

Localización de Descargadores de Protección en Subestaciones

1 Protección de la aislación

Dentro de los posibles tipos de sobretensiones a que están sometidas las aislaciones de los equipos eléctricos ubicados en las estaciones de sistemas de transmisión, las de origen atmosférico son las que causan daño más frecuentemente.

Es necesario, por lo tanto, diseñar la instalación de tal forma que las sobretensiones atmosféricas que provienen de las líneas no causen deterioro de la misma. Esto se logra en base a:

- Coordinar el aislamiento de los equipos.
- Proteger dichas aislaciones con elementos capaces de reducir las sobretensiones que alcanzan a los equipos.

Para cumplir con estas necesidades se procede a:

- a) Fijar el nivel de aislación común para la instalación, haciendo que la aislación de los equipos supere ese nivel.
- b) Elegir elementos de protección capaces de asegurar que las sobretensiones sobre los equipos sean menores que el nivel de aislamiento fijado.

2 Características de aislación

El comportamiento de un aislamiento se describe por medio de una curva *tensión-tiempo* la cual es un gráfico cuya ordenada es la tensión de cresta que produce la anulación de la aislación y cuya abscisa es el tiempo en que se produce dicha anulación a contar del instante en que se inicia la onda aplicada, para una serie de impulsos de una forma de onda especificada. La Fig.1 muestra la construcción de la curva.

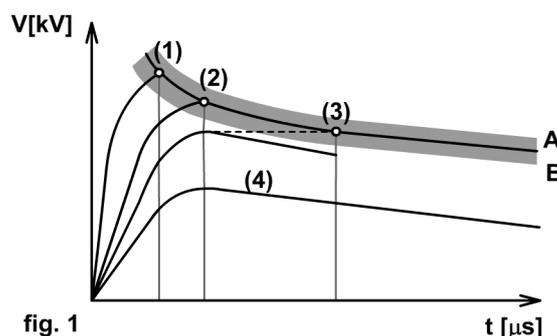


Fig. 1

fig. 1

Curva tensión tiempo característica de una aislación

La anulación de la aislación se produce:

- (1) en el frente; (2) en la cresta; (3) en la cola de la onda; (4) no se produce.

Debido a las variaciones aleatorias del comportamiento de la aislación, por efecto de las condiciones atmosféricas y errores experimentales, esta curva se

transforma en una banda cuando es obtenida en la práctica. El límite inferior de esta banda (curva B), define la tensión que es capaz de resistir la aislación. Si se intenta proteger la aislación de un equipo cuya curva tensión-tiempo sea la indicada en la Fig.1, el elemento protector deberá operar según una curva íntegramente por debajo de la curva B. Esto se muestra en la Fig. 2.

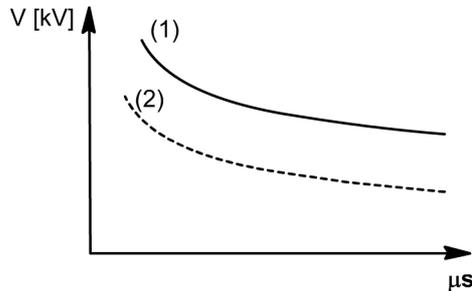


Fig. 2

- (1) Curva tensión tiempo del elemento a proteger
 (2) Curva tensión tiempo del elemento protector

3 Elementos de Protección

Los requisitos básicos que debe cumplir un elemento de protección son los siguientes:

- Su curva tensión-tiempo debe estar por debajo del nivel de tensión que es capaz de resistir la aislación, para todo tiempo a la descarga.
- No debe operar para los máximos valores de tensión de servicio alterna que se produzcan en la red debido a fallas o variaciones bruscas de carga.
- Debe ser capaz de descargar repetidas veces altas corrientes de larga duración sin variar su característica de protección

3.1 Descargador con resistencia no lineal

El descargador con resistencia no lineal es uno de los aparatos más usados como elemento de protección. Consiste, básicamente, en un explosor en serie con un resistor no lineal, como muestra la Fig.3

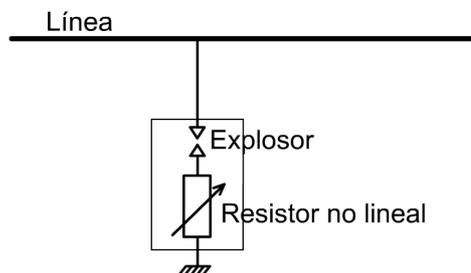


Fig. 3

Modelo simplificado de un descargador

Al llegar una sobretensión capaz de provocar el cebado del explosor, éste actúa como una llave de contacto, derivando a tierra la sobretensión a través del resistor no lineal. Por lo tanto a partir del instante de cebado, la tensión en los bornes del descargador estará determinada por la característica tensión-corriente del resistor no lineal. (Fig. 4)

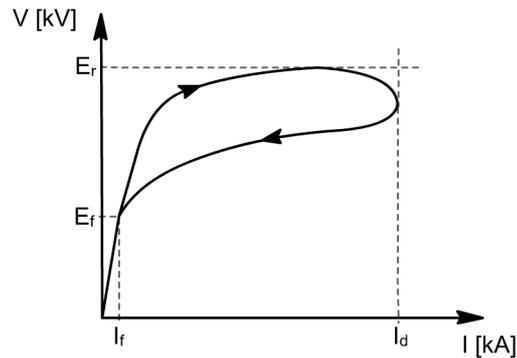


Fig. 4

Característica tensión corriente del resistor no lineal

E_r = Tensión máxima en los bornes del descargador, después de producido el cebado del explosor, debido a una sobretensión que causa un valor de cresta de corriente I_d .

I_f = Máxima corriente subsiguiente en un sistema de tensión E_r .

De esta forma, en el tiempo de cebado se produce una reducción brusca de la tensión, aumentando ésta a continuación con la corriente de acuerdo a la característica del resistor no lineal (Fig.5).

Una vez que la onda ha sido descargada a tierra, existe una corriente subsiguiente (en la Fig. 4) debida a la tensión de servicio.

A causa del alto valor de resistencia que presenta el resistor no lineal para bajas tensiones la corriente subsiguiente es de valor relativamente bajo (centenares de Amper), lo cual produce inestabilidad en el arco y por lo tanto este se apaga en los explosores al primer paso por cero de la onda de corriente.

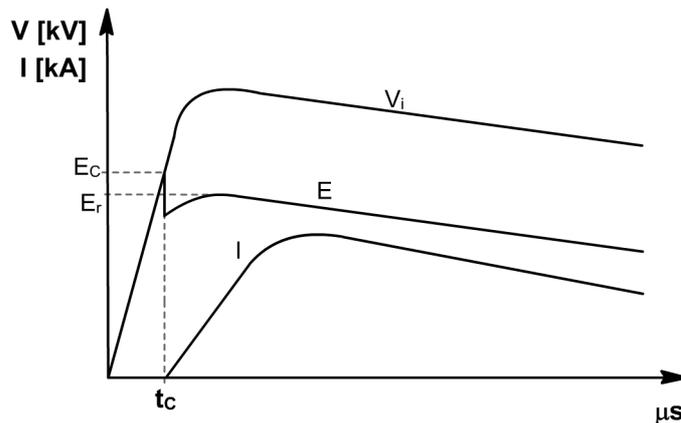


Fig. 5

Formas de onda producidas durante la operación de un descargador

V_i = tensión incidente

E = tensión entre terminales del descargador

E_c = tensión de cebado del explosor

E_r = tensión residual}

I = corriente de descarga

t_c = tiempo de cebado

3.1.1 Nivel de Protección

El Nivel de Protección, es la tensión máxima que puede aparecer en el punto de conexión del descargador con la línea de transmisión, durante el ciclo de funcionamiento. Este valor está fijado por una de las dos cantidades siguientes:

- Máxima tensión que produce el cebado del explosor bajo condiciones de servicio (tensión de cebado en Fig.6)

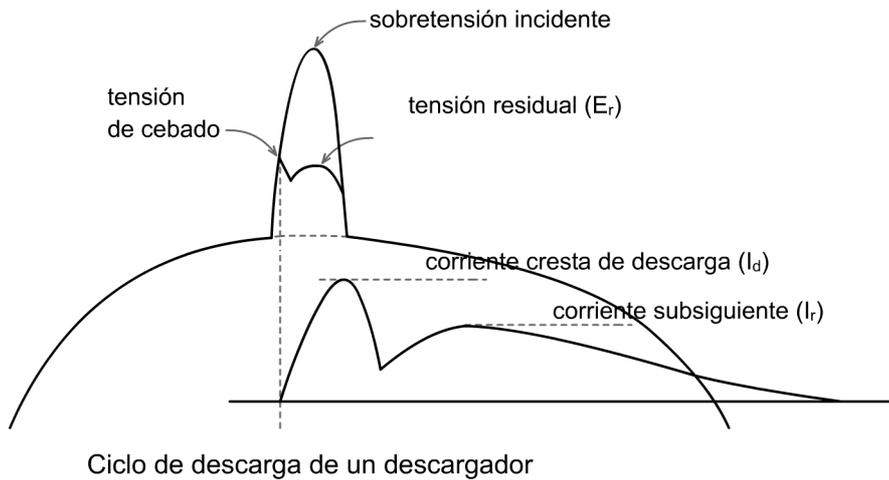


Fig. 6

- Máxima tensión que aparece en el punto de conexión del descargador con la línea, una vez producido el cebado del explosor. Este valor está determinado por la magnitud de la tensión incidente, la impedancia de onda de la línea y la característica del resistor no lineal. Para calcularlo, debe tenerse en cuenta la caída de tensión en el cable de conexión que une la línea con el terminal del descargador.

El mayor valor de las tensiones definidas en a) y b) es el Nivel de Protección.

3.1.2 Tensión Nominal

El valor de la corriente subsiguiente está determinado por la tensión de servicio y la característica tensión corriente del resistor no lineal.

Se define la tensión nominal como la máxima tensión de servicio admisible en un descargador. Con tensiones menores o iguales, el descargador debe asegurar el corte de la corriente subsiguiente.

Si la tensión de servicio es mayor que la nominal del descargador, la corriente subsiguiente será mayor que la corriente nominal lo que constituye una posibilidad de falla. En tal caso puede no producirse la extinción del arco al paso de la corriente por cero, dañándose el descargador por efectos térmicos (puede explotar).

Los valores definidos anteriormente, “nivel de protección” y “tensión nominal”, guardan relación directa. Si se elige un descargador con tensión nominal elevada, lo cual aseguraría la interrupción del arco, se reduce la seguridad de protección de la aislación ya que el nivel de protección resulta más alto. Por el contrario si se selecciona una tensión nominal reducida, se

tendrá un nivel de protección bajo con lo que se asegura una mayor protección de la aislación, pero se corre el riesgo de causar fallas por descargas bajo tensiones de servicio anormalmente altas.

3.1.3 Datos eléctricos de descargadores

En general los datos que posee el proyectista acerca de las características de operación de los descargadores son los indicados en el Cuadro 1. Se presentan como ejemplo los valores para dos descargadores de 120 y 132 kV de tensión nominal.

En la columna (1) consta el valor eficaz de la tensión nominal en kV. Esta magnitud fue previamente definida en 3.1.2.

Cuadro 1					
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	
Valor eficaz de tensión nominal en kV	Máxima tensión de cebado según norma ASA, en kV cresta	Máxima tensión cresta de onda 1,2/50 que produce cebado en $1,2 \pm 0,2\mu\text{s}$, en kV	Valor eficaz de tensión de cebado a 50 Hz en kV	Máxima tensión residual, para ondas de corriente de impulso 8/20 μs en kV	
				5 kA	10 kA
120	350	290	200	240	270
132	380	320	220	260	290

La columna (2) indica la máxima tensión de cebado según normas ASA en kV cresta. Esta tensión es determinada aplicando al descargador una onda con una pendiente de 100 kV/ μs por cada 12 kV de tensión nominal.

La columna (3) se refiere al valor máximo de tensión que resulte de la aplicación de ondas de impulso 1,2/50 tal que produzcan el cebado en el rango de tiempo $1,2 \pm 0,2\mu\text{s}$ sobre la cresta de la onda.

La columna (4) da el valor eficaz de la tensión de servicio mínima que produce el cebado del explosor.

En la columna (5) se indican la máxima tensión residual para distintos valores de corriente de impulso de la forma 8/20 μs .

En algunos casos en lugar de los valores definidos en el Cuadro 1 se dan valores característicos similares dependiendo de cada fabricante.

3.1.4 Sobretensiones Internas

En general se trata que los descargadores no operen cuando son solicitados por sobretensiones internas. Para ello, es posible construir explosores adecuados, capaces de operar en presencia de variaciones rápidas y de mantenerse no conductores con variaciones lentas de tensión debidas a sobretensiones internas.

3.1.5 Selección

Los descargadores son seleccionados sobre la base de la tensión nominal (ver 3.1.2). Para asegurar una operación efectiva, su tensión nominal debe ser

mayor o igual que la más alta tensión de servicio fase-tierra que pueda aparecer en su punto de conexión.

Ejemplo: En el caso de una subestación de 132 kV en la que se supone:

- que el valor más alto de tensión de operación del sistema es de 145 kV.
- que el coeficiente de sobretensión de frecuencia industrial debido a variación de la carga es menor que 1,05.
- que el coeficiente de puesta a tierra es 0,8.

La máxima tensión de frecuencia industrial será: $145 \cdot 1,05 \cdot 0,8 = 122 \text{ kV}$

Por lo tanto se deberá elegir un descargador de una tensión nominal mayor que este valor, tal como 132 kV.

Una vez que la tensión nominal ha sido elegida, las condiciones de operación y el nivel de protección pueden ser determinados, y por lo tanto es posible fijar el nivel de aislación (BIL= Basic Insulation Level), para los equipos a proteger con un cierto margen por arriba del nivel de protección.

3.1.6 Condiciones de Operación

a) Determinación de la máxima corriente de descarga

Supongamos que una sobretensión de amplitud E_i viaja por la línea hacia la subestación, siendo Z_0 la impedancia característica de la línea. Después de producido el cebado del explosor el circuito equivalente de Thevenin será el indicado en la Fig.7.

En base al circuito de la Fig.7 se puede escribir, aproximadamente: $2 \cdot E_i = E_r + I_d \cdot Z_0$ (1)

Donde E_r es la tensión residual en los terminales del descargador para una corriente de descarga I_d .

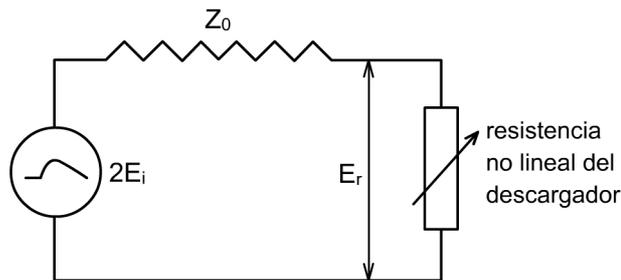


Fig. 7

Circuito equivalente de un descargador sometido a una sobretensión E_i que viaja por una línea de impedancia característica Z_0 después de producido el cebado

Conociendo la máxima E_i y la característica tensión-corriente del descargador, que relaciona E_r con I_d , se puede calcular por métodos gráficos la máxima corriente de descarga.

Ejemplo: En el caso de ser $E_i = 1300 \text{ kV}$ y $Z_0 = 400 \Omega$ y seleccionando un descargador cuya corriente admisible sea 10 kA, la construcción de la Fig.8

permite determinar los valores máximos tomados del Cuadro 1 y estos valores no se producen en general simultáneamente, como lo indica la Fig.4 por lo que la solución será solo aproximada.

El valor de I_d es de aproximadamente 6 kA, menor que la corriente admisible de la unidad elegida. Por lo tanto, la selección ha sido correcta.

En caso contrario se debe hacer el mismo procedimiento utilizado en cada caso la característica tensión-corriente de la unidad elegida.

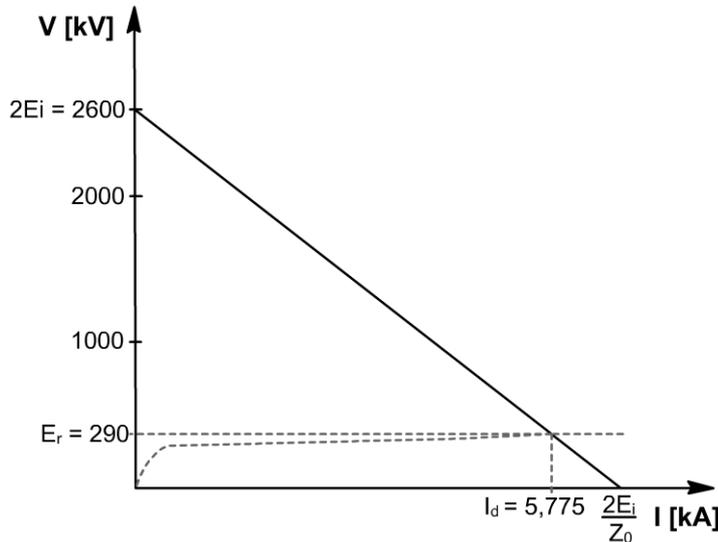


Fig. 8

Resolución gráfica del circuito equivalente de la fig. 7

b) Cálculo del nivel de protección (E_p)

Las definiciones del nivel de protección están dadas en el párrafo 3.1.1.

La máxima tensión que produce el cebado del explosor bajo condiciones de servicio (párrafo 3.1.1.a), se obtiene a partir de la pendiente del frente de la onda.

Ejemplo: Suponiendo que la sobretensión incidente es de 1300 kV (cresta) con una pendiente de 100 kV/ μ s por cada 12 kV de tensión nominal o sea con una onda de pendiente igual a 1100 kV/ μ s. Este valor tomado del Cuadro 1 es:

$$E_{p1} = 380 \text{ kV} .$$

Por otra parte considerando la definición 3.1.1.b, será:

$$E_{p2} = E_r + IR + L \frac{di}{dt} \quad (2)$$

Donde: E_r es el valor de la tensión residual.

I es la corriente de descarga

R y L son la resistencia y la inductancia del conductor de conexión entre el pararrayo y la línea.

En la práctica el término IR es despreciable, por lo tanto: $E_{p2} = E_r + L \frac{di}{dt} \quad (3)$

Ejemplo: Para una conexión de 5 m y una inductancia 1,3 μ H/m, será:

$$L = 6,5 \mu\text{H}$$

Conocido el valor de la corriente máxima de descarga, en nuestro caso 6 kA, y teniendo en cuenta que las ondas de corriente de descarga son del tipo $8/20 \mu\text{s}$

$$\frac{dI}{dt} \approx \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{5,775 \text{ kA}}{8 \mu\text{s}} = 0,72 \cdot 10^9 \frac{\text{A}}{\text{s}}$$

El valor de E_r determinado en base a la Fig.8 es $E_r = 290 \text{ kV}$. Luego reemplazando valores en (3) se obtiene:

$$E_{p2} = 290 \text{ kV} + 6,5 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot 0,72 \cdot 10^9 \frac{\text{A}}{\text{s}} \cdot 10^{-3} \approx 294,7 \text{ kV}$$

Considerando que el nivel de protección será el mayor valor en las tensiones halladas previamente resulta: $E_p = 380 \text{ kV}$

En base al valor de E_p suele fijarse el nivel básico de aislación (BIL) del equipo a proteger, en un 25% más alto que el nivel de protección (por lo tanto podría considerarse un BIL de 450 ó 550 kV en el ejemplo propuesto).

3.1.7 Localización de Descargadores

Como regla general, con el objeto de asegurar una mejor protección, los descargadores deben ser ubicados tan cercanos como sea posible a los aparatos que deben proteger. Sin embargo, en caso de existir un buen margen entre el nivel básico de aislación de los equipos y el nivel de protección, es posible tratar de colocar el descargador en el lado de la línea de los interruptores para proteger toda la estación. En estos casos, debido a los efectos producidos por ondas viajeras, la tensión a que están sometidos los equipos ubicados a cierta distancia del descargador puede resultar mayor que el nivel de protección E_p .

Para determinar tales efectos consideramos una sobretensión representada por una función rampa infinitamente creciente con una pendiente p [kV/ μs] que llega al descargador en el tiempo $t = 0$ y suponemos que éste opere en el tiempo T_c [μs] limitando la magnitud de la sobretensión en su punto de conexión a un valor E_p [kV] en todos los tiempos posteriores.

Caso A) Sea una línea que termine en un transformador, con un descargador conectado a una distancia x [m] de la terminación (Fig. 9)

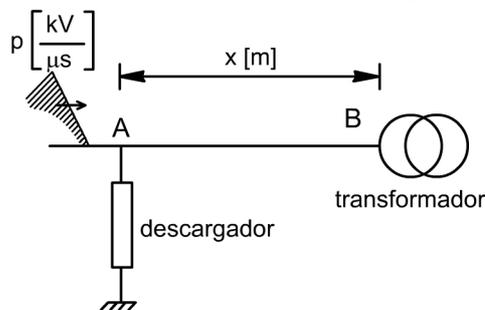


Fig. 9

Debido a los rápidos frentes de ondas que corresponden a las sobretensiones atmosféricas, el transformador debería ser representado por una capacidad C del orden de los nanofaradios.

Como el valor de C que hay que considerar es muy bajo supondremos el extremo B de la línea como un circuito abierto.

Por lo tanto el coeficiente de reflexión en el punto B, para una onda que viaja de A hacia B será $K_{AB} = +1$.

El descargador será un circuito abierto hasta el tiempo de operación T_c por lo que el coeficiente de reflexión $K = \frac{Z_R - Z_0}{Z_R + Z_0}$ para los tiempos comprendidos entre $t=0$ y $t=T_c$. A partir de ese instante se comportará como un cortocircuito dinámico por lo que será: $K_{AB} = 1$ para $t > T_c$ y $K_{BA} = -1$. Haciendo uso del diagrama *Lattice*, es posible determinar las tensiones de los puntos A y B (Fig.10).

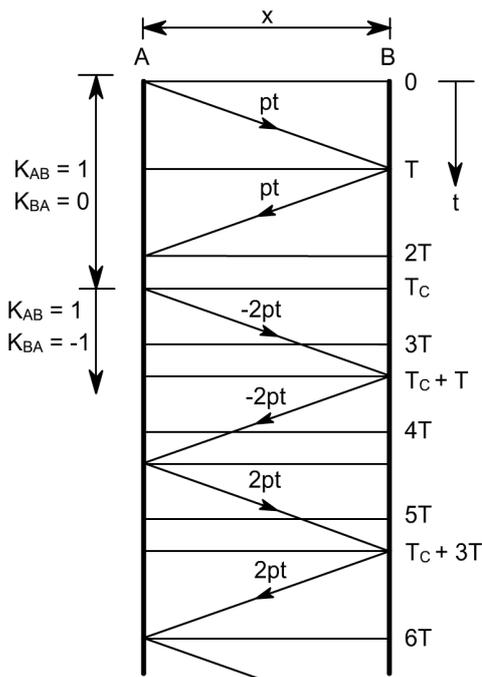
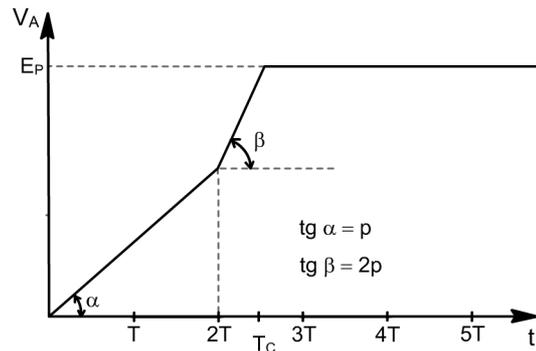


Diagrama "Lattice" del sistema de la Fig. 9 con: $T_c > \frac{2x}{v}$

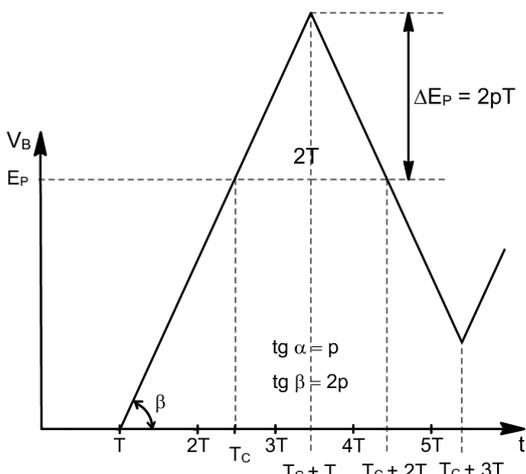
Fig. 10

T = tiempo que emplea la onda de velocidad v en recorrer la distancia x .
 T_c = tiempo de cebado del descargador
 p = pendiente de la onda incidente.
 K_{AB} = coeficiente de reflexión en el punto B, para las ondas que viajan desde A hacia B.
 K_{BA} = coeficiente de reflexión en el punto A, para las ondas que viajan desde B hacia A.



Tensión en los terminales del descargador

Fig. 11



Tensión en los terminales del transformador

Fig. 12

Las tensiones en los puntos A y B serán, de acuerdo al diagrama anterior, las indicadas en las Fig.11 y Fig.12, respectivamente.

La máxima tensión sobre el transformador es: $E_p + \Delta E_p$ con $\Delta E_p = 2 \cdot p \cdot T$. Siempre resulta $\Delta E_p < E_p$.

En el cálculo de las tensiones anteriores se ha supuesto que $T_c > \frac{2 \cdot x}{v}$, en caso

que esto no ocurra, o sea si $T_c < \frac{2 \cdot x}{v}$, el

diagrama *Lattice* y las tensiones y las tensiones en A y B son indicados en las Fig.13; Fig.14 y Fig.15 respectivamente

En la Fig.12, a partir del instante $T_C + T$ la tensión cae con pendiente $-2p$. Esto es debido a que en el punto B (vacío), $V_R = 2 \cdot V^+$ y como $V^+ = -2p \cdot T \therefore V_R = 2 \cdot (-2p \cdot T) = -4p \cdot T$

Y como también tenemos una V_R anterior que tenía una pendiente $2p$; la V_R final será: $V_{Rf} = V_{Ra} + V_R = 2p \cdot T + (-4p \cdot T) = -2p \cdot T$

Para demostrar que la tensión V_B para $t = T_c$ vale E_p , veamos cuanto vale V_A para ese mismo tiempo: $V_A / t = T_c = 2T \cdot p + 2p \cdot (T_c - 2T) = 2p \cdot (T_c - T) = E_p$

En igual forma calculamos $V_B / t = T_c = 2p \cdot (T_c - T)$, esta última expresión demuestra lo expresado anteriormente.

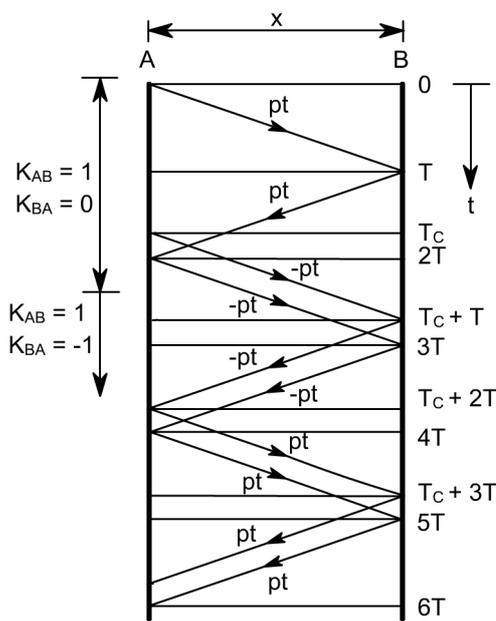


Diagrama "Lattice" del sistema de la Fig. 9 con: $T_C < \frac{2x}{v}$ Fig. 13

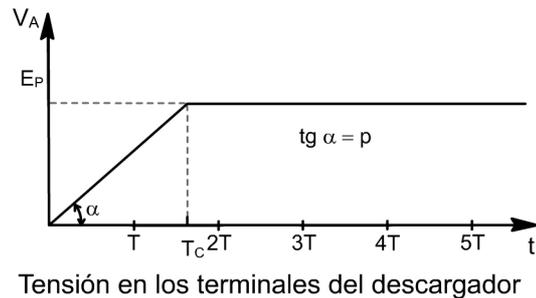


Fig. 14

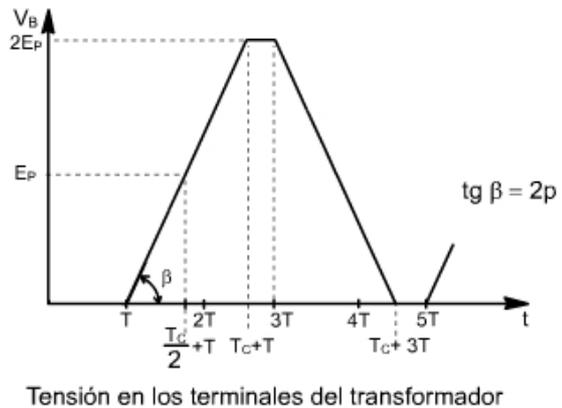


Fig. 15

Ya sea con $T_c > 2T$ o con $T_c < 2T$ la máxima tensión que puede aparecer sobre el transformador será $2 \cdot E_p$.

Caso B) Sea un descargador conectado entre dos equipos como indica la Fig.16

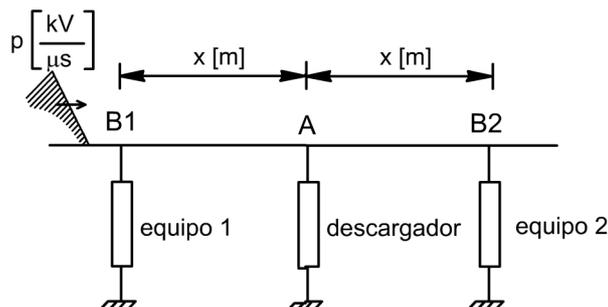


Fig. 16

El diagrama *Lattice* y las tensiones en los puntos B₁, A y B₂ se indican en las Fig.17; Fig.18; Fig.19 y Fig.20 respectivamente.

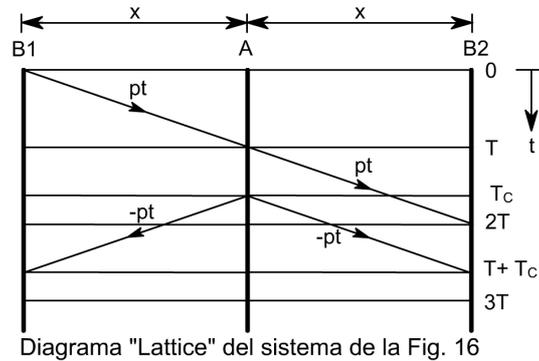


Fig. 17

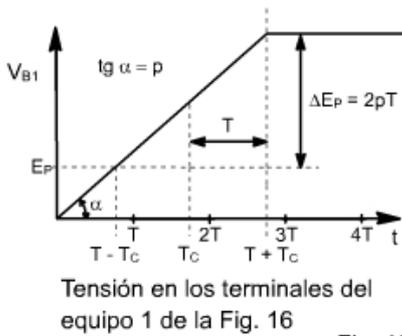


Fig. 18

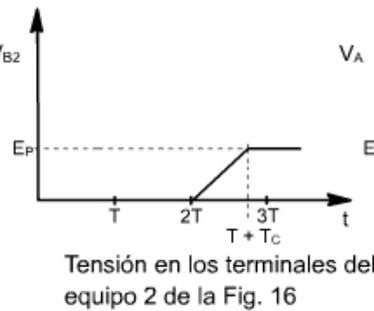


Fig. 19

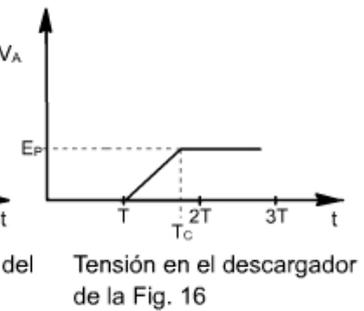


Fig. 20

La tensión en exceso de E_p aplicada sobre el equipo 1, será $\Delta E_p = 2 \cdot p \cdot T = 2 \frac{px}{v}$

Comparación:

Obsérvese en el caso A,. Cuando $T_c > \frac{2x}{v}$, la máxima tensión ($V_{B \text{ máx}}$) sobre los terminales del transformador será: $E_p + 2 \cdot p \cdot T$

Cuando $T_c < \frac{2x}{v}$ la máxima tensión resulta: $V_{B \text{ máx}} = 2 \cdot E_p$

En el caso B la máxima tensión ($V_{B1 \text{ máx}}$) sobre el equipo 1 es:

$V_{B1 \text{ máx}} = E_p + \Delta E_p = E_p + 2 \cdot p \cdot T$, donde ΔE_p no está limitado al valor E_p como en el primer caso.

Supongamos que debemos ubicar un descargador en un sistema reducido al caso A (Fig.10); donde se verifica que: $T_c > \frac{2x}{v}$.

Si se trata de proteger un transformador cuyo BIL es N [kV], el punto de conexión del descargador, debería estar dentro de una distancia x del equipo,

tal que se verifique que: $N = E_p + \frac{2px}{v}$, luego: $x = \frac{(N - E_p) \cdot v}{2p}$

Si se hubiese elegido un BIL de 550 kV, siendo la velocidad $v = 300(m/\mu s)$

$$\text{sería: } x = \frac{(550 - 380) \text{ kV}}{2 \cdot 1000 \frac{\text{kV}}{\mu \text{s}}} \cdot 300 \frac{\text{m}}{\mu \text{s}} \cong 25 \text{ m}$$

Por lo tanto el pararrayos debe ubicarse a una distancia menor de 25 m del equipo a proteger.

En el caso de haber seleccionado un **BIL** de 450 kV la distancia x se reduciría a aproximadamente 10 m.

4 Parámetros que influyen en el diseño de la protección de una subestación

Es necesario hacer un análisis de los parámetros que influyen en el comportamiento de la protección de una estación o subestación, a fin de describir posteriormente un método de diseño.

4.1 Sobretenión incidente

Tanto la pendiente como la magnitud de la onda incidente, tienen importancia en la determinación de la protección adecuada.

El valor de la pendiente influye en la tensión de cebado del descargador y en la distancia de separación entre éste y los elementos a proteger.

La magnitud de la tensión afecta al valor de la tensión residual.

Cuando el equipo a proteger (transformador) es tal que provoca una prolongación considerable del frente de la onda incidente (efecto capacitivo pronunciado) se modificará también la distancia de separación.

Supongamos que un rayo que incide sobre el hilo de guardia de una línea de transmisión, produzca en el punto de ubicación de la torre un potencial V_T sobre el tope de la misma y un potencial V_C sobre el conductor de fase tal que $V_C = C_n \cdot V_T$ donde C_n es el coeficiente de acoplamiento (Fig.21).

La tensión resultante a través de la cadena de aisladores será $V_T - V_C = V_T \cdot (1 - C_n)$

Cuando $V_T \cdot (1 - C_n)$ resulta mayor que el nivel de aislación V_A de la cadena, se produce el contorneo, estableciéndose la unión eléctrica entre los conductores de fase y de guardia a través del arco.

Suponiendo que ocurra el contorneo en el instante en que $V_T \cdot (1 - C_n) = V_A$ y que se desprece el efecto sobre la tensión debido al agregado de la impedancia característica del conductor de fase. Éste variará abruptamente su potencial hasta alcanzar el valor V_T (Fig.22)

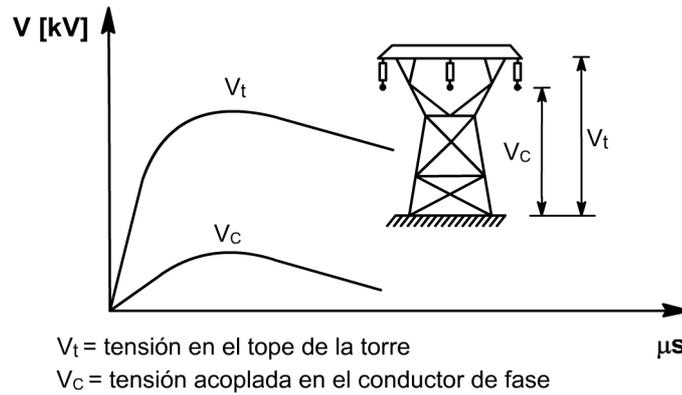
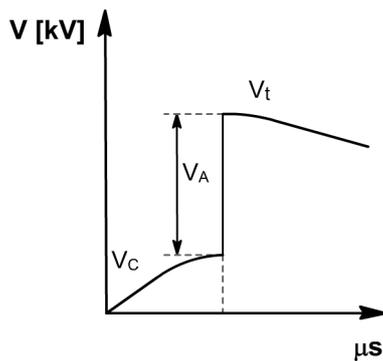
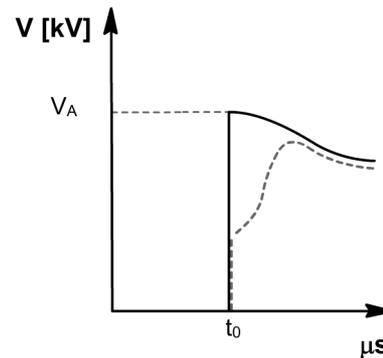


Fig. 21



Forma de onda de tensión en el conductor de la fase cuando se produce el contorno en $t = t_0$
 $V_A =$ nivel de aislación de la cadena de aisladores.
 $t_0 =$ tiempo en que se produce el contorno de la cadena de aisladores.

Fig. 22



Forma de onda que viaja por el conductor de fase

Fig. 23

Resulta así una onda de tensión que viajará por el conductor de fase hacia la subestación, siendo atenuada y distorsionada debido a dos fenómenos. En primer lugar la onda viajera existente sobre el hilo de guardia será de muy bajo valor después de haber recorrido dos o tres vanos, haciendo que la tensión debida al acoplamiento sea despreciable y por lo tanto la tensión a considerar es la indicada en la Fig.23. En segundo término debe tenerse en cuenta que la onda viajera sobre el conductor será atenuada y distorsionada por efecto corona. Esto puede notarse en la curva de trazos en la Fig.23. Tanto la distorsión como la atenuación de la onda viajera dependerán de la distancia a recorrer. De esta forma la magnitud y forma de onda que se suponga entrando a la subestación dependerá de cual sea la distancia entre ésta y el punto considerado como lugar de impacto del rayo sobre la línea.

Para su determinación es necesario fijar el número de años NA en que sea admisible una falla por ejemplo con $NA = 50$, estamos aceptando la posibilidad de que se produzca una falla en la protección en un período de 50 años. Suponiendo además que la línea que entra a la subestación está perfectamente blindada y que la cantidad de contorneos inversos es PC por km de línea y por año, existirá una distancia $D[\text{km}]$ tal que en ella se produzca 1 descarga en NA años de acuerdo al criterio de protección elegido.

$$D = \frac{1}{PC \cdot NA} \quad (6)$$

Ejemplo: Si $PC = \frac{1}{100}$ y $NA = 50$; resulta $D = 2$ km

Esta distancia D define lo que se denomina “zona a prueba de descarga”. En esta zona no es probable que en NA años se produzca más de una descarga que sea capaz de ocasionar un contorno inverso. Tal descarga originará sobretensiones con valores de pendiente y cresta elevados, para los cuales no ha sido diseñada la protección.

4.1.a) Estimación del valor de cresta de la tensión incidente (E_i)

E_i debe ser calculado en base a la más alta tensión que tenga una probabilidad pequeña pero significativa (por ej.: 0,2%) de ser resistida por la aislación de la línea, (E_m).

En ausencia de datos de laboratorio este valor E_m puede considerarse como el de la tensión cresta de onda de impulso 1,2/50 que tiene una probabilidad del 50% de producir contorno de la cadena de aisladores multiplicado por un factor 1,2. O sea: $E_m = 1,2 \cdot E \cdot 50\%$ (7)

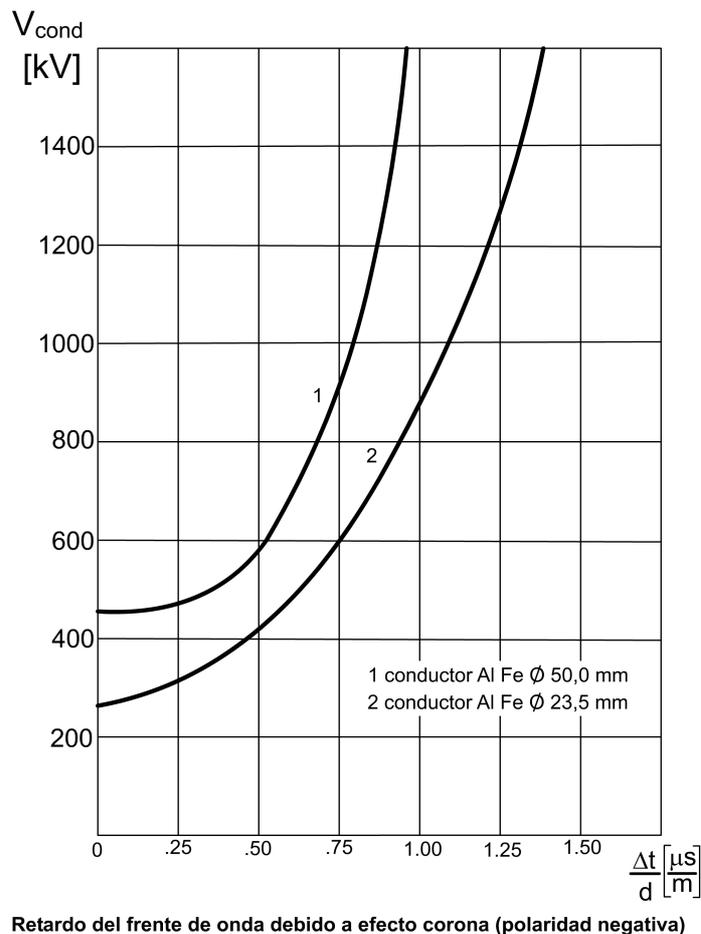


Fig. 24

Para tener en cuenta el efecto de atenuación sobre la onda viajera debido a las pérdidas de la línea puede usarse, por ejemplo, la fórmula de Foust y Meger:

$$E_i = \frac{E_m}{1 + K \cdot E_m \cdot d} \quad (8)$$

Donde: d : es la distancia que viaja la onda, en km, K : es un parámetro que varía entre $0,6 \cdot 10^{-4}$ y $4 \cdot 10^{-4}$ para diferentes líneas y condiciones en $(KV \cdot Km)^{-1}$, E_i y E_m : están dados en kV.

4.1.b) Estimación de la pendiente de la onda incidente (p)

Para determinar p es necesario tener en cuenta el retardo debido a corona que se produce durante el viaje de la onda. Este efecto puede ser considerado en base a las curvas de la Fig.24.

Para cada valor de tensión E_i se obtiene un valor de $(\Delta t/d)_i$, que multiplicado por la distancia de viaje d_i da el retardo Δt_i correspondiente a esa tensión. De esta forma se obtiene la onda incidente en la estación a partir de la onda en el punto de impacto y por lo tanto se obtiene su pendiente.

Como valor aproximado es posible hallar la pendiente como el cociente entre el valor de la tensión E_i determinada en 4.1.a) y el valor Δt que corresponde a esa tensión y a la distancia de viaje considerada. Esta pendiente estaría representada por la recta de puntos de la Fig.25.

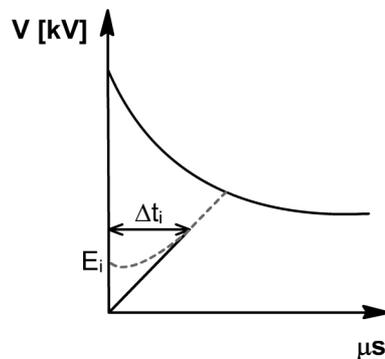


Fig. 25

Determinación de la pendiente aproximada de la onda incidente

4.2 Efecto de la capacidad de los transformadores

Como se considera que una función rampa $e = p \cdot t$ es la onda incidente en la estación, para obtener la respuesta con mayor exactitud es necesario considerar la capacidad C que el transformador presenta a ese tipo de sobretensiones.

En tal caso la onda reflejada estará dada por $e_r = p \cdot \left[t - 2 \cdot Z_0 \cdot C \left(1 - e^{\frac{-t}{Z_0 \cdot C}} \right) \right]$

en donde:

Z_0 : Impedancia característica de la línea por la que viaja la onda incidente.

C: Capacidad que representa al transformador

La onda e_r es inicialmente negativa, de tal forma que al llegar al punto de conexión del descargador retarda el cebado del explosor, lo cual permite que se presenten mayores tensiones sobre el transformador.

Generalmente el efecto de la capacidad produce un incremento de tensión del orden de 10 a 20% en el transformador.

4.3. Nivel de aislación de los transformadores

La tensión que aparece en los terminales del transformador no es una forma de onda estándar; es decir, no corresponde a formas de ondas del tipo 1,2/50 μs usadas en los ensayos.

Es común considerar que la sobretensión máxima debe limitarse al nivel básico de aislación (**BIL**) del transformador.

En la mayoría de los ensayos la forma de onda que aparece sobre el transformador es del tipo oscilatorio, y su primer ciclo es aproximadamente equivalente a una onda cortada. En base a estas consideraciones en algunos casos se limita la sobretensión máxima admisible a la del nivel de tensión de ensayo con onda cortada (1,15 BIL).

En general se considera que para sobretensiones en el transformador con tiempos de cresta menores que 3 μs , el límite máximo de tensión es 1,15 BIL y para mayores que 3 μs se considera el BIL.

Existen otros métodos que consideran el efecto de formas de ondas no estándar.

4.4. Consideración del efecto producido al tener en cuenta mayor número de líneas entrando en la subestación

En subestaciones a las que arriban más de una línea hay dos efectos que deben ser tenidos en cuenta: en primer lugar las ondas de sobretensión que llegan por una línea, sufren una reflexión menor al encontrarse con las otras, disminuyendo por lo tanto la amplitud y la pendiente de la sobretensión resultante en la subestación, en segundo término el mayor número de líneas recoge una mayor cantidad de rayos incrementando la posibilidad de que se produzcan contorneos cercanos a la subestación.

5. Proceso paso a paso para el diseño de la protección de una subestación

A) Determinar la sobretensión incidente

A.1) Fijar un criterio de protección, es decir el número de años NA en que se admite una falla, y determinar la distancia D que define la zona a prueba de descargas. (4.1).

A.2) Examinar la aislación de línea en la zona a prueba de descarga y determinar la máxima tensión de impulso (E_m) que pueda viajar hacia la subestación. Determinar los valores de E_i (kV) y de la pendiente p (kV/ μs) de la sobretensión afectada por la atenuación y distorsión producida por corona

después de haber viajado a través de la zona a prueba de descargas (4.1.a) y (4.1.b).

B) Selección del descargador

B.1) Determinar la máxima tensión fase-tierra a la frecuencia de servicio que puede aparecer en el punto de instalación del descargador.

B.2) Seleccionar un descargador cuya tensión nominal sea la más cercana, por exceso, al valor determinado en B.1)

B.3) Determinar el valor pico de corriente I_d que circulará por el descargador (3.1.6.a) y elegir dentro de los de tensión nominal seleccionada aquel que sea capaz de admitir la corriente I_d .

B.4) Hallar el nivel de protección E_p de acuerdo a (3.1.6.b).

C) Seleccionar el nivel de aislación (BIL) del transformador

C.1) Seleccionar un BIL mayor que E_p para asegurar un margen de seguridad del orden del 20% y para tener en cuenta el efecto de separación (3.1.7) y el efecto de la capacidad del transformador (4.2).

D) Determinación de la zona de protección del descargador para el lado del transformador

D.1) Simplificar el esquema de la subestación para que sea posible asimilarla a una sola línea y un solo transformador (Fig.9) esto coincide frecuentemente con el peor caso. En este paso se desprecian las capacidades de todos los elementos.

D.2) Calcular la máxima distancia de separación permisible x , de acuerdo a (3.1.7), teniendo en cuenta el margen de seguridad que se indica en C.1).

D.3) Seleccionar una localización inicial para el descargador, tal que esté a una distancia menor que la calculada en D2 de los terminales del transformador. Todos los equipos entre el descargador y el transformador pueden tener el mismo BIL que éste.

E) Selección del BIL para los equipos instalados del lado de línea del descargador

E.1) Usando el esquema equivalente de una línea y un transformador (Fig.9) estimar la máxima tensión por arriba del nivel de protección en la entrada de la línea a la subestación.

E.2) Seleccionar un BIL para los equipos del lado de línea del descargador.

E.3) Considerar si son necesarios elementos de protección adicionales del lado de línea.

F) Comportamiento frente a sobretensiones internas

F.1) Verificar el comportamiento del descargador frente a sobretensiones internas.

F.2) Determinar si los equipos con el BIL seleccionado son adecuados para las sobretensiones internas esperadas.

G) Recalcular las sobretensiones en base a ubicación previamente seleccionada de los descargadores.

G.1) Incorporar la capacidad del transformador (4.2) dentro del esquema de Fig.9 y usando un diagrama "Lattice" determinar el crecimiento de la tensión por arriba de E_p .

Si este excede de $2 \cdot p \cdot T$ en un valor mayor que el margen permitido en D.2), elegir un nuevo BIL para el transformador, o variar la posición del descargador, o rediseñar la línea a fin de extender la zona a prueba de descargas.

G.2) Usando los máximos valores finales de E_p y p , calcular con toda la exactitud posible la más alta sobretensión en todos los puntos clave de la subestación. Para ello deben tenerse en cuenta los siguientes factores: la capacidad de todos los equipos de la subestación, las diferentes impedancias de onda de todas las líneas que lleguen a la subestación, atenuación de las ondas viajeras dentro de la subestación debido a corona, más exacta representación de la característica no lineal del descargador.

En caso de ser necesario, reseleccionar el BIL de los equipos, reubicar o instalar otros descargadores o extender la zona a prueba de descarga.

Los cálculos indicados en G.2) son en general muy complejos y se justifican en caso de requerirse extrema seguridad en la protección del sistema.

Varios métodos simplificados permiten un cálculo manual. Sin embargo el uso de computadoras digitales está desplazando los métodos anteriores.

6. Ejemplo numérico

Consideremos una subestación con un solo transformador de 30 MVA, alimentado por una línea aérea de 132 kV. La más alta tensión de servicio es de 145 kV, el coeficiente de puesta a tierra es 0,8 y el coeficiente de sobretensión a frecuencia industrial debido a variación de carga es 1,05.

Un esquema preliminar de la estación muestra que los descargadores no pueden ser conectados a una distancia menor que 30 m desde el transformador y la longitud eléctrica total desde la entrada de la subestación hasta el transformador es de 60 m.

La longitud de los conductores de conexión de los descargadores es de 8 m.

La línea aérea tiene 9 aisladores del tipo de disco $10 \times 5 \frac{3}{4}$ ", el diámetro de los conductores es de $\Phi = 23,5$ mm, la impedancia de onda es 400Ω y el número probable de contorneos por cada 100 km y año es de 1,2.

Utilizando el método paso a paso explicado en 5, será:

A)

A.1) Fijamos el criterio de protección de 1 falla en 100 años.

$$\Phi = 23,5 \text{ mm} \quad Z_0 = 400 \Omega \quad NA = 100 \text{ años} \quad PC = 0,012 \text{ contorneos/km} \cdot \text{año}$$

$$D = \frac{1}{PC \cdot NA} = \frac{1}{0,012 \cdot 100} \cong 0,8 \text{ km}$$

A.2) La tensión de contorneo 50% para 9 aisladores es de aproximadamente 850 kV. Entonces elegimos: $E_m = 850 \cdot 1,2 = 1020$ kV.

Usando la fórmula de Foust y Meger con $k = 10^{-4} \left[\frac{1}{\text{kV} \cdot \text{km}} \right]$

$$E_i = \frac{1020}{1 + 10^{-4} \cdot 1020 \cdot 0,8} \cong 945 \text{ kV}$$

Haciendo uso de las curvas de la Fig.24, entrando en ordenadas con el valor de $E_i = 945 \text{ kV}$ y utilizando la curva correspondiente a la polaridad negativa y a

$$\Phi = 23,5 \text{ mm}, \text{ se obtiene: } \frac{\Delta t}{d} = 1,05 \frac{\mu\text{s}}{\text{km}}$$

El tiempo de crecimiento, después de recorrer la distancia $D = 0,8 \text{ km}$ será:

$$\Delta t = 1,05 \frac{\mu\text{s}}{\text{km}} \cdot 0,8 \text{ km} = 0,84 \mu\text{s} \text{ y la pendiente: } p \left[\frac{\text{kV}}{\mu\text{s}} \right] = \frac{E_i}{\Delta t} = \frac{945 \text{ kV}}{0,84 \mu\text{s}} \cong 1080 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}$$

B)

B.1) Máxima tensión de 50 Hz = $145 \text{ kV} \cdot 1,05 \cdot 0,8 \cong 122 \text{ kV}$.

B.2) Se elige un descargador de tensión nominal de 132 kV.

B3 y B4) Como valor aproximado de corriente pico de descarga puede

$$\text{considerarse: } I_d = \frac{2 \cdot E_i}{Z_0} = \frac{2 \cdot 945}{400} \cong 4,7 \text{ kA}.$$

De acuerdo al el cuadro 1, se determina el valor de tensión residual $E_r = 260 \text{ kV}$ que corresponde a 5 kA.

Suponiendo el tiempo de frente de corriente de $8 \mu\text{s}$, se obtiene: $\frac{\Delta I}{\Delta t} = 0,6 \cdot \frac{\text{kA}}{\mu\text{s}}$

$$L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 8 \text{ m} \cdot 1,3 \frac{\mu\text{H}}{\text{m}} \cdot 0,6 \frac{\text{kA}}{\mu\text{s}} = 6,3 \text{ kV} \quad E_{p2} = 266 \text{ kV}$$

Por otra parte la tensión de cebado correspondiente a una pendiente de $1100 \text{ kV}/\mu\text{s}$, muy próxima a nuestro caso es de acuerdo al cuadro 1:

$$E_{p1} = 380 \text{ kV}$$

El nivel de protección será: $E_p = E_{p1} = 380 \text{ kV}$ por ser: $E_{p1} > E_{p2}$

C) Seleccionamos un BIL de 550 kV para el transformador.

D) La máxima distancia de separación (m), considerando un margen de seguridad del 10% para la instalación será:

$$\text{m} = \frac{[(550 - 55) - 380] \text{ kV} \cdot 300 \frac{\text{m}}{\mu\text{s}}}{2 \cdot 1080 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}}} \cong 16 \text{ m}$$

Si como valor resistido por la aislación tomamos el nivel de ensayo de onda cortada ($550 \text{ kV} \cdot 1,15$), obtenemos una distancia de separación de 25 m.

Ninguno de los valores satisface las condiciones del problema. Por lo tanto debe elegirse un mayor BIL para el transformador. Consideremos un BIL de 650 kV. Este valor da un mds de, aproximadamente, 30 m.

E) la máxima tensión V en el punto de entrada de la línea a la subestación (30 m desde el descargador) será:

$$N = E_p + \frac{2p \cdot x}{V} \quad V = 380 \text{ kV} + 2 \cdot \frac{1080 \frac{\text{kV}}{\mu\text{s}} \cdot 30 \text{ m}}{300 \frac{\text{m}}{\mu\text{s}}} \cong 600 \text{ kV}$$

Si se elige para los equipos del lado de línea del descargador el mismo BIL que para el transformador, la protección está asegurada.

También se podrá variar el criterio de protección o rediseñar el último tramo de línea que llega a la subestación, para obtener un menor BIL para los equipos. La elección entre estas posibilidades es por supuesto un problema económico.

F) Del catálogo del descargador se obtiene el valor de la tensión de cebado para sobretensiones internas. Un valor típico para el descargador es: $V_e = 312 \text{ kV}$.

Esto corresponde a un factor de sobretensión : $F_s = \frac{312}{145 \cdot \sqrt{2}} \cdot \sqrt{3} = 2,6$

Por lo tanto, es poco probable que se produzca la operación del descargador para sobretensiones internas.

G) En caso de requerirse extrema seguridad de protección se justificaría hacer uso de un programa de cálculo digital a fin de relacionar los dos valores en juego con mayor precisión.