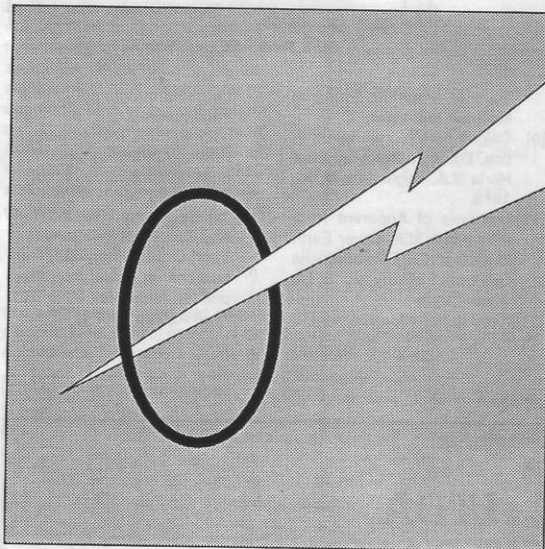


Programa para el diseño del apantallamiento efectivo en subestaciones

Artículo presentado en el "seminario de investigadores en Ingeniería de Alto Voltaje", Universidad Nacional de Medellín, Marzo 1993.



RESUMEN

Los sistemas de potencia están expuestos al impacto de descargas atmosféricas, las cuales son especialmente peligrosas para las subestaciones. Un apantallamiento efectivo es aquel que se diseña para proteger contra descargas que tengan una corriente de magnitud mayor o igual a la "corriente crítica". Corriente crítica es aquella que causa una sobretensión superior al voltaje crítico del aislamiento. El programa permite de una forma amigable diseñar el apantallamiento efectivo de una subestación.

1. INTRODUCCION

El procedimiento para diseñar el apantallamiento en subestaciones y líneas, se fundamenta en el modelo clásico electrogeométrico.

El apantallamiento se efectúa generalmente por medio de hilo guarda o por bayonetas ubicadas efectivamente, de modo que eviten la acción directa de descargas sobre los aislamientos. La altura efectiva del apantallamiento, es su elevación sobre el nivel del punto protegido.

Para el diseño del apantallamiento se requiere conocer valores de alturas, BIL, ICFO y calibre de conductores utilizados.

2. MODELO ELECTROGEOMETRICO

Gilman y Whitehead, desarrollaron un sistema analítico referido a un modelo electrogeométrico para deter-

□ Guillermo Aponte M., M.Sc.
Ingeniero Electricista
Profesor Titular, Laboratorio de Alta Tensión
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle

□ Ferley Castro A.
Ingeniero Electricista
Asistente de Docencia,
Laboratorio de Alta Tensión
Departamento de Electricidad
Universidad del Valle

minar la efectividad de los apantallamientos. En él se pretende que los objetos a ser protegidos sean menos atractivos a los rayos que los elementos apantalladores; ésto se logra determinando la llamada "distancia de descarga" del rayo a un objeto, cuyo significado es la "longitud del último paso de la guía de un rayo, bajo la influencia de un terminal que lo atrae ó de la tierra". La distancia de descarga determina la posición de la estructura apantalladora con respecto al objeto que se quiere proteger, tomando en cuenta la altura de cada uno respecto a la tierra. Dicha distancia está relacionada con la carga del rayo y por lo tanto con la amplitud de la corriente.

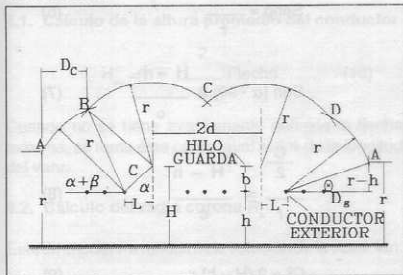


Figura N° 1: Modelo electrogeométrico

Para una configuración cualquiera con los conductores dispuestos horizontalmente tanto en líneas como en subestaciones, Figura N° 1., los arcos de círculo de radio r , son dibujados tomando como centro los hilos de guarda y de fase, r es también la altura de una línea horizontal paralela a la tierra; r esta definida para una corriente de impacto particular. En las subestaciones el conductor exterior corresponde al más próximo al apantallamiento de un campo.

Según el modelo, un rayo que se aproxima con una corriente igual a la que se empleó para construir los arcos, debe terminar en el hilo guarda si alcanza el arco entre B y C. Si alcanza el arco entre A y B terminará en el conductor del barraje. Más allá del punto A la descarga terminará en la tierra.

Mirando desde otro punto, la mediatriz de la recta que une la fase con el hilo guarda es el lugar geométrico de los puntos que equidistan de la fase y del hilo guarda. La parábola con foco en la fase es el lugar geométrico de los puntos equidistantes entre tierra y conductor de fase (Figura N° 2).

Irán al apantallamiento las descargas que produzcan rompiendo por encima de la recta mediatriz y el hilo guarda, y caerán sobre el conductor del barraje las que estén bajo esta recta y por encima de la parábola. Las descargas bajo la parábola caerán a tierra.

Para cada valor de corriente se presenta una zona

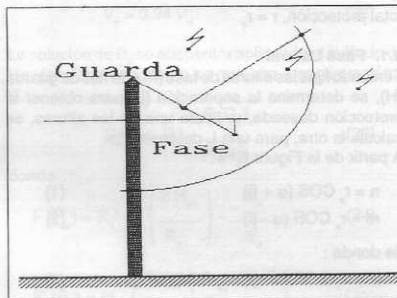


Figura N° 2: Descargas sobre un sistema apantallado

desprotegida, que corresponde al arco AB o a la distancia horizontal D_c .

Si se aumenta la corriente de la descarga, su distancia de rompimiento será mayor, disminuyéndose el área desprotegida por el apantallamiento, Figura N° 3.

La efectividad completa se obtiene cuando el punto de corte entre la recta y la parábola (B) corresponde con el valor de la distancia de rompimiento crítica a tierra o a la línea.

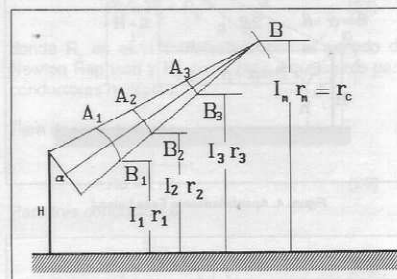


Figura N° 3: Descargas con diferentes magnitudes de corriente

Cuando ésto ocurre, el arco AB y la zona D_c desaparecen, eliminándose la zona desprotegida. Descargas con corriente superior a la crítica caerán sobre el apantallamiento o irán a tierra. Si la corriente es menor a la crítica, la ruptura podrá producirse en la zona comprendida entre la recta y la parábola, pudiendo así alcanzar el barraje. Esto último sin embargo, no ocasionará el flámo del aislamiento.

3. DETERMINACION DE LA UBICACION DEL APANTALLAMIENTO

El apantallamiento puede ubicarse mediante un procedimiento geométrico de manera que se obtenga

total protección, $r = r_c$.

3.1. Fase Lateral

Teniendo fijas las alturas de fase (h) y de hilo de guarda (H), se determina la separación (L) para obtener la protección deseada, o, fijada una de las alturas, se calcula la otra, para una L determinada.

A partir de la Figura N° 4:

$$n = r_c \cos(\alpha + \beta) \quad (1)$$

$$m = r_c \cos(\alpha - \beta) \quad (2)$$

de donde :

$$L = r_c \cos(\alpha - \beta) - r_c \cos(\alpha + \beta) \quad (3)$$

o por pitágoras :

$$L = \sqrt{r_c^2 - (r_c - H)^2} - \sqrt{r_c^2 - (r_c - h)^2} \quad (4)$$

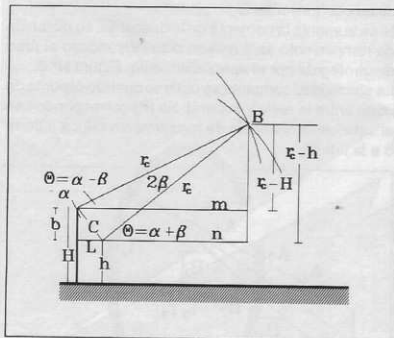


Figura 4. Apantallamiento Fase Lateral

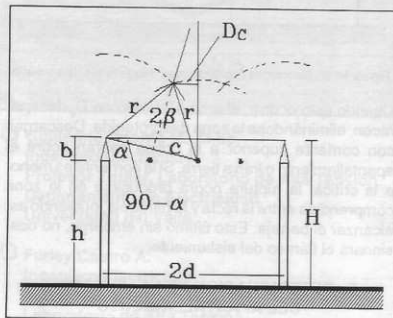


Figura 5. Apantallamiento Fase Central

3.2. Fase Central

En las subestaciones, por su disposición horizontal, el apantallamiento se ubica de forma que sea efectivo para la fase central.

Con respecto a la figura N° 5, el apantallamiento es efectivo cuando $D_c = 0$, lo cual ocurre cuando $\alpha + \beta + 90 = 0$, en este caso:

$$\beta = 90 - \alpha \quad (5)$$

como

$$\frac{C}{2} = \frac{H - h}{r} \quad (6)$$

$$\text{Sen}(\alpha - 90) = \frac{H - h}{c} \quad (7)$$

$$\frac{C}{2} = \frac{H - h}{c} \quad (8)$$

$$C^2 = 2(H - h)r \quad (9)$$

$$r = \frac{C^2}{2(H - h)} \quad (10)$$

También

$$C = \sqrt{d^2 + (H - h)^2} \quad (11)$$

$$r = \frac{d^2 + (H - h)^2}{2(H - h)} \quad (12)$$

Llamando $b = H - h$

$$r = \frac{d^2 + b^2}{2b} \quad (13)$$

Lo cual puede expresarse como

$$2rb - b^2 = d^2 \quad (14)$$

$$-r^2 + 2rb - b^2 = d^2 - r^2 \quad (15)$$

$$(r - b)^2 = r^2 - d^2 \quad (16)$$

$$\text{despejando } b = r - \sqrt{r^2 - d^2} \quad (17)$$

Esto debe ocurrir para $r = r_c$

4. APLICACION DEL METODO MOUSA

El doctor A. M. Mousa [6.3] y [6.4] ha planteado un procedimiento para definir la ubicación del apantallamiento de subestaciones, el cual es aceptado y utilizado en nuestro país.

Este método permite seleccionar la altura efectiva del apantallamiento, teniendo ya definidas las separaciones de los pórticos y las alturas de vanos y barrajes dentro de una subestación. También puede aplicarse en líneas.

El procedimiento se indica a manera de información con referencia a la figura N° 5.

4.1. Cálculo de la altura promedio del conductor

$$H_{av} = h - \frac{2}{3} \text{ Flecha} \quad (18)$$

Cuando no se tiene exactamente definida la flecha máxima, se toma ésta como igual al 3% de la longitud del vano.

4.2. Cálculo del radio corona R_c

Este se encuentra mediante la solución de la ecuación:

$$R_c = \ln \left(\frac{2 H_{av}}{R_c} \right) - \frac{V_c}{E_0} = 0 \quad (19)$$

Donde:

E_0 : Es el gradiente límite para corona, el cual se toma aquí como de 1500 kV/m.

V_c : Es la máxima tensión que soporta el aislamiento

Se puede obtener:

- Cuando no se tiene la longitud de los aisladores se puede tomar como 3 desviaciones estándar por debajo de la tensión crítica de la cadena de aisladores ($\delta = 2\%$).

$$V_c = \text{ICFO} - 3 (\delta) \text{ ICFO} \quad (20)$$

ICFO: Nivel de aislamiento (KV).

- Otra forma de calcular V_c es mediante la utilización de la longitud de la cadena de aisladores:

$$V_c' = 585 w \quad (21)$$

w = longitud de los aisladores.

Si se emplean los dos criterios se obtiene una mayor aproximación.

$$V_c = 0.94 v_c' \quad (22)$$

La solución de R_c se encuentra aplicando el método de Newton Raphson, como se muestra a continuación:

$$R_c^{i+1} = R_c^i - \frac{F(R_c^i)}{F'(R_c^i)} \quad (23)$$

donde

$$F(R_c^i) = R_c^i \ln \left(\frac{2 H_{av}}{R_c^i} \right) - \frac{V_c}{E_0} \quad (24)$$

$$F'(R_c^i) = \ln \left(\frac{2 H_{av}}{R_c^i} \right) + \left(\frac{(R_c^i)^2}{2h} \right) \quad (25)$$

tomando la siguiente solución inicial

$$R_c \approx 1.2 \cdot 10^{-4} V_c \quad (26)$$

La iteración se hace hasta que el incremento ΔR_c sea menor que 0.0001.

Para el caso de más de un conductor, el radio se calcula:

$$R_c' = R_c + R_0 \quad (27)$$

donde R_c es el valor calculado por el método de Newton Raphson y R_0 es el radio equivalente para conductores múltiples:

Para dos conductores:

$$R_0 = \sqrt{r l} \quad (28)$$

Para tres conductores

$$R_0 = \sqrt[3]{r l^2} \quad (29)$$

Para cuatro conductores:

$$R_0 = \sqrt[4]{\sqrt{2} r l^3} \quad (30)$$

r = Radio del subconductor
 l = Espacio entre conductores

Para N conductores:

$$R_0 = 0.51' \sqrt[N]{\frac{2 N r l}{l}} \quad (31)$$

l = Diámetro del círculo en el cual se encuentra el subconductor.

N = Número de conductores

4.3. Cálculo de la impedancia característica

La impedancia característica o impedancia a las descargas se calcula como:

$$R_o = 60 \sqrt{\ln \frac{2 H_{av}}{R_o} \cdot \ln \frac{2 H_{av}}{R}} \quad (32)$$

Donde:

R: Radio del conductor

4.4. Cálculo de la corriente crítica

La corriente crítica es aquella que ocasiona una sobretensión peligrosa para el aislamiento.

$$I_o = \frac{2 (V_o - V_{pf})}{Z_o} \quad (33)$$

El parámetro V_{pf} corresponde a la tensión potencia-frecuencia máxima del sistema.

$$V_{pf} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} X V \quad (34)$$

$$V_{pf} = 0.8165 V$$

4.5. Cálculo de la distancia de descarga crítica

La distancia de descarga correspondiente a la corriente crítica está dada por:

$$r_c = 7.2 (1.1 I_o)^{0.60} \quad (35)$$

4.6. Determinación de la altura efectiva del apantallamiento.

La altura efectiva del apantallamiento es la altura del mismo sobre el sistema que está protegiendo, para la fase central con dos hilos guardas es:

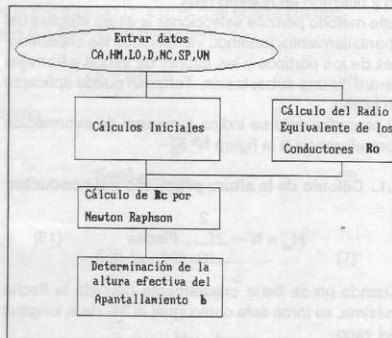
$$b = r_c - \sqrt{r_c^2 - d^2} \quad (36)$$

donde:

$2d$ es la separación entre hilos guarda (pórticos)

5. ESTRUCTURA DEL PROGRAMA

EL programa que se realizó presenta el siguiente diagrama de flujo.



CA : Nombre del caso a resolver
HM : Altura máxima de conexiones
LO : Longitud de la cadena de aisladores
D : Diámetro exterior del conductor
NC : Número de conductores
SP : Separación entre pórticos
VN : Voltaje nominal

Un ejemplo de utilización del programa es el siguiente:

Datos de Entrada

Nombre del caso a resolver	CA = SEMINAR
Altura promedio	h = 15.0 mts
Altura máxima de conexiones	HM = 13.5 mts
Longitud de la cadena de aisladores	LO = 2.921 mts
Diámetro exterior del conductor	D = 0.01848 mts
Número de conductores	NC = 1
Separación entre pórticos	SP = 15.0 mts
Voltaje Nominal	VN = 300 kV
Separación Horizontal fase lateral y apantallamiento	SL = 3.5 mts

Datos de Salida

Nombre del caso a resolver	CA = SEMINAR
Voltaje crítico cadena aisladores	$V_o = 1606.2579$ kV
Radio corona	$R_o = 0.22119$ mts
Corriente crítica	$I_o = 8.01262$ kA
Impedancia característica	$Z_o = 373.77021$ ohm
Distancia de descarga crítica	$r_c = 27.84748$ mts
Altura efectiva de apantallamiento	$b = 1.02897$ mts
Altura máxima	H = 16.02897 mts
Máxima separación lateral protegida	L = -1.34821 mts

Esta corrida se puede grabar, borrar o imprimir según las necesidades de la persona que esté utilizando el programa.

PES 1984 Summer Meeting.

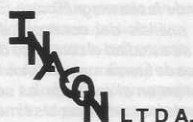
[6] Interconexión Eléctrica S.a. ISA, (1982) "Manual de Apantallamiento Subestaciones a 230 KV".

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Ramírez, C. F. (1991). "Subestaciones de alta Tensión".
- [2] Aponte, Guillermo. (1990). "Subestaciones", Notas de curso, Universidad del Valle.
- [3] Mousa, A.M., "Shielding of high voltage and extra-high-voltage substations", 1976, IEEE Transactions on Power Apparatus and System, Vol-95 N° 4, pp 1303 - 1310.
- [4] Mousa, A.M., "A Computer Program for designing the Lightning Shielding Systems of Substation", 1991, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol-6 N° 1, pp 143 - 152.
- [5] IEEE Committee "A Simplified Method for Estimating Lighting Performance of Transmission Lines", IEEE/

AUTORES

- **Guillermo Aponte M.** Ingeniero electricista Univalle; M.Sc. en ingeniería eléctrica en el área Alta tensión en Instituto de Ciencia y Tecnología, Universidad de Manchester - UMIST - Inglaterra. Profesor de tiempo completo Departamento de Electricidad, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle desde 1981.
- **Ferley Castro A.** Ingeniero electricista, Universidad del Valle, estudiante de Magister en Generación de Energía Eléctrica. Asistente de docencia Departamento de Electricidad, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle. Ingeniero asistente de laboratorio Alta Tensión - Univalle ☐



INGENIERIA, APLICACION Y CONSTRUCCION

- *Construcción de Obras Civiles*
- *Impermeabilizaciones. Recubrimientos Epóxicos*
- *Tratamientos y Recuperación de Estructuras*
- *Distribución y Aplicación de Productos Sika*

Calle 5 No. 84A-07 Locales 3 y 4
Tel: 305637 Fax: 305636
Cali- Colombia

Correos
de Colombia



Estos son nuestros servicios ¡utilícelos!

- SERVICIO DE CORREO ORDINARIO
- SERVICIO DE CORREO CERTIFICADO
- SERVICIO DE CORREO CERTIFICADO ESPECIAL
- SERVICIO ENCOMIENDAS ASEGURADAS
- ENCOMIENDAS CONTRA REEMBOLSO
- SERVICIO CARTAS ASEGURADAS
- SERVICIO DE FILATELIA
- SERVICIO DE GIROS
- SERVICIO ELECTRONICO BUROFAX
- SERVICIO INTERNACIONAL APR/SAL
- SERVICIO 'CORRA'
- SERVICIO RESPUESTA COMERCIAL
- SERVICIO TARIFA POSTAL REDUCIDA
- SERVICIOS ESPECIALES

Teléfonos para quejas y reclamos:
334-03-04 - 341-55-36 Bogotá

Cuente con nosotros

Hay que creer en los Correos de Colombia

71