

Boletín 86

PUESTA A TIERRA

**LINEAS DE
TRANSMISION Y
DISTRIBUCION**

Boletín técnico N°86

PARTE 3

Ing. Gregor Rojas

Caracas - Venezuela

LINEAS DE TRANSMISION Y DISTRIBUCION PUESTA A TIERRA

PARTE 3

Por:

Ing. Gregor Rojas
GERENTE NACIONAL
MERCADERO Y VENTAS
División materiales eléctricos

Generalidades.

Las líneas de transmisión y distribución eléctricas transportan y distribuyen la energía eléctrica, se dividen en líneas de transmisión aéreas y líneas de transmisión subterráneas.

Las líneas aéreas son el tema abordado en este boletín técnico, están constituidas por conductores en el aire apoyados en estructuras metálicas denominadas torres y sujetas por medio de aisladores. El aislamiento entre conductores lo proporciona el aire y el aislamiento entre los conductores y tierra se obtiene por medio de las cadenas de los aisladores.

Para comprender lo que trataremos es este boletín es recomendable haber consultado el boletín técnico 84 donde se abordaron tópicos referidos al aislamiento y sobre las cadenas de aisladores, entre otros.

Dentro de este sistema la parte más vulnerable es la línea de transmisión, debido al efecto de las descargas atmosféricas que producen el mayor porcentaje de interrupciones de servicio, esto implica que las líneas pierdan continuidad en el suministro, reflejándose en los índices de confiabilidad del sistema.

Un sistema de tierras para líneas de transmisión es un conjunto de conductores, apartarrayos, electrodos, accesorios, etc, que interconectados eficazmente tienen por objeto conectar a tierra las cubiertas y otras partes metálicas de los equipos eléctricos, así como aquellos elementos de los

circuitos que lo requieran y que resultan altamente expuestos a descargas y sobretensiones peligrosas.

c) Combinación de cables y electrodos de contrapeso.

Los métodos básicos para reducir la resistencia de puesta a tierra en líneas de transmisión son las conexiones de cables y electrodos como sigue:

- ❑ El uso de barras copperweld para la conexión a tierra de 19 mm de diámetro y 2,4 m de longitud, enterradas verticalmente, conectadas con tramos cortos de conductores y además unidas a las patas de las estructuras.
- ❑ El empleo de cables de contrapesos, los cuales consisten de uno o varios conductores enterrados horizontalmente en zanjas que pueden tener una profundidad entre 40 a 50 cm dependiendo de las características del terreno, unidos a las bases de la estructura de la torre preferiblemente mediante soldadura exotérmica para garantizar la conexión, sin que esto sea una condición limitante, puede ser empleado otro método de empalme.

Como hemos mencionado anteriormente, desde el punto de vista práctico el método más utilizado para reducir el valor de la resistencia a tierra en líneas de transmisión es el uso de contrapesos.

De acuerdo a la norma IEEE 1243 la instalación de un contrapeso es otro método para aumentar el área de contacto de un sistema de puesta a tierra con la tierra. Como hemos tratado en el boletín anterior el contrapeso es un conductor enterrado en el suelo que va paralelo o en ángulo con los conductores de línea. Puede considerarse un electrodo horizontal en comparación con el electrodo vertical conformado por una varilla o barra copperweld enterrada.

Las configuraciones comunes o arreglos incluyen uno o más cables radiales que se extienden desde

la base de cada torre, cables continuos simples o múltiples que se extienden de torre a torre o combinaciones de radial y continuo.

El efecto del contrapeso a veces se puede aumentar con la colocación de varillas o barras de puesta a tierra enterradas periódicamente a cierta distancia.

Una corriente de sobrevoltaje, cuando se aplica a un solo contrapeso, inicialmente contrarresta la impedancia de sobrevoltaje del conductor que es de aproximadamente 150 W. El sobrevoltaje viaja a lo largo del conductor a 1/3 de la velocidad de la luz o a 100 m/ms.

A medida que la corriente alcanza recorrer una mayor parte del conductor, utiliza efectivamente una mayor parte del área de contacto con la tierra. Por tal motivo, la impedancia disminuye con el tiempo y alcanza un valor de estado estable cuando la corriente se distribuye a lo largo de toda la longitud del contrapeso. La resistencia de contacto de estado estable se puede calcular como sigue:

$$R = \frac{\rho}{\pi s} \left(\ln \left(\frac{2s}{\sqrt{4rd}} \right) - 1 \right)$$

Dónde:

r es el radio del alambre en (m);
d es la profundidad de enterramiento en (m);
s es la longitud del contrapeso (m) y $s \gg d$.

La resistencia de contacto en estado estacionario no está muy influenciada por r ni por d. La profundidad de enterramiento habitual para un contrapeso es de aproximadamente 0,5 m a 1 m.

Para un contrapeso de 20 mm de diámetro y 100 m de largo, aumentar la profundidad de enterramiento de 0,5 m a 1,5 m reduciría la resistencia en menos del 9 %. La elección de una

sección transversal de pletina ancha y delgada, en lugar de un cable circular grande, puede reducir los efectos inductivos hasta en un 15% y puede aumentar el área de superficie expuesta al mismo tiempo.

Varios alambres cortos dispuestos radialmente pueden ser más efectivos que un solo alambre largo incluso si la longitud total y la resistencia de contacto de ambos son iguales. La impedancia de sobrevoltaje inicial de varios cables es menor y la resistencia de contacto de estado estable se alcanza antes.

Para poner a tierra el sobrevoltaje de una descarga atmosférica, los primeros 80 a 100 m de longitud del contrapeso son los más efectivos.

Dado que el contrapeso generalmente no se entierra o se entierra a poca profundidad, puede estar sujeto a robo y vandalismo, especialmente si el contrapeso está hecho de cobre. Se debe considerar la selección de un contrapeso con menos valor comercial, como el acero revestido de cobre, que también es considerablemente más difícil de destruir.

Las preocupaciones con la protección catódica del contrapeso y sus conexiones deben ser satisfechas. Estas preocupaciones particularmente son difíciles para las líneas HVDC, donde los componentes de cobre pueden acelerar la corrosión de los cimientos. Igualmente, una inversión similar en cables blindados adicionales puede ser más efectiva.

Este método de los contrapesos se recomienda emplear para los casos en que la resistividad del suelo es superior a 200 Ω -m. Estos contrapesos se caracterizan por poseer una impedancia inicial entre 150 y 200 Ω de impedancia característica.

Su comportamiento al impulso de la descarga atmosférica presenta esta impedancia inicial que va disminuyendo de manera exponencial

posteriormente a un tiempo aproximado de $1\mu s$, en la figura 24 se puede apreciar esta condición.

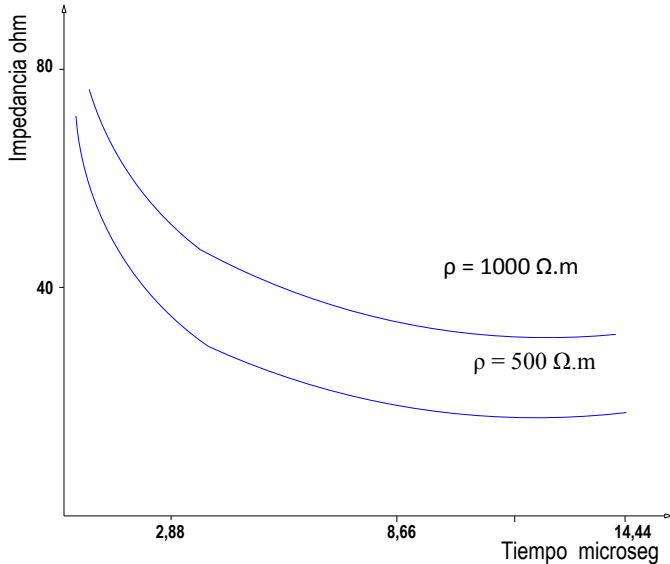


Figura 24. Comportamiento al impulso de la impedancia de los contrapesos

Transcurrido este tiempo la impedancia decrece a valores de la resistencia de conexión a tierra en estado estable.

Este comportamiento al impulso de la impedancia nos da las longitudes máximas efectivas para el diseño de contrapesos, por ejemplo, si consideramos una contrapeso de 50 m de largo y considerando un tiempo de viaje de la onda de corriente del rayo a $300\text{ m}/\mu s$, se tiene que en $1\mu s$ la onda viajará 300 m, seis veces la longitud de la contrapeso.

De este comportamiento, la longitud del contrapeso se puede limitar a valores característicos dependientes de la resistividad del terreno.

En la siguiente figura se muestra la relación entre la longitud eficaz de contrapeso y la resistividad del terreno:

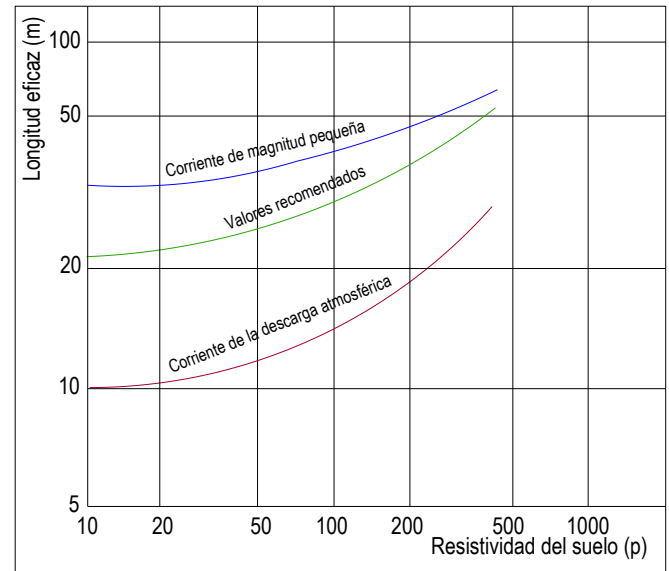


Figura 25. Relación entre la longitud eficaz del contrapesos y la resistividad del suelo

La longitud eficaz del cable de contrapeso deberá estar comprendida entre los 20 a 70 m y su multiplicidad entre 2 y 4.

El uso de contrapesos en torres de transmisión se puede resumir con las recomendaciones mostradas en la siguiente tabla y en sus figuras correspondientes.

| TABLA 3 Recomendación configuración de contrapesos | |
|---|--|
| Resistividad del suelo $\Omega\text{-m}$ | Configuración de contrapeso |
| < 300 | 2 contrapeso de 30 m de longitud en patas opuestas. (Figura 26) |
| 300 - 500 | 2 contrapeso de 45 m de longitud en patas opuestas. (Figura 26) |
| 500 - 1000 | 4 contrapesos de 30 m de longitud en patas opuestas. (Figura 27) |
| > 1000 | 4 contrapesos de 50 m de longitud (Figura 27) |

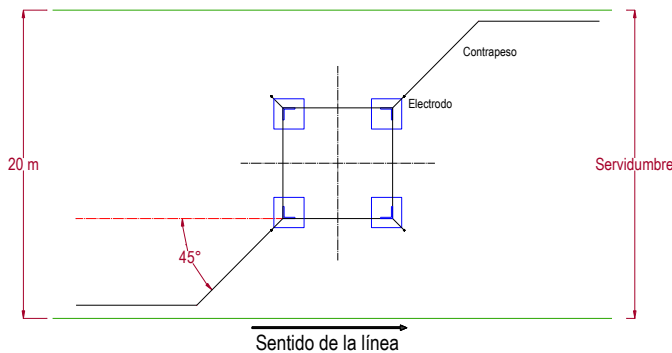


Figura 26. Configuración de 2 contrapesos

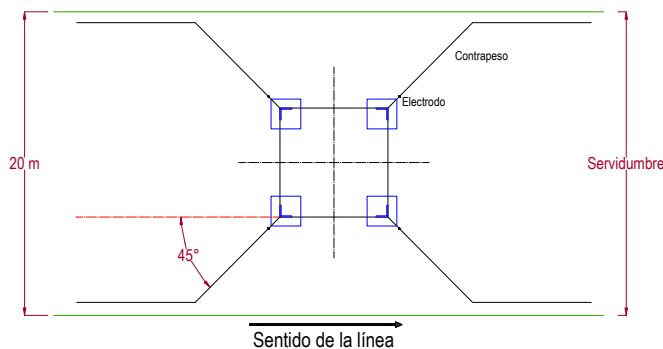


Figura 27. Configuración de 4 contrapesos

Cuando realizamos un arreglo de cables de contrapeso como el de la figura (g) (figura 6) y aún no se obtiene un valor de resistencia de puesta a tierra aceptable, se procede a enterrar electrodos de contrapeso o barras copperweld que en combinación con el cable de contrapeso mejorara estos valores de resistencia.

El colocar varios electrodos de contrapeso en paralelo es una forma muy efectiva de bajar la resistividad del terreno donde se encuentra la torre. Sin embargo, las barras copperweld o electrodos de contrapeso no deben ser colocadas muy próximas una de otra, porque cada barra afecta la impedancia del circuito, por los efectos mutuos.

El CEN en su sección 250.53. (B) establece que la distancia entre electrodos, no debe ser menor de 1,8 m, no obstante, se recomienda que estén separadas una distancia mayor a su longitud.

Por ejemplo, dos barras copperweld en paralelo a 3 metros de distancia ofrecen una resistencia del 60% de la resistencia a tierra de una sola de ellas. Sin embargo, si incrementamos ese espaciamiento a 6 m, la reducción de la resistencia que obtenemos sería del 50%.

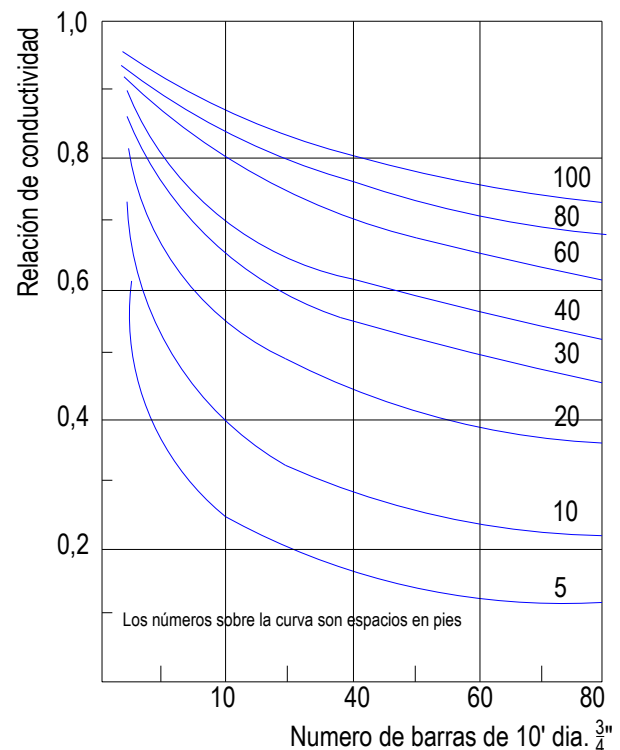


Figura 28. Relación de conductividad de barras de tierra en paralelo

Cuando se emplean varias barras copperweld o electrodos de contrapeso, la impedancia es mayor y cada electrodo adicional no contribuye con una reducción proporcional en la resistencia del circuito. Por ejemplo, dos varillas reducen la resistencia al 58% de una sola, mientras que 10 barras copperweld apenas reducen ese valor al 10 %.

En la fórmula siguiente la resistencia neta R_n para n electrodos está determinada por la resistencia de un solo electrodo R . Este es un valor aproximado que considera que las barras copperweld o electrodos están espaciadas por una distancia equivalente al diámetro del cilindro protector.

$$R_n := \frac{R}{n} \cdot [2 - e^{-0.17 \cdot (n-1)}]$$

Y representa el decaimiento de la capacitancia asociada con la propagación en la tierra.

d) Aplicación de sal y carbón

La aplicación de sal en sistemas de puesta a tierra fue una práctica muy utilizada hasta hace muy poco tiempo, partiendo de que disminuía la resistencia del suelo, no obstante, es una solución transitoria, porque al pasar el tiempo el agua va lavando la sal y por consiguiente se va incrementando progresivamente la resistencia del terreno.

Para evitar el evento de pérdida del componente sal en el sistema de puesta a tierra, se adiciona la sal al terreno en combinación con carbón de origen vegetal, esto con el objeto de aprovechar la propiedad que posee este último de absorber el agua salada y retenerla.

Es importante tener presente, que posterior a una descarga, parte del agua salada absorbida por el carbón se termina secándose y el carbón cada vez absorbe más agua, motivo por el cual el carbón tendrá agua menos salada. Adicionalmente, a la larga y debido a la misma humedad, el carbón se desintegrará permitiendo que se disipe la sal.

Es una práctica equivocada emplear carbón mineral porque este no absorbe o no retiene el agua salada, solo sería tratar de mejorar la resistividad del suelo agregando pequeños trozos de material conductor.

El carbón es mucho más problemático, incluso existe normativas que prohíben el uso de carbón para aterramiento. Esto se debe a que el carbón no es puro, siempre hay rastros de otras químicas. Especialmente notable son los sulfatos que siempre dejan sus trazas, aunque pequeñas, tales trazas combinan químicamente con el acero, dando como resultado la oxidación rápida de las barras copperweld o jabalinas de acero que puede conducir a la desaparición de la barra copperweld o electrodo en pocos años.

Tenga en cuenta que estos electrodos no están a la vista, por ende no podemos saber cuánto de su electrodo estará en contacto con el suelo.

Las barras copperweld son barras de acero recubiertas por una película de cobre con un cierto espesor, para su aplicación generalmente son clavadas, el proceso de clavarlas hace daños al recubrimiento de cobre. Nuestra recomendación es cavar el pozo en vez de clavar la jabalina.

La adición de sal y carbón vegetal tienen además la desventaja de que cuando es una zona altamente rocosa es prácticamente imposible su aplicación.

Otra desventaja de la aplicación de sal como componente para disminuir la resistencia de puesta a tierra se presenta cuando existen electrodos de hierro, debido a su contribución a su corrosión, especialmente en terrenos ácidos.

Hemos visto el uso de sal y carbón en la mayoría de instalaciones de barras copperweld. Las sales más comunes para mejorar el sistema de puesta a tierra son:

- Sulfato de magnesio
- Sulfato de cobre
- Cloruro de calcio
- Cloruro de sodio o sal de mesa

- ❑ Nitrato de potasio.

Existen dos inconvenientes con el empleo de sal que no están vinculados con la corrosión del electrodo o barra copperweld a saber:

- ❑ La sal va a filtrar con el tiempo y la lluvia, lo que implica que se tiene que reponer la sal para la vida del sistema de puesta a tierra, quizás dos o tres veces por año.
- ❑ Varios países no permitan poner sal u otras químicas en pozos, por ser una fuente de contaminación. Nuestra recomendación es usar sal con cuidado con el uso de barras copperweld.

e) Adición de bentonita

La bentonita es una arcilla consistente en el mineral montmorillonita, un silicato de aluminio y tiene la particularidad de absorber hasta cinco veces su peso de agua y de hincharse hasta 13 veces su volumen seco, posee una resistividad de 2.5 ohm-m con humedad del 300%.

La bentonita geológicamente es uno de los más puros minerales de arcilla, como comentamos con anterioridad su principal componente es la montmorillonita llegando al 80%, determinando sus propiedades fundamentales.

La utilización de bentonita como un agregado al terreno en que se construye la puesta a tierra es un método empleado en casos extremos cuando el tipo de suelo es altamente rocoso, arenisco o volcánico y no es posible el uso de métodos convencionales, o cuando por medio de estos no es posible valores satisfactorios de puesta a tierra.

Lo más importante de la estructura de la montmorillonita es que está formada por tres planos de mallas. Estos planos elementales se superponen paralelamente y forman una especie de tejido de capas.

Entre estos tejidos de capas hay espacios vacíos llamados huecos intercrystalinos. Estos huecos tienen la propiedad de absorber diversas sustancias, en especial el agua. Por lo anterior se concluye que para nuestro caso, la propiedad más importante de la montmorillonita y por ende de la bentonita, es la facilidad intercrystalina de dilatación.

Otra propiedad de la montmorillonita es la permeabilidad de los poros y espacios intercrystalinos. Con la absorción de humedad cambia el volumen y la forma exterior de las partículas. Este aumento de volumen disminuye la permeabilidad de los poros de modo que se retiene la humedad por la estructura cristalina formada.

Básicamente el procedimiento de mejoramiento de puesta a tierra a base de bentonita, consiste en rellenar las grietas naturales y huecos que existen en el terreno mediante una masa que envuelve las partículas de suelo uniéndolas eléctricamente, formando así una gran superficie conductora de electricidad.

Si el terreno no presenta grietas o huecos naturales, es necesario producirlos artificialmente en la proximidad de la puesta a tierra. Estas grietas pueden producirse mediante pequeñas explosiones que no afecten la resistencia mecánica del terreno (la cantidad de explosivo dependerá de las propiedades de la roca).

Con esto se producen fisuras capilares extensas en la roca como consecuencia de la onda de choque producida y además por el sacudón que se produce simultáneamente.

La bentonita por ser una sustancia conductora de la electricidad, su utilización es muy apropiada como masa de relleno y unión, además protege a la puesta a tierra contra la corrosión.

Por lo anterior también se utiliza bentonita en suelos de baja resistividad específica, de acción corrosiva ácida en los que se pretende proteger el electrodo o conductor de tierra contra la corrosión (por ejemplo suelos con aguas subterráneas ácidas).

3. Valores de resistencia a tierra

Según las normas generales para proyectos de líneas de transmisión a 230 KV y 115KV de CORPOELEC la resistencia de puesta a tierra de cada estructura o torre no debe superar los 20 ohm.

Se hace necesario medir la resistividad del suelo con anticipación previo al diseño de las estructuras o torres de las líneas de transmisión a objeto de poder realizar el diseño del sistema de puesta a tierra, para ello es recomendable emplear el método wenner.

| TABLA 4 | |
|---|---------------------|
| Aplicación | Valor máximo ohmios |
| Torres de líneas de transmisión | 20 |
| Subestación de alta y extra alta tensión | 1 |
| Subestación de media tensión poste | 10 |
| Subestación de media tensión uso interior | 10 |
| Protección contra rayos | 4-5 |
| Neutro de acometida baja tensión | 25 |
| Descargas electrostáticas | 25 |
| Equipos electrónicos sensible | 5 |

En el próximo boletín técnico trataremos sobre la medición de resistividad de suelos en detalle por el método de wenner para líneas de transmisión.

4. Puesta a tierra suplementaria

Para la norma IEEE 1243 la construcción inherente de la torre de transmisión puede resultar en una superficie sustancialmente de acero de la

torre, rejillas y armazón de refuerzo de los cimientos en contacto con la tierra.

Las armazones de refuerzo de los cimientos deben ser eléctricamente continuas y estar unidas a la estructura propia de la torre para lograr este efecto deseable. Si no se hace esto, se pueden producir daños estructurales cuando se produzcan impactos por descargas atmosféricas.

En los casos en que el diseño básico no brinde una resistencia satisfactoria por sí solo, es posible que se requiera una conexión a tierra adicional de la torre o complementaria.

El electrodo de puesta a tierra más común es una varilla para tierra bien conocida como barra copperweld. Su resistencia se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$R = \frac{\rho}{2\pi s} \ln\left(\frac{2s}{r}\right)$$

Dónde:

- R es la resistencia (Ω)
- ρ es la resistividad de la tierra ($\Omega \times m$)
- s es la longitud de la varilla en contacto con la tierra (m)
- r es el radio de la barra en (m)

Mientras que aumentar el radio de la barra reduce la resistencia, aumentar la longitud hace un mejor uso de un volumen dado de metal. Aumentar el número de varillas en paralelo también es más efectivo.

Si las varillas o barras de puesta a tierra están muy juntas en comparación con su longitud, el electrodo se comporta como una barra con un diámetro aparente mayor y hay una pequeña reducción en la resistencia. A medida que aumenta el espacio entre las varillas, la resistencia combinada disminuye.

Para espaciamentos que son grandes en comparación con la longitud de las barras, la resistencia se reducirá en proporción inversa al número de barras.

Si la interconexión entre barras tiene buen contacto eléctrico con el suelo, esta actuará como cable de contrapeso, con los beneficios descritos anteriormente.

Tenga presente que en áreas rocosas es difícil obtener un buen contacto con la mayor parte de la superficie del cable. Aquí, la inductancia de la interconexión (típicamente es de 1 mH/m) comenzará a dominar la impedancia de los sobrevoltajes de las descargas atmosféricas, lo que generará rendimientos decrecientes.

El voltaje total del electrodo de puesta a tierra será la suma de la resistencia de la barra R_I y la inductancia de interconexión $L \, dl/dt$. Para un tiempo fijo de subida de 2 ms, el voltaje inductivo adicional por metro de interconexión equivaldría a una impedancia de 0,5 ohm.

Por lo anterior, no tendría mucho sentido proporcionar una barra de puesta a tierra de baja resistencia al final de un cable de 200 m, ya que la inductancia de la conexión tendría una impedancia de 100 ohm en serie con la resistencia de la barra para una descarga atmosférica típica.

En algunos casos, se puede obtener un mejor contacto con el suelo al rellenar la zanja donde estará enterrado el cable de contrapeso con concreto u otro material estabilizado de baja resistividad.

5. Impedancia de pie de torre

Cuando una descarga atmosférica impacta con una torre, una parte de la corriente viaja por la torre. El resto pasa a lo largo de los cables de guarda. Las fracciones iniciales a lo largo de estos dos caminos están determinadas por sus impedancias de sobrevoltaje relativas.

La corriente en la torre fluye a tierra en la base de la torre a través de la impedancia de la base de la torre. La caída de voltaje resultante y la magnitud de la onda de voltaje reflejada hacia arriba de la torre dependen directamente del valor de la impedancia de la base encontrada por la corriente.

El esfuerzo del voltaje a través de las cadenas de aisladores es la diferencia entre el voltaje de la torre y el valor instantáneo del voltaje de los conductores de fase. Un voltaje suficientemente alto puede provocar un flameo inverso del inglés backflashover. Dado que el voltaje de la torre depende en gran medida de la impedancia de la base, se deduce que la impedancia de la base es un factor extremadamente importante para determinar el rendimiento por descarga atmosférica.

La impedancia de la base de la torre depende del área del acero de la misma (o conductor de puesta a tierra) en contacto con la tierra y de la resistividad del suelo. Este último no es constante, fluctúa con el tiempo y está en función del tipo de suelo, del contenido de humedad, de la temperatura, de la magnitud de la corriente y de la forma de onda.

Habitualmente, el valor de baja frecuencia y baja corriente de la resistencia de la zapata se usa como entrada en los cálculos de rendimiento porque este valor puede medirse o calcularse fácilmente.

Los modelos de reducción de picos de complejidad variable para la ionización de la base se aplican luego a los datos básicos para estimar la magnitud del voltaje del aislador en las condiciones de pico de rayo.

6. Soluciones a las salidas de líneas

Aunque los cables de guarda proporcionan total protección a los conductores de fase contra las descargas atmosféricas directas, ocurren salidas

del servicio por flameos inversos que se deben a resistencias de puesta a tierra elevadas.

Para solventar esta dificultad surgen tres posibilidades:

- Incrementar el nivel del aislamiento de la línea
- Disminuir la resistencia de puesta a tierra.
- Colocar descargadores.

6.1 Incrementar el nivel del aislamiento de la línea.

Para aplicar la primera posibilidad de corrección, debemos partir de una selección óptima del aislamiento la cual debe ser hecha cotejando los dos factores:

- Fallas del apantallamiento
- Descargas disruptivas inversas.

Lo que conducirá a una correcta localización de los cables de guarda.

Si se trata de una línea existente es mas difícil aumentar el nivel de aislamiento con la colocación de mas aisladores debido a que se deben mantener distancias a la estructura que ya están calculadas.

6.2 Disminuir la resistencia de puesta a tierra.

Para aplicar la segunda posibilidad de corrección se requiere una adecuada selección de la puesta a tierra de las estructuras.

Para dar una idea de valores de puesta a tierra, podemos decir que: son muy buenos valores de 20 ohms o menos y que valores por encima de 50 o 60 ohms ya son preocupantes, para suelos altamente rocosos se pueden encontrar valores superiores a los 350 ohms. El método más común en nuestro medio para mejorar las puestas a tierra es la utilización de contrapesos.

Desde el punto de vista de respuesta transitoria, es mejor la utilización de varios cables de contrapeso con longitudes menores, a una cantidad reducida de cables de contrapeso con longitudes muy largas.

Según la deducción teórica de esta serie de boletines técnicos, se tiene que los primeros 60m de cables de contrapeso son los más efectivos. Con la combinación de cables de contrapesos y barras de puesta a tierra se obtienen casi siempre valores aceptables de puesta a tierra.

Recuerde que las resistencias de puesta a tierra obtenidas a partir de sal común y carbón vegetal, aumentan con el pasar del tiempo.

Para la obtención de valores de puesta a tierra en suelos altamente rocosos, está la opción de usar bentonita, que generalmente en dichos suelos permite construir puestas a tierra mejor y más económica que empleando los sistemas convencionales.

Para este sistema de puesta a tierra se debe tener presente que el comportamiento a altas frecuencias como es el caso de descargas atmosféricas requiere una especial atención como ya lo hemos analizado.

6.3 Colocar descargadores.

Para aplicar la tercera posibilidad de corrección se requieren los descargadores, esta es la opción mas conveniente porque aplica para líneas de transmisión existentes o por construir.

Generalmente los índices de salidas por descargas atmosféricas corresponden a un 50 a 70 % del total de salidas no programadas en líneas de alta tensión.

La reducción del índice de salidas puede ser alcanzada a través de algunas acciones sobre el proyecto si todavía es posible o en caso de líneas

ya en servicio por modificación de puestas a tierra, aumento de la aislación, instalación de descargadores en paralelo con las cadenas de aisladores o por la mejora del blindaje.

La aplicación de descargadores en líneas de transmisión es una opción que se ha manejado en todo el mundo para reducir el número de salidas de líneas debido a la acción de los rayos.

La protección de líneas contra salidas temporarias es cada día más relevante por la mayor necesidad de continuidad del servicio y confiabilidad de los sistemas.

Las salidas de líneas acontecen cuando una estructura o cable de guarda es alcanzado por una descarga atmosférica y la corriente de impulso que circula por la torre en ciertas condiciones, producen aumento del potencial entre la torre y las fases, que sobrepasa el voltaje soportable de las cadenas de aisladores, provocando el contorneo de la cadena aislante denominamos a este evento back-flashover.

Al flashover le sigue un cortocircuito fase-tierra que hace actuar las protecciones y salir la línea.

También son frecuentes las salidas por el impacto directo de rayos en los conductores de fase, en este caso en sistemas sin cable de guarda o por falla del blindaje.

También contribuyen para estas salidas la geometría de estas estructuras, la configuración de las cadenas de aisladores y por supuesto, la incidencia mayor o menor de descargas atmosféricas en la región

En regiones con suelos de resistividad más elevada, el problema se agrava sobre todo en el caso del backflashover, pues el potencial en la torre aumenta considerablemente, y es especialmente presente en las líneas de 220 kV.

La resistividad de suelo elevada también produce salidas en redes de voltajes más elevadas.

Los datos necesarios para predecir cómo será el comportamiento de una línea de transmisión en una determinada región son:

- ❑ Densidad de descargas a tierra (caídas de rayos a tierra por km² por año en la región de la LT),
- ❑ Datos de la geometría de la torre, cable de guardia y fases, impedancia de las puestas a tierra de las torres.

Con esta información y con herramientas de computación que permiten predecir el número de salidas de la línea de transmisión los más conocidos son el FLASH (EPRI) y el SIGMA (SADOVIC).

El valor que sirve de comparación sobre el número de salidas de es el denominado: Ak que se define como el número de salidas por 100 km de línea por año debidas a las descargas atmosféricas.

La aplicación de descargadores se presenta como una medida efectiva para mejorar el desempeño de las líneas de transmisión contra las descargas atmosféricas.

El análisis para la implementación debe basarse en la relación costo beneficio de la instalación de descargadores frente a los costos que acarrear las salidas de servicio (energía no suministrada, multas y costos sociales en algunos casos).

Para esta solución existen dos tecnologías que veremos en detalle en el próximo boletín técnico.