aislamiento de las barras y hasta la salida de la línea.

3.3 Distancia de separación. En la Figura 13 se grafiza el esquema simplificado de la situación y la forma de la onda en el pararrayos, suponiendo que EA es constante.

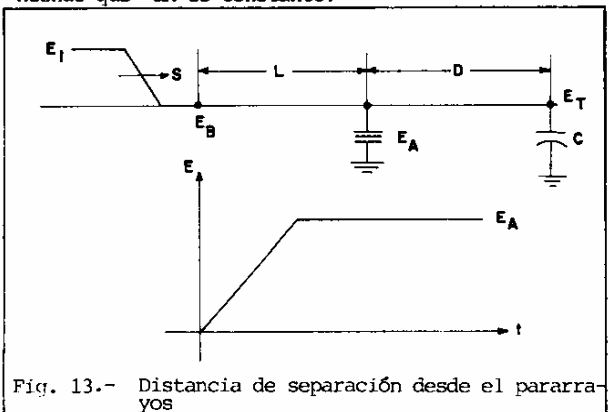


Fig. 13.- Distancia de separación desde el pararrayos

Si la capacitancia C es 0, se puede expresar los voltajes del circuito eléctrico equivalente de la siguiente manera:

$$E_T = E_A + 2S D/v \quad (47)$$

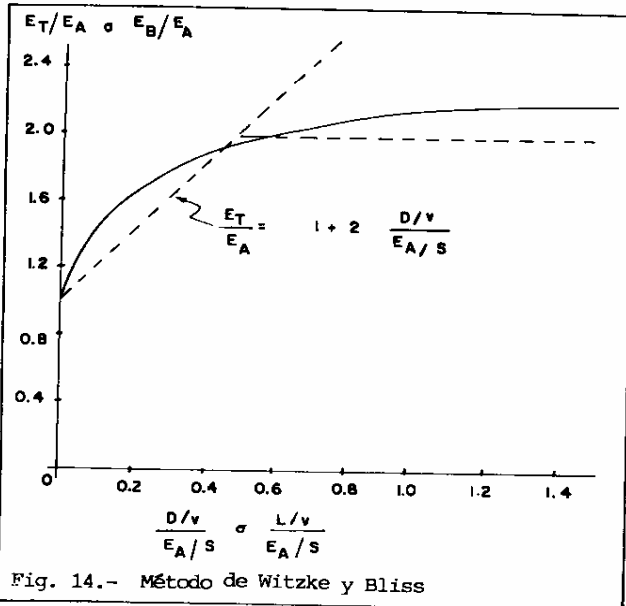
$$E_T = E_A + 2 S \frac{L}{v} \quad (48)$$

$$E_{BMAX} = \tau E_I \quad (49)$$

$$E_{TMAX} = 2 E_A \quad (50)$$

donde E_T es la onda de voltaje que llega al equipo y v es la velocidad de propagación, normalmente considerada igual a 1000 pies/ μ seg.

Si $C \neq 0$, B tiene la misma expresión que antes; sin embargo, no es una función simple y depende de C. Witzke y Bliss encontraron que C tenía una gran influencia sobre E_T , según lo que se muestra en la Figura 14.



La línea de segmentos representa la ecuación para E_T cuando $C = 0$.

El valor máximo teórico es 2. Sin embargo, con $C \neq 0$ el máximo valor de E_T es alrededor de $2.2 E_A$ para $D/v/E_A/S = 1.8$. Una buena aproximación de la curva es dada por la ecuación:

$$E_T/E_A = 2.22 - 0.98 e^{-2.69x} - 0.24 e^{-30x} \quad (51)$$

donde $x = D/v/E_A/S$ (52)

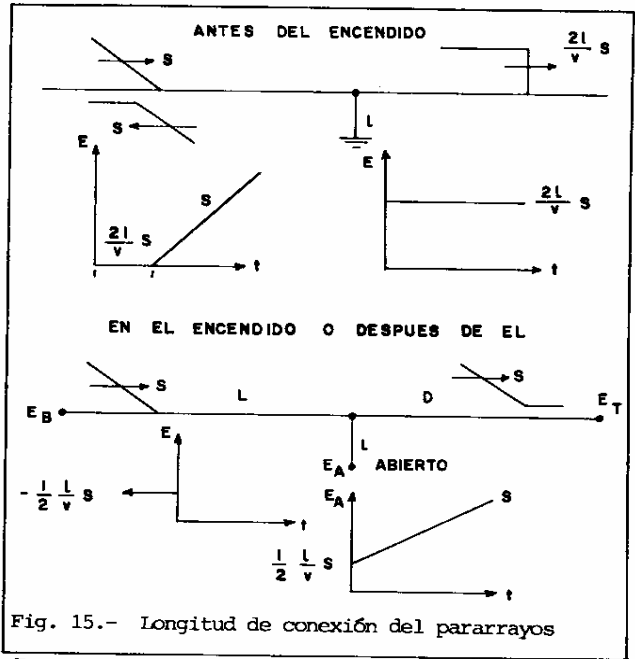
3.4 Representación del voltaje de encendido y el de descarga. El pararrayos se ha representado con el voltaje de encendido E_{so} y el voltaje de descarga E_d iguales y de valor constante, pero normalmente $E_{so} > E_d$.

Para propósitos de aplicación, con el objeto de conseguir el máximo voltaje, E_T o E_B , se considerará $E_A = 2 E_{so}$ o E_d , el mayor de los dos valores.

3.5 Efecto de la longitud de conexión del pararrayos. La longitud de la conexión del pararrayos afecta la magnitud de E_T o E_B antes y después del encendido del mismo. Al respecto, pueden considerarse 2 casos, grafizados en la Figura N° 15, de la cual se pueden obtener las siguientes relaciones:

$$E_T = E_{S0} + 2S \frac{D}{v} + 2 \frac{L}{v} S \quad (53)$$

$$E_B = E_{S0} + 2S \frac{L}{v} + 2 \frac{L}{v} S \quad (54)$$



En consecuencia, combinando estos resultados con los de la sección anterior obtenemos:

$$E_A = E_{so} + L_T \frac{di}{dt} \text{ o } E_d + L_T \frac{di}{dt} \quad (55)$$

donde L_T es la inductancia total de la conexión.

3.6 Efecto de la frecuencia industrial. Para analizar el caso de una onda que llega a un pararrayos en la presencia del voltaje a frecuencia industrial, asumiremos que el pararrayos se encenderá al mismo voltaje línea a tierra que para $V_{PF}=0$. Corresponde trabajar con la onda de voltaje separadamente. Ver figura N° 16.

Hagamos $E_A = E_{so} + V_{PF}$ (56)

Entonces tendremos:

$$E_T = A + 2S \frac{D}{v} = E_{so} + V_{PF} + 2S \frac{D}{v} \quad (57)$$

El voltaje a tierra será entonces:

$$E_T - V_{PF} = E_{so} + 2S \frac{D}{v} \quad (58)$$

En resumen el voltaje a frecuencia industrial no tiene efecto. Sin embargo, si $C \neq 0$, entonces el voltaje a tierra cambiará, pero el voltaje ($B - PF$) no lo hará. En este caso V_{PF} afecta el voltaje en el transformador y no el voltaje sobre el disyuntor.

Para resultados conservadores, se deberá asumir un voltaje a frecuencia industrial negativo (polaridad opuesta), igual al voltaje cresta línea a neutro y hacer.

$$A = E_{so} \text{ (o } E_d) + V_{PF} + L \frac{di}{dt} \quad (59)$$

Luego se deberá calcular E_T con la fórmula 51 y finalmente E_T a tierra.

De manera similar, se calculará E_B con la expresión:

$$E_B = E_A + 2S \frac{L}{v} \quad (60)$$

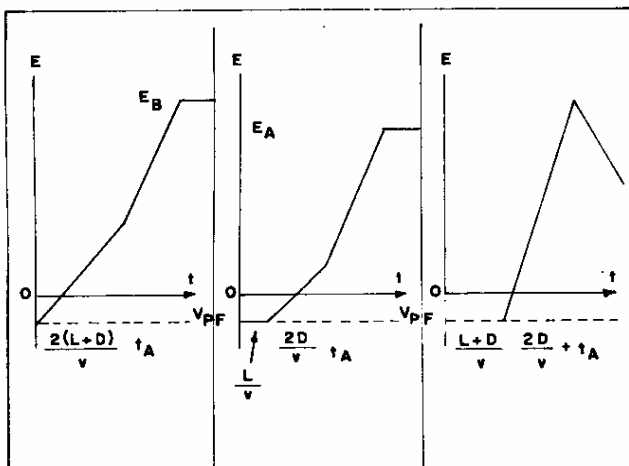


Fig. 16.- Efecto del voltaje a frecuencia industrial

Esta expresión es válida para $L < (2E_I - E_A)v/4S$

Para $L \geq (2E_I - E_A)v/4S$ se tiene:

$$E_B = E_I + \frac{A}{z} \quad (61)$$

Donde E_I es el voltaje cresta de la onda incidente.

3.7 Resistencia al aislamiento de equipos, Una vez que se ha localizado un pararrayos lo más cerca posible al transformador, corresponde calcular los voltajes E_B y compararlos con las características de resistencia al aislamiento de los equipos, lo cual conduce a un análisis, acerca de formas de onda no normalizadas.

El voltaje sobre el transformador es una onda oscilatoria amortiguada, con un voltaje cresta en un tiempo de $2D/v + t_A$ para $C = 0$, pero mayor para $C \neq 0$. En general, el tiempo para cresta está en el orden de $3\mu\text{seg}$ o menos, y en general, para propósitos de aplicación, la resistencia de aislamiento del transformador se considera de acuerdo a los criterios expuestos en la sección 3.1

Para el resto de equipos, y con propósitos de aplicación general, la resistencia de aislamiento se considera como la resistencia a la onda cortada de $1.15 \times \text{BIL}$ o $1.10 \times \text{BIL}$.

En las Normas ANSI C92.1-1971 se han tabulado valores preferidos de niveles de aislamiento transitorios (TIL), en base a los cuales se ha elaborado la Tabla III, que incluye BIL'S y BSL'S para diversos equipos que son expresados en valores cresta de ondas normalizadas, es decir, $1.2/50\mu\text{seg}$. y $250/2500\mu\text{seg}$, respectivamente.

De la tabla III se puede observar que hasta 69 kV no existe BSL para transformadores de fuerza y hasta 230/242 kV no existe BSL para disyuntors y bushings de transformadores. Para seccionadores no hay valores de BSL en las Normas, y solo existen estimaciones a partir de 362 kV.

4. BSL DEL EQUIPO Y DISTANCIAS FASE - TIERRA

Uno de los aspectos más importantes que hay que anotar es que, cuando una línea es energizada o recerrada a alta velocidad desde una subestación remota, la onda de maniobra se aplica sobre el aislamiento de la subestación, el cual consiste básicamente entre 5 a 10 equipos, mientras que, al considerar una línea, el número de aislamientos de torre está entre 250 y 500.

Además, ya que las distancias dentro de una subestación son cortas comparadas al frente de onda de la onda de maniobra, se puede considerar que ésta aparece simultáneamente a través del aislamiento de estos 5 o 10 equipos, de lo cual se concluye que $E_R/ES = 1.00$, siendo E_R el voltaje en el extremo abierto de la línea y ES es el voltaje en el extremo de la línea en el cual se ha realizado la maniobra.

Para aislamiento de líneas, el CFO de polaridad negativa es mayor que el CFO de polaridad positiva. Para aislamiento de subestaciones, las normas no requieren que el BSL sea dado para ambas polaridades.

El BSL se da simplemente para la polaridad que produce el menor BSL y no podemos conocer a cual polaridad se refiere este BSL.

Para aisladores tipo poste, para alturas normales de estructuras de acero de soporte conectadas a tierra, CFO (neg.) > CFO (pos.) se cumple aproximadamente.

$$\text{CFO} = k \frac{3540}{1 + S/S} \quad (62)$$

donde el valor de k es 1.4 para polaridad positiva y 1.7 para polaridad negativa, $S = F/\text{CFO} = 7\%$, S es la distancia de encendido a través del aislador o a proximadamente la altura de este.

Para disyuntors de tanque vivo, la resistencia de aislamiento del disyuntor en la posición abierto, a tierra, es alrededor de 10 a 13% mayor que en la posición cerrado, ya que el BSL del disyuntor en la posición abierta es 10 a 13% mayor que el BSL nominal. Sin embargo, esta resistencia adicional no debería usarse, a menos que sea verificado por el fabricante. En general, se puede asumir que el BSL es igual para ambas polaridades en el caso de disyuntors.

El BSL es siempre dado para condiciones húmedas, para seccionadores y disyuntors. Para aisladores tipo estación se considera, el CFO para condiciones secas. El CFO para condiciones húmedas es 0.96 del CFO para condiciones secas.

Hay dos métodos utilizados para determinar el BSL, el determinístico y el probabilístico.

4.1 Método determinístico para la determinación del BSL

El BSL es determinado por el uso del máximo SUV como sigue.

$$\text{BSL} = \frac{EMV}{(\text{RAD})} \text{ P.R} \quad (63)$$

donde PR es la relación de protección o margen de seguridad, que varía entre 1.0 y 1.15 y EM es el máximo voltaje de maniobra (fase-neutro) del sistema. Para subestaciones, hay que considerar que $\text{BSL} = \text{PR} (EM)$.

4.2 Método probabilístico para la determinación del BSL

En método probabilístico debemos recurrir al denominado análisis resistencia-esfuerzo (stress-strength), el cual se halla grafizado en la Figura 17. Puede ocurrir una falla cuando el esfuerzo excede la resistencia. Para propósitos de coordinación del aislamiento, la distribución de esfuerzos es la distribución de sobrevoltajes de maniobra y la distribución de la resistencia es la rigidez dieléctrica (onda de impulso) del aislamiento. La distribución de esfuerzos se obtiene normalmente mediante

Tabla III

Niveles de Aislamiento Transitorios

VOLTAJE SISTEMA kV	TRANSFORMADORES		DISYUNTORES		BUSHINGS DE TRANSFORMADORES		SECCIONADORES				
	BIL kV	BSL kV	BIL kV	BSL kV	BIL kV	BSL kV	BIL kV	BSL kV			
46/48.3	250		250		250		250				
69/72.5	350		350		350		350				
115/121	350	290	550		550		550				
	450	375									
	550	460									
138/145	450	375	650		650		650				
	550	460									
	650	540									
230/242	650	540	900		750		900				
	750	620									
	825	685									
	900	745									
	975	810									
	1050	870									
362	900	745	1300	825	900	700	1050	(700)			
	1050	870						1050	825	1175	(825)
	1175	975						1175	825		
	1300	1080									
550	1300	1080	1800	1175	1300	1050	1550	(975)			
	1425	1180						1425	1110	1800	(1175)
	1550	1290						1550	1175		
	1675	1390						1675	1175		

el uso de un TNA o de un computador digital. La distribución de la rigidez es la característica de disrupción, que es obtenida en un laboratorio.

La distribución de la rigidez es aproximada por una distribución acumulativa gaussiana o normal, y es para cada uno de los equipos.

La distribución de esfuerzos puede ser una distribución normal o una distribución de valor extremo (4).

Ha sido desarrollado (4) un método de aplicación general para determinar el aislamiento de líneas y equipos, usado para estimar la rata de contorneo por ondas de maniobra (SSFOR), que consiste en el empleo de dos grupos de curvas presentadas en la Figura 18 y tres curvas de factores de corrección presentada en la Figura 19. Las curvas de la Figura 18 son construídas en función de $V3/E2$ donde $E2$ es el sobrevoltaje de maniobra estadístico (es decir, la probabilidad de exceder el voltaje $E2$ es 2%) y $V3$ es definido como

$$V3 = CFO - 3 \sigma_F \quad (64)$$

Se ha definido el voltaje soportado $V3$ de este modo para considerar una baja probabilidad de falla.

La regla de diseño comunmente usada es igualar EM a $V3$. Entonces

$$CFO - 3 \sigma_F = EM \quad (65)$$

$$CFO = \frac{EM}{1 - 3\sigma_F/CFO} \quad (66)$$

Si se asume que σ_F/CFO es 5% y se considera la influencia de la altura dada por la ecuación (42) tendremos:

$$CFO = \frac{EM}{0.85 \times RAD^n} \quad (67)$$

$$CFO = \frac{(V3/E2) E2}{0.85 \times RAD^n} \quad (68)$$

Si asumimos que hay 10 equipos en cada llegada de línea, $N = 10$, entonces de la Figura 19 se tiene $TCF = 1.1$ y $VPCF = 1.00$

Adicionalmente para aislamiento autorestaurador, las normas IEEE definen el BIL estadístico como el valor cresta de una onda de impulso por maniobra para la cual el aislamiento tiene un 10% de probabilidad de falla. Entonces

$$BSL = CFO (1 - 1.28 \frac{\sigma_F}{CFO}) \quad (69)$$

$$CFO = \frac{(V3/E2) E2 \times 0.936}{0.85 \times 1.11 \times RAD^n} = 0.992 \frac{(V3/E2) E2}{RAD^n} \quad (70)$$

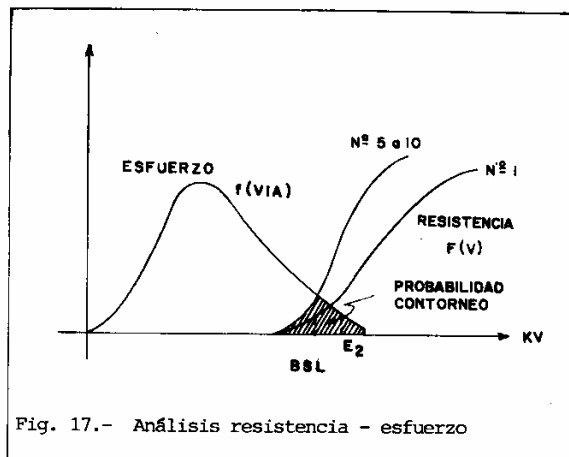


Fig. 17.- Análisis resistencia - esfuerzo

Para una distribución Gaussiana tendremos:

$$E_2 = U_0 \left[1 + 2.0537 \left(\frac{\sigma}{\mu_0} \right) \right] \quad (71)$$

Para una distribución de valor extremo tendremos:

$$E_2 = U_0 \left(1 + 3.902 \left(\frac{\beta}{U_0} \right) \right) \quad (72)$$

Las curvas básicas están construídas para las siguientes condiciones: número de torres en la línea (n) = 500, perfil de voltaje tipo lineal con $\bar{E}/\bar{E}_S = 1.00$ y distribución de sobrevoltaje truncada en $U_0 + 7\beta$ para la de valor extremo y $\mu + 4\sigma$ para distribución normal.

En este método la probabilidad de contorneo se ha reemplazado por el término SSOR, es decir, contorneos por 100 ondas de maniobra, o en contorneos por 100 operaciones de disyuntor, que es similar al término rata de contorneo por descargas atmosféricas que viene expresada en contorneos por 100 km por año.

En las curvas mencionadas se supone que CFO negativo > CFO positivo, por lo tanto en el caso de equipos de subestaciones, el SSFOR deberá dividirse por 2.

Normalmente, debido a la consecuencia de un contorneo en la subestación, el valor de diseño del SSFOR para una subestación viene dado por

$$\text{SSFOR (SUBESTACION)} = 1/10 \text{ SSFOR (LINEA)}$$

Como se había mencionado anteriormente, el BSL de un disyuntor está dado en Tablas estandar. Con el método probabilístico descrito se puede calcular el BSL requerido. Aun en el caso de que este último sea el menor de los 2 valores, debe usarse el dado en las tablas. Para seccionadores y aisladores tipo estación pueden usarse BSL'S menores, de acuerdo a los valores disponibles en la Tabla III.

4.3 Distancias fase - tierra

Las distancias fase-tierra requeridas se basan normalmente en los BIL'S y BSL'S, como fueron determinados previamente.

4.3.1 Por ondas de maniobra, Se puede calcular esta distancia usando la ecuación de Gallet Le Roy

$$\text{CFO} = k \frac{3450}{1+8/s} \quad (73)$$

donde K es denominado el factor de chispeo, que puede adoptar los siguientes valores

k = 1.3 para conductor a estructura de torre

k = 1.1 a 1.3 para equipos a estructura de torre

k = 1.1 para conductor a tierra

Para determinar el valor requerido de S es necesario usar el BSL del equipo, o mejor aun, el BSL requerido, es decir, que el método es determinístico o probabilístico de acuerdo al método empleado para encontrar el BSL.

4.3.2 Por descargas atmosféricas, El principal hecho digno de anotar es que el CFO es función lineal de la separación entre electrodos. Además, para factores de chispeo grandes, el CFO de polaridad negativa es menor que el CFO de polaridad positiva. En pruebas realizadas en laboratorios de alto voltaje se obtuvo un valor de 605 kV/m para el CFO de polaridad negativa, el cual se

usará en este análisis, ya que más del 90% de contorneos son de polaridad negativa.

El coeficiente de variación por impulsos por descarga atmosféricas es bajo. En general es práctica común usar un valor de 3%.

Para encontrar la distancia de encendido se ha encontrado la expresión.

$$S = \frac{1.04 \times \text{BIL}}{605} \quad (74)$$

5. COORDINACION DE LA PROTECCION

La coordinación del aislamiento en una subestación consiste en la adecuada selección de las características de voltaje y interrupción del equipo y de los dispositivos de protección, con el objeto de mantener el máximo margen de protección a un precio razonable.

Esencialmente, el problema se reduce a la comparación de las características de voltaje de contorneo una con otra y con las ondas de impulso resultantes en una subestación, lo cual se consigue mediante el dibujo de todas las curvas en un diagrama único voltaje-tiempo.

En la Figura 20 se ilustra un conjunto típico de curvas para una onda de $1.5 \times 40 \mu \text{ seg}$, en un sistema de 230 kV. Se ilustra la relación entre el contorneo de la línea y el voltaje de impulso permitido del aislamiento del transformador, así como el nivel de impulso de voltaje proporcionado por los pararrayos.

La curva superior indica la característica de aislamiento de la línea de transmisión.

La curva siguiente conecta 3 puntos de prueba de la característica del transformador: BSL, BIL y onda cortada. Hay que considerar que para voltajes iguales o mayores a 345 kV, el punto de onda cortada es 1.10 BIL. En la parte inferior se presentan 3 características de pararrayos. La característica superior es para un pararrayos no conectado a tierra, con un voltaje línea a tierra máximo de 240 kV, requerido donde el neutro del sistema puede girar 100% del voltaje a tierra, resultando en un 73% de aumento del voltaje línea a tierra. La segunda característica es de un pararrayos con el neutro conectado a tierra, que tiene un voltaje máximo de línea a tierra de 192 kV. La tercera característica es de un pararrayos con el neutro conectado a tierra, que tiene un voltaje máximo de línea a tierra de 180 kV.

Es evidente que un sistema bien coordinado puede usar el pararrayos de menor voltaje, con lo cual se obtendrá ahorros tanto en el costo del pararrayos como en el aislamiento requerido del transformador.

Para tensiones de servicio hasta de 100 kV, la práctica corriente es usar plena aislación para todos los equipos de una S/E, mientras que para tensiones de servicio más elevadas se usa aislamiento reducido en los transformadores de potencia y con la tendencia a reducir también el aislamiento de los disyuntores en las tensiones más elevadas.

El uso de aislamiento reducido en las altas tensiones se debe a que la mayoría de los sistemas tiene su punto neutro efectivamente puesto a tierra, de manera de poder reducir así las solicitaciones entre fase y neutro.

La disminución de la aislación en relación a la plena aislación queda caracterizada por los pasos o es

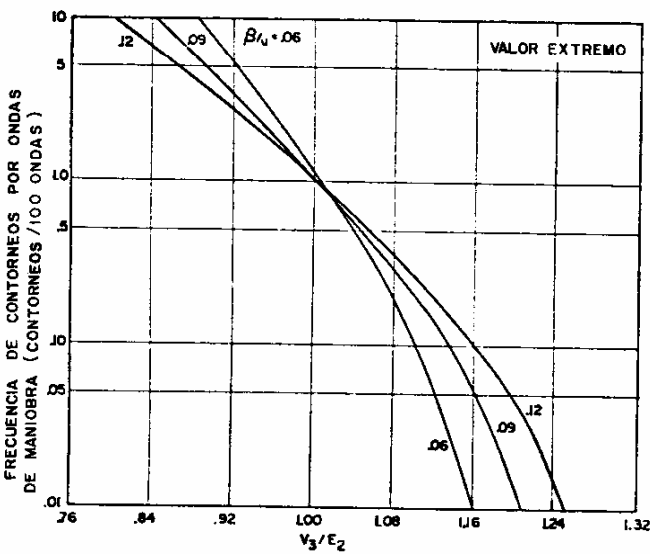
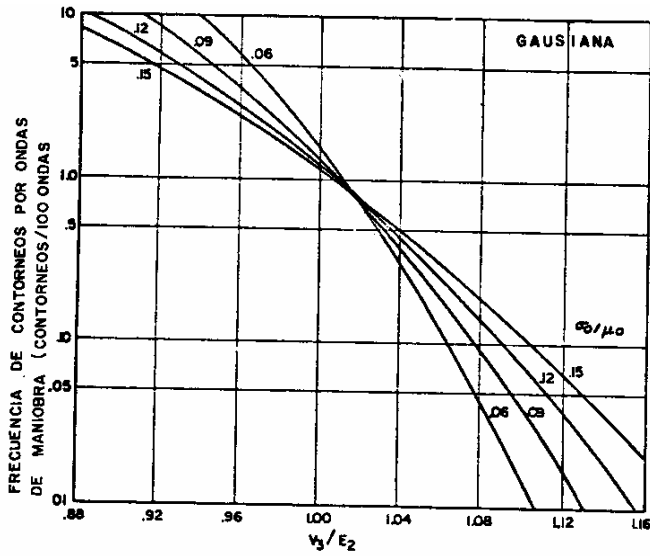


Fig. 18.- Curvas de distribución de sobrevoltajes de maniobra.

calones de reducción términos que son aceptados para caracterizar una clase de aislamiento para una tensión de servicio dada.

La magnitud de los pasos de reducción del aislamiento varían de acuerdo con la tensión nominal; son menores en las tensiones inferiores y aumentan con el aumento de la tensión de servicio. En 230 kV, por ejemplo, un paso de reducción corresponde a una diferencia de aislamiento de 150 kV cresta y para tensiones nominales superiores, cada paso de reducción es de 250 kV cresta.

Mientras que los europeos utilizan corrientemente niveles inferiores en un escalón para los transformadores de potencia en las altas tensiones, los americanos prefieren reducir el aislamiento de los mismos en dos y tres escalones, según la tensión de servicio. Para la tensión nominal de 230 kV la práctica europea es construir los transformadores para un BIL de 900 kV cresta (1 paso) en cambio los americanos utilizan frecuentemente transformadores para esa tensión nominal con un BIL de 650 kV cresta (3 pasos).

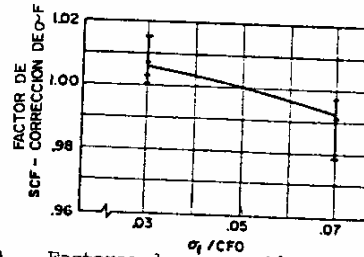
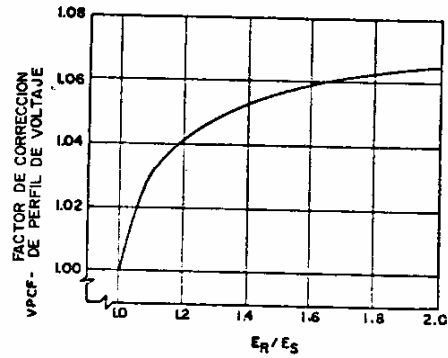
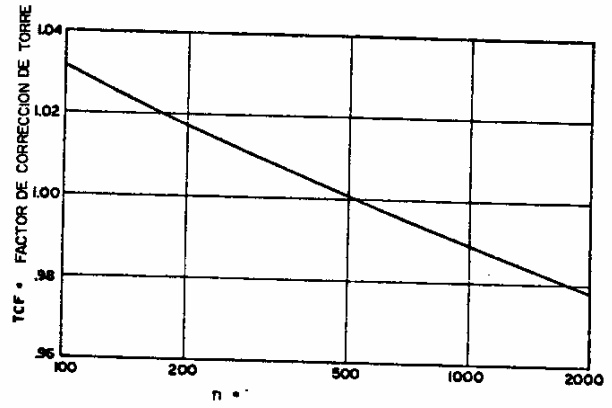


Fig. 19.- Factores de corrección para curvas de la Fig. 18

Hay una tendencia constante en reducir el nivel de aislamiento de los equipos, especialmente a medida que aumenta la tensión de servicio, por cuanto ello se traduce en la disminución del costo de los aparatos y en la reducción de las distancias de separación entre partes conductoras de corriente y entre éstas y tierra.

La disminución del nivel de aislamiento en los transformadores de potencia significa ahorros del orden del 3 al 4% por escalón en 230 kV y entre el 6 y 8% en tensiones más elevadas.

En los disyuntores también se obtienen importantes ahorros con la utilización de niveles reducidos de aislamiento en las muy altas tensiones. En INECEL, para 230 kV se han especificado disyuntores con un BIL para el aislamiento interno de 900 kV.

En referencia a la Figura 20, la coordinación de las características del pararrayos con la curva de aislamiento del transformador y por lo tanto la determinación de márgenes de seguridad en porcentaje se hace en 3 puntos de prueba:

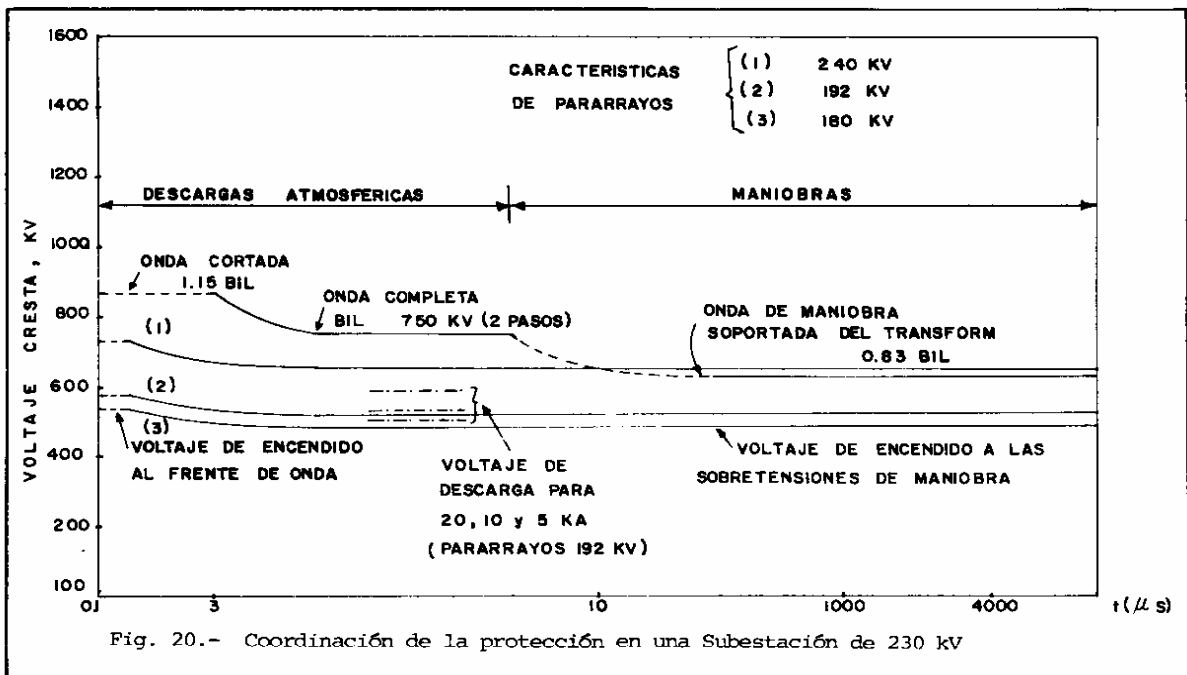


Fig. 20.- Coordinación de la protección en una Subestación de 230 kV

- 1.- Tensión resistente a la onda cortada del transformador frente a la tensión de encendido de frente de onda del pararrayos.
- 2.- Tensión resistente a la onda completa del transformador (BIL) frente a la tensión de descarga del pararrayos para una determinada corriente de descarga.
- 3.- Tensión resistente del transformador a las sobretensiones de maniobra (BSL) frente a la tensión máxima de encendido por maniobras del pararrayos.

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue presentar un análisis de una metodología probabilística para la determinación de la magnitud y forma de las ondas de entrada a una subestación y la manera de contrastar estas solicitaciones. Es evidente que la coordinación del aislamiento de una subestación es un estudio complejo, ya que el ingeniero debe conocer el diseño del aislamiento de la línea, así como el aislamiento de equipos, pararrayos y las resistencias de aislamiento de estructuras aisladas en aire.

Se supone que la subestación se encuentra perfectamente apantallada, de acuerdo al modelo geométrico de Wagner. No se considera el efecto de descarga de ondas a pocos mts. de una subestación, porque el período de retorno es extremadamente alto y por lo tanto prácticamente incalculable.

Es útil puntualizar el hecho de que las sobretensiones de origen atmosférico son determinantes en la fijación del nivel de aislamiento en las redes de medias y altas tensiones, en tanto que en sistemas de EHV, de 400 kV o superiores, las sobretensiones de maniobra son las predominantes para la selección del nivel de aislamiento.

Para una potencia de cortocircuito dada, el aumento de la tensión se incrementa con la longitud de la línea y con la potencia transmitida. A su vez, para una potencia de transmisión y longitud de líneas dadas, la sobretensión es más elevada cuanto

más reducida es la potencia de cortocircuito de la red. Por esta razón, en instalaciones en altas tensiones en su primera etapa de desarrollo, como las del Sistema Nacional, tienen normalmente un nivel de aislamiento superior, debido a la reducida potencia de cortocircuito.

Dentro de limitaciones más importantes dentro de nuestro medio se puede señalar la determinación del nivel isocerámico y de la frecuencia de con-torneos por descargas atmosféricas. Desafortunadamente en nuestro País, hasta el momento el INAMHI, (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) solo ha tomado datos relativos en muy pocas localidades y durante muy pocos años. En INECEL se especifica la instalación de contadores de descargas en todos los pararrayos instalados en las subestaciones. Sin embargo, estos dispositivos nos dan solo una información parcial acerca del fenómeno.

Dentro de poco tiempo se espera lograr implementar un sistema seguro y confiable para la determinación del nivel isocerámico, con la instalación de aparatos registradores en estaciones de medición y/o con la intervención directa de personal de INECEL.

Por otra parte, en relación a la determinación de las sobretensiones transitorias resultantes de operaciones de maniobra, desconexión de carga, efecto Ferranti, etc., se va a optimizar un programa de computación realizado por uno de nuestros ingenieros.

Es factible que las subestaciones diseñadas y construidas hayan sido sobredimensionadas, por la falta de conocimiento de algunos parámetros como atenuación por corona, efecto de gradiente de corriente sobre el voltaje de descarga y características de resistencia al impulso de estructuras.

En INECEL se ha especificado pararrayos autoválvula tipo convencional, por tratarse de la conformación de un sistema todavía no muy complicado y sin requerimientos exagerados para disipación de grandes cantidades de energía. En el futuro, habría que analizar la posibilidad de instalar pararrayos de ZnO, con mejores niveles de protección para a-

plicación en bancos de capacitores, circuitos con cables, instalaciones en SF₆ y circuitos con gran disipación de energía.

En este estudio no se ha enfocado en detalle la especificación de los niveles de aislamiento del resto de equipos, en consideración de que tal procedimiento es contemplado en general en las Normas NEMA, ANSI o IEC editadas al respecto, con las correcciones por altura y contaminación pertinentes. Solamente cabe aclarar que para las barras se ha seleccionado el nivel de protección más alto de las subestaciones, considerándolas como parte integrante del Sistema de Transmisión, agregándose un aislador en cada cadena de aisladores con respecto al número de aisladores de la línea.

Finalmente, se ha detectado la necesidad de la implementación de un sistema de medición experimental de sobretensiones de maniobra para estudio y verificación de resultados obtenidos en el TNA y el computador con el funcionamiento del elemento objeto de estudio, mediante la construcción de una estación móvil de registro, proyecto que podría financiarse conjuntamente mediante un convenio entre el INCECEL y la Politécnica Nacional.

REFERENCIAS

- 1.- A.R. Hileman. "Insulation coordination". Advanced Systems Technology. Westinghouse Electric Corporation. East Pittsburgh. PA.
- 2.- A.R. Hileman, W.C. Guyker, R.W. Powell, W.A. Richter y J.M. Desalvo, "Insulation Coordination in APS 500 kV Stations" IEEE Trans. PAS (June 1967)
- 3.- A.R. Hileman. Insulation Coordination Of air-insulated stations. Surges in high voltage networks (Plenum Publishing Corporation, 1980)
- 4.- A.R. Hileman. "Probability and Statistics for Power Systems Engineers." Advanced Systems Technology. Westinghouse Electric Corporation. East Pittsburgh. PA.
- 5.- L.V. Bewley. Traveling waves on transmission systems. General Electric Company. Dover Publications, Inc., New York.
- 6.- J.D. Brown, M. Bagniewski, V. Orejuela, H. Bernhard, C.E. Shannon. A-C Transmission Engineering Section. Electric Utility Systems Engineering Department. General Electric. Schenectady, N.Y. "Transient Network Analyzer Study for the International Engineering Company Inc. of the Instituto Ecuatoriano de Electrificación" Study N° T1-1022. March 21, 1975.
- 7.- "Determinación del nivel de aislamiento de subestaciones y sus equipos" Sistema Nacional de Transmisión. Diseño para Licitación. Informe Final. Diciembre 1975. Anexo 5.
- 8.- Jorge A. Cavallotti CADAFE. "Subestaciones a la intemperie en altas y muy altas tensiones". Coordinación del nivel del aislamiento.
- 9.- American National Standard. ANSI C62.2 - 1969. Guide for Application of valvetype lightning arresters for alternating current systems. American National Standards Institute. Broadway, N.Y.