Capítulo 5

Apantallamiento de líneas aéreas y subestaciones

Miguel García-Gracia
José M. García Rubio
Luis Montañés Bellosta

5.1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del apantallamiento es reducir el número de interrupciones que provocan las descargas atmosféricas, de forma que cuando éstas impacten sobre el sistema de apantallamiento se deriven a tierra.

Las descargas atmosféricas que impactan en las subestaciones o en los tramos de línea próximos a las mismas pueden tener graves consecuencias para la aparamenta, ya que las sobretensiones producidas por estas descargas no son amortiguadas por la longitud de la línea. Mientras que el apantallamiento utilizado en las líneas se basa en la instalación de uno o dos cables de guarda, existen tres opciones para la protección de las subestaciones:

1. Instalación de cables de guarda.
2. Instalación de puntas Franklin.
3. Método mixto.

El capítulo está básicamente dividido en dos partes, en la primera se presenta el apantallamiento de líneas aéreas, mientras que la segunda está dedicada al apantallamiento de subestaciones.

5.2. INTRODUCCIÓN AL APANTALLAMIENTO DE LÍNEAS AÉREAS

Las líneas aéreas de transporte y distribución de energía eléctrica están expuestas a las descargas atmosféricas (caída de rayos), siendo éste uno de los motivos más habituales de fallo de aislamiento. En caso de que un rayo impacte sobre una línea aérea, se origina una elevada sobretensión que puede producir el cebado de los aisladores si se supera su nivel de aislamiento. En tal caso la sobreintensidad se descarga a tierra a través del apoyo, lo que implica una falta a tierra. Y si el aislador permanece contorneado, una vez haya pasado la sobretensión, las protecciones deberán despejar la falta abriendo la línea y

reenganchándola (produciendo de esta forma una interrupción del servicio de unos pocos segundos de duración).

Para disminuir el número de interrupciones debido a descargas atmosféricas, es habitual la instalación de cables de guarda (*Overhead Ground Wire*, OGW) en la parte superior de los apoyos. Con esto se pretende que las posibles descargas atmosféricas impacten sobre un cable de guarda y se deriven a tierra las posibles sobreintensidades.

Existe una gran variedad de formas de corriente de descarga, y cada rayo puede contener una o más descargas. Todas ellas presentan una característica básicamente cóncava, pero no existe un modelo único [1], [2], [3]. La forma de onda de corriente de una descarga atmosférica puede ser representada mediante una doble exponencial o mediante una onda triangular.

Considerando una forma de onda triangular, los parámetros que la caracterizan son: el valor de pico (I_p), el tiempo de subida (T_r desde 0 hasta I_p), y el tiempo de semicola (T_t hasta 50 por 100 de I_p). Cada uno de estos parámetros debe ser estudiado a partir de su distribución estadística, la cual depende fuertemente de la zona geográfica.

La función de distribución acumulativa de la corriente de pico de un rayo puede aproximarse mediante una distribución fraccional. Así, la probabilidad de que la corriente de pico I_p sea mayor que un valor I_0 se puede obtener según la siguiente expresión:

$$F(I > I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{I_{50}}\right)^{n_c}} \tag{5.1}$$

La función de densidad de probabilidad de la corriente de pico, que representa la probabilidad de que el valor de pico de la corriente inyectada por el rayo sea igual a I, es la derivada de la ecuación anterior:

$$f(I) = \frac{n_c}{I_{50}^{n_c}} \cdot \frac{I^{n_c - 1}}{\left[1 + \left(\frac{I}{I_{50}}\right)^{n_c}\right]^2} \tag{5.2}$$

donde n_c e I_{50} deben ser deducidos de observaciones experimentales. Los valores recomendados para el estudio de líneas de distribución en IEEE Std 1410-1997 son $n_c = 2{,}6$ e $I_{50} = 31$ kA [5].

5.2.1. Distancia crítica

La probabilidad de que un rayo impacte sobre un conductor de fase o en un cable de guarda es una variable aleatoria que puede relacionarse con la geometría del sistema (altura y posición del cable de guarda respecto a los conductores de fase). En general, se considera que existe una distancia (distancia crítica) alrededor del conductor de fase y del cable de guarda de forma que los rayos cuyo último paso se encuentre más cercano que esta distancia impactarán sobre el conductor correspondiente. El lugar geométrico de los puntos equidistantes del conductor de fase o cable de guarda es un círculo cuyo radio

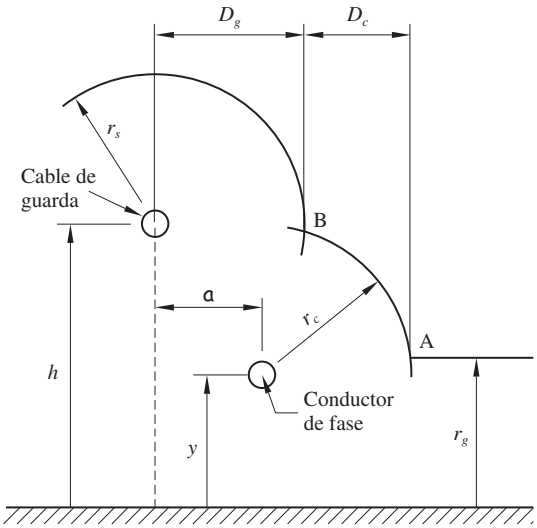

Figura 5.1. Distancias críticas del cable de guarda, conductor de fase y tierra.

(distancia crítica) es función de la intensidad de pico de la descarga (I_d), de manera que a mayor intensidad de pico le corresponde una distancia crítica mayor.

La probabilidad de que un rayo impacte en tierra, en un conductor de fase o en un cable de guarda depende de la corriente de pico de la descarga, de la altura del conductor de fase y de la localización del cable de guarda con respecto al de fase. La Figura 5.1 presenta las distancias críticas (*striking distance*) del conductor de fase (r_c), del cable de guarda (r_s) y tierra (r_g).

Existen diferentes ecuaciones (Young, CIGRE, Love[1]) para determinar las distancias críticas; en este capítulo se utilizan las propuestas en IEEE Std 998-1996 [6]. Su valor depende de la corriente de pico de la descarga I (expresada en kA), y suele expresarse en función de la distancia crítica a tierra (r_g) según la relación

$$\begin{aligned} r_s &= \gamma_s \cdot r_g \\ r_c &= \gamma_c \cdot r_g \end{aligned} \tag{5.3}$$

Los valores de los parámetros, de acuerdo con IEEE Std 998-1996, son:

$$\begin{aligned} r_g &= 8 \cdot I^{0,65} \\ \gamma_s &= \gamma_c = 1 \end{aligned} \tag{5.4}$$

[1] Ecuaciones de Young:

$$r_g = 27 \cdot I^{0,32}$$

$$\gamma_s = \frac{444}{462 - h} \text{ si } h \geq 18 \text{ m, sino } \gamma_s = 1$$

$$\gamma_c = \frac{444}{462 - y} \text{ si } y \geq 18 \text{ m, sino } \gamma_c = 1$$

Ecuaciones de Brown-Whitehead-CIGRE:

$$r_g = 6,4 \cdot I^{0,75}$$

$$\gamma_s = 1 + \frac{h - 18}{108} \text{ si } h \geq 18 \text{ m, sino } \gamma_s = 1$$

$$\gamma_c = 1 + \frac{y - 18}{108} \text{ si } y \geq 18 \text{ m, sino } \gamma_c = 1$$

Ecuaciones de Love:

$$r_g = 10 \cdot I^{0,65}$$

$$\gamma_s = \gamma_c = 1$$

5.2.2. Modelo geométrico

En el modelo geométrico se considera el esquema general presentado en la Figura 5.2, que corresponde a una línea aérea trifásica protegida por dos cables de guarda. Todo el desarrollo posterior de este capítulo es también aplicable a líneas protegidas con sólo un cable de guarda, con la condición de que la distancia de separación entre cables de guarda sea nula ($S_g = 0$). En la figura, los arcos se han trazado con centro en los conductores de fase y en los cables de guarda, considerando un radio r_c en ambos casos. Este valor, según se ha visto en las fórmulas anteriores, depende de la intensidad de descarga del rayo I_d. Además, la línea horizontal trazada a una altura r_g desde el suelo determina la zona de influencia de tierra. De nuevo, esta distancia r_g depende de la intensidad de pico de la descarga del rayo I_d; así a mayor intensidad mayores serán las distancias críticas r_c y r_g.

Las intersecciones entre los arcos cuyos centros son los conductores de fase con la línea horizontal paralela a tierra están marcados como puntos A; las intersecciones entre los arcos cuyos centros son los conductores de fase y aquellos cuyos centros son los cables de guarda están marcados como B; y la intersección entre los arcos cuyos centros son los cables de guarda está marcado como C. Las descargas de intensidad I_d que alcancen el arco entre A y B impactarán sobre el conductor de fase, las que alcancen el arco entre B y C impactarán sobre el cable de guarda y las demás descargas irán a parar a tierra.

En la Figura 5.2 se puede observar que cuanto mayor sea la intensidad de pico considerada mayores serán por tanto las distancias críticas r_c y r_g, con lo cual el arco AB disminuirá. Se define la intensidad máxima de fallo de apantallamiento (I_m) como aquella para la cual todas las distancias críticas coinciden en un punto; es decir, el valor de intensidad para la cual los puntos A y B de la Figura 5.2 coinciden. Las descargas cuya corriente de pico sea superior a la intensidad máxima de fallo de apantallamiento (I_m) impactarán contra el cable de guarda o contra tierra pero no contra una parte activa (sis-

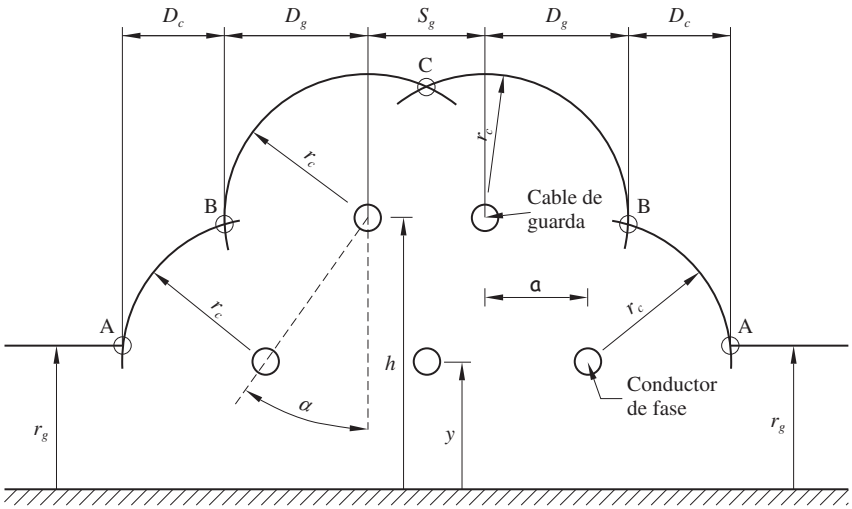

Figura 5.2. El modelo geométrico: definición de ángulos y distancias.

tema completamente apantallado para esas magnitudes de intensidad de pico). Para intensidades de descarga menores existe una probabilidad de que impacte contra un conductor de fase.

Considerando solamente descargas verticales, para un rayo de intensidad de pico I_d, las distancias D_c y D_g de la Figura 5.2 son las distancias de exposición del conductor de fase y del cable de guarda, respectivamente. Así, si un rayo cae en la línea, la probabilidad de impactar en el cable de guarda es

$$P_{cable\ guarda} = \frac{2 \cdot D_g + S_g}{2 \cdot D_c + 2 \cdot D_g + S_g} = \frac{D_g + S_g/2}{D_c + D_g + S_g/2} \tag{5.5}$$

y la probabilidad de que impacte sobre el conductor de fase es

$$P_{conductor} = \frac{2 \cdot D_c}{2 \cdot D_c + 2 \cdot D_g + S_g} = \frac{D_c}{D_c + D_g + S_g/2} \tag{5.6}$$

Se define la probabilidad o tasa de fallo de apantallamiento de una línea ($SFR(I_d)$), para una intensidad de pico fija I_d, como el número de descargas de valor I_d que impactarán sobre los conductores de fase de esa línea durante un año

$$SFR(I_d) = 2 \cdot N_g \cdot L \cdot D_c(I_d) \cdot f(I_d) \tag{5.7}$$

donde L es la longitud de la línea, en km, D_c es la distancia de exposición al rayo de un conductor de fase calculada para una intensidad I_d, $f(I_d)$ es la probabilidad de que la descarga tenga una intensidad de pico I_d, y N_g es la densidad de rayos en la zona (medida en rayos/km^2 y año). N_g puede estimarse a partir del nivel ceráunico o número de días de tormenta al año, T_d, mediante la siguiente expresión:

$$N_g = 0{,}04 T_d^{1{,}25} \tag{5.8}$$

La tasa total de fallos de apantallamiento (SFR, *Shielding Failure Rate*), es decir, la suma de las tasas de fallo de apantallamiento para todas las intensidades, se calcula según:

$$SFR = \int_0^{\infty} SFR(I) \cdot dI \tag{5.9}$$

El límite de integración inferior es 3 kA debido a que es el valor mínimo de intensidad de descarga que CIGRE ha registrado. El límite superior se establece en la intensidad máxima de fallo de apantallamiento, puesto que para intensidades mayores el rayo no impacta en un conductor de fase porque la distancia D_c es nula. De esta forma, la tasa total de fallos de apantallamiento resulta ser:

$$SFR = \int_3^{I_m} SFR(I) \cdot dI = 2 \cdot N_g \cdot L \cdot \int_3^{I_m} D_c \cdot f(I) \cdot dI \tag{5.10}$$

La integral de la ecuación anterior representa la probabilidad de que cualquier rayo que caiga en la línea impacte sobre el conductor de fase. Multiplicando por la densidad de rayos en la zona (N_g) y por la longitud de la línea (L) se obtiene el número de descargas anuales que impactarán sobre un conductor de fase.

a) Cálculo de las distancias de exposición de los conductores de fase (D_c) y de los cables de guarda (D_g)

Se pretende calcular las distancias de exposición a las descargas de los conductores de fase y de los cables de guarda. Primero se procede al cálculo de los principales ángulos del sistema, que están representados en el esquema de la Figura 5.3.

El ángulo entre los dos radios r_c se define como 2β y es según la Figura 5.4:

$$\beta = \text{sen}^{-1}\frac{c}{2\cdot r_c} = \text{sen}^{-1}\frac{\sqrt{\mathfrak{a}+(h-y)^2}}{2\cdot r_c} = \text{sen}^{-1}\frac{h-y}{2\cdot r_c\cdot\cos\alpha} \tag{5.11}$$

Los ángulos θ y α son, según la Figura 5.5:

$$\theta = \text{sen}^{-1}\frac{r_g-y}{r_c} \qquad \alpha = \text{tg}^{-1}\frac{\mathfrak{a}}{h-y} \tag{5.12}$$

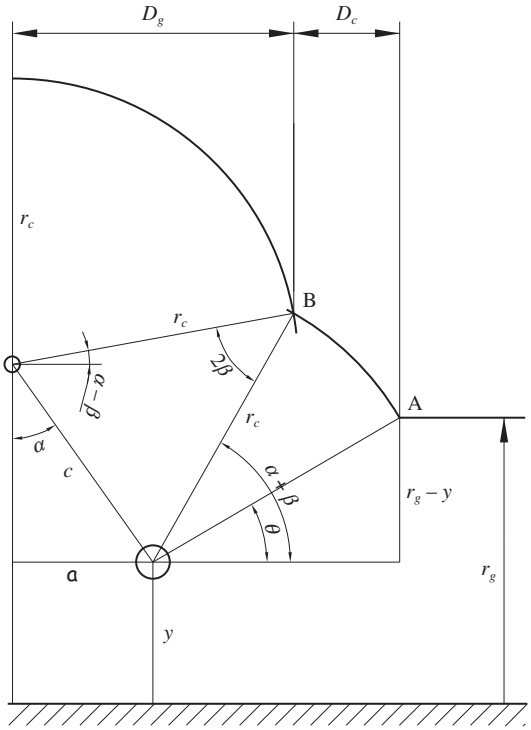

Figura 5.3. Vista ampliada de la Figura 5.2.

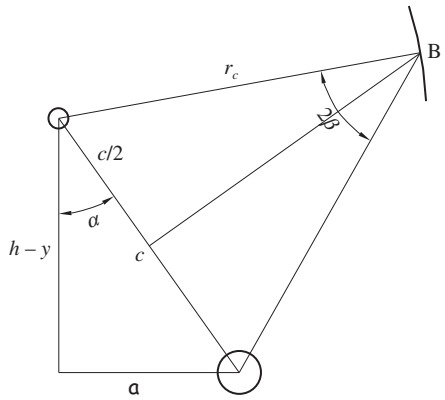

Figura 5.4. Vista ampliada de la Figura 5.3.

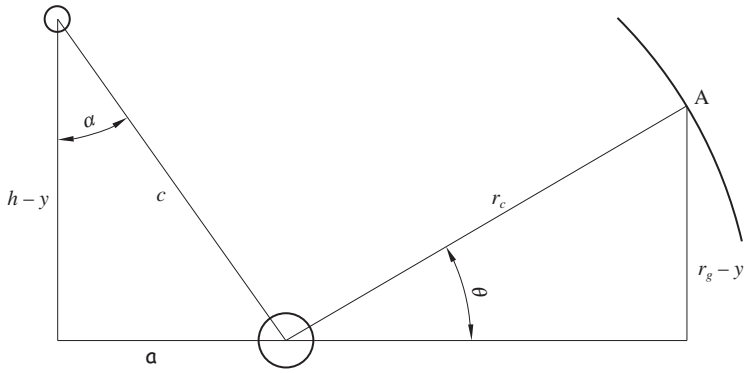

Figura 5.5. Cálculo de α y θ.

Por tanto, de la Figura 5.3 resultan las siguientes distancias D_g y D_c:

$$\begin{aligned} D_c &= r_c \cdot \left[\cos\theta - \cos(\alpha+\beta)\right] \qquad \text{para } r_g \le \mathrm{a} \Rightarrow \theta = 0 \\ D_g &= r_c \cdot \cos(\alpha-\beta) \end{aligned} \tag{5.13}$$

Considerando valores de intensidad de descarga superiores a la intensidad máxima de fallo de apantallamiento ($I > I_m$), se tiene que la distancia horizontal $D_c = 0$, resultando que la distancia D_g correspondiente a este caso, según la Figura 5.6, es

$$\begin{aligned} D'_g &= \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} \qquad \text{para } r_g \ge h \\ D'_g &= r_s + \mathrm{a} \qquad \text{para } r_g < h \end{aligned} \tag{5.14}$$

5.2.3. Intensidad máxima de fallo de apantallamiento

Tal como se ha definido anteriormente, la intensidad máxima de fallo de apantallamiento (I_m) es aquella para la cual todas las distancias críticas coinciden en un punto. La Figura 5.6 muestra la situación donde los puntos A y B coinciden en uno solo, llamado Q, en la cual I_m está definida. La Figura 5.7 permite el cálculo de la distancia horizontal entre el cable de guarda y el conductor de fase más desfavorable $\mathfrak{a}$, a partir de la cual se puede calcular r_{gm}, que es la distancia crítica a tierra r_g para la intensidad máxima de apantallamiento I_m

$$\begin{aligned} \mathfrak{a} &= \mathfrak{a}_1 - \mathfrak{a}_2 \\ \mathfrak{a}_1 &= \sqrt{r_c^2 - (r_g - h)^2} \\ \mathfrak{a}_2 &= \sqrt{r_c^2 - (r_g - y)^2} \end{aligned} \tag{5.15}$$

De la Figura 5.8 se puede obtener el ángulo α para la intensidad máxima de fallo de apantallamiento

$$\operatorname{sen}\alpha = \frac{r_{gm} - \dfrac{h+y}{2}}{\sqrt{r_{cm}^2 - \dfrac{c^2}{4}}} \tag{5.16}$$

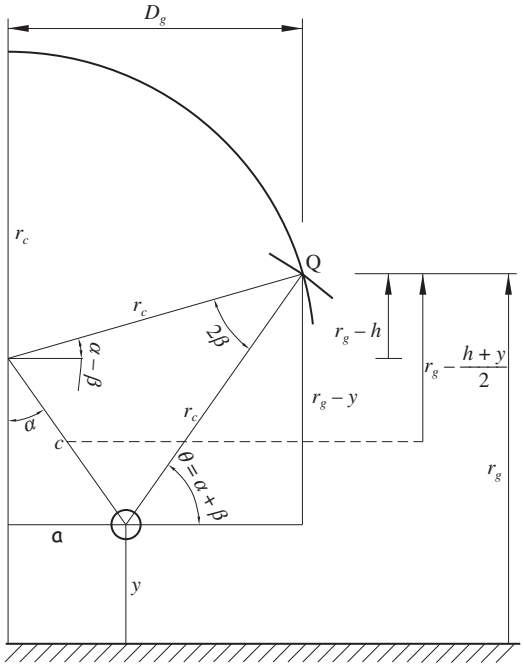

Figura 5.6. Buscando la intensidad máxima de fallo de apantallamiento I_m y el ángulo de apantallamiento perfecto.

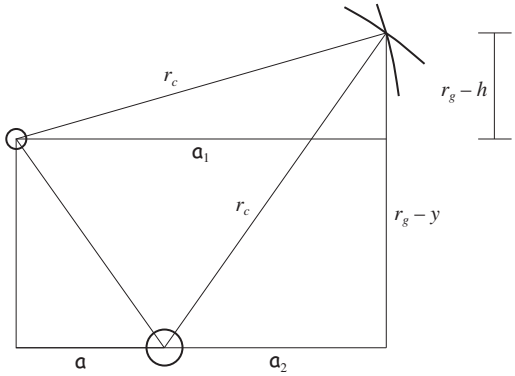

Figura 5.7. Detalle de la Figura 5.6.

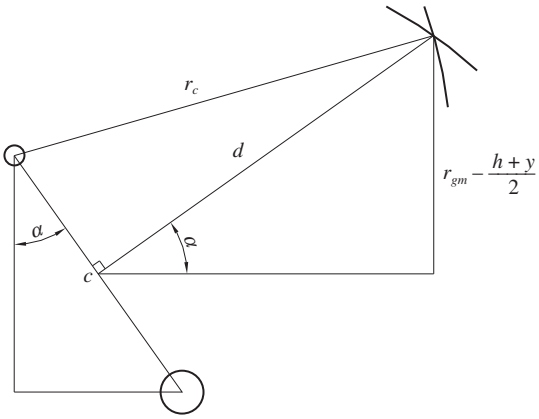

Figura 5.8. Detalle de la Figura 5.6.

donde r_{cm} es la distancia crítica del conductor de fase para la intensidad máxima de fallo de apantallamiento.

Usualmente

$$r_{cm}^2 >> \frac{c^2}{4}$$

por lo que una buena aproximación mucho más manejable que la dada anteriormente es[2]

$$r_{gm} = \frac{(h+y)/2}{1 - \gamma \cdot \operatorname{sen} \alpha} \tag{5.17}$$

[2] La expresión exacta es $r_{gm} = \frac{h+y}{2 \cdot k_0}\left[1 + \sqrt{1 - k_0\left[1 + \left(\frac{a}{h+y}\right)^2\right]}\right]$ donde $k_0 = 1 - \gamma^2 \cdot \operatorname{sen}^2 \alpha$, siendo $\gamma = r_c/r_g$.

5.3. TASA DE CEBADOS

5.3.1. Tasa de cebados directos (SFFOR, Shielding Failure FlashOver Rate)

La tasa total de fallos de apantallamiento (*SFR*) es el número de descargas que impactan sobre un conductor de fase; sin embargo, no todas ellas acaban en un cebado del aislador, sino solamente aquellas que produzcan una sobretensión que supere el nivel de aislamiento a impulso tipo rayo (*CFO*) del aislador. De esta forma, el *SFR* incluye todos los impactos que caen en el conductor de fase (los que producen cebado del aislador y los que no). Para calcular la tasa de cebados directos se tiene que calcular la tensión que produce un rayo al impactar sobre una línea. De la Figura 5.9 se obtiene

$$V = \frac{I_d}{2} \cdot Z_c \tag{5.18}$$

donde I_d es la intensidad de descarga del rayo que impacta en la fase activa y D_c es la impedancia del conductor de fase.

Para calcular la intensidad crítica (I_c) para la cual se produce un cebado del aislador se fija la sobretensión (V) que produce el impacto del rayo en la línea igual al nivel de aislamiento a impulso tipo rayo del aislador

$$\begin{aligned} I_c &= \frac{2 \cdot (CFO)}{Z_c} \\ CFO &\approx L \cdot 605 \ \mathrm{kV}/\mathrm{m} \end{aligned} \tag{5.19}$$

donde L es la longitud del aislador o de la cadena de aisladores.

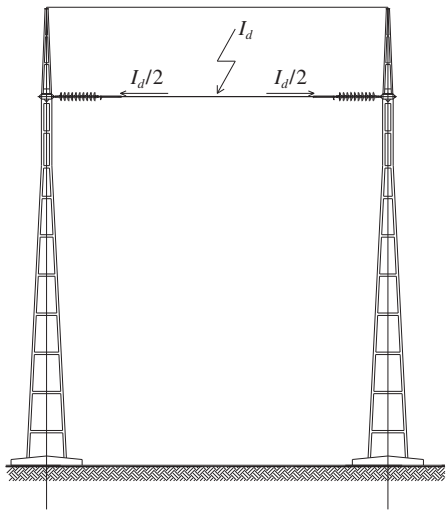

Figura 5.9. Impacto de una descarga en un conductor de fase.

A partir de este valor se obtiene la tasa de cebados directos de una línea según la expresión:

$$SFFOR = 2 \cdot N_g \cdot L \cdot \int_{I_c}^{I_m} D_c \cdot f(I) \cdot dI \tag{5.20}$$

La tasa de cebados directos por cada 100 km se expresa:

$$N_D = 0{,}2 \cdot N_g \cdot \int_{I_c}^{I_m} D_c \cdot f(I) \cdot dI \tag{5.21}$$

La integral representa la probabilidad de que un rayo que caiga en la línea impacte en un conductor de fase y además cebe el aislador. Dicha probabilidad multiplicada por la densidad de descargas de la zona (N_g) y por la longitud de la línea (L) da como resultado el número de descargas al año que impactan en un conductor de fase y además ceban los aisladores. Los aisladores sólo se cebarán si la intensidad del rayo es mayor que la intensidad crítica, y menor que la intensidad máxima de fallo de apantallamiento; de ahí los límites de la integral.

5.3.2. Tasa de cebados inversos (BFR, Backflashover Rate)

Cuando una descarga impacta en un cable de guarda, una parte de su intensidad deriva a tierra (véase la Figura 5.10) a través de la impedancia del apoyo (Z_T) y de la impedancia de puesta a tierra del mismo (Z_{PAT}).

Dependiendo de los valores de Z_T y de Z_{PAT}, las sobretensiones en los aisladores (medidas desde el apoyo hacia el conductor de fase) pueden producir el cebado de los mismos, esto se conoce como cebado inverso. Para que ocurra un cebado inverso, la sobretensión a través del aislador debe ser mayor o igual a su aislamiento a impulso tipo rayo (CFO). El caso más desfavorable de cebado inverso tiene lugar cuando la descarga impacta en el apoyo; en este caso la impedancia efectiva equivalente resultante es el paralelo de la impedancia de dicho apoyo con el paralelo de las impedancias correspondientes a las dos direcciones de propagación del conductor de tierra; y ambas en serie con la resistencia de puesta a tierra, siendo su valor

$$Z_{eq} = \frac{Z_T \cdot Z_g}{2 \cdot Z_T + Z_g} + Z_{PAT} \tag{5.22}$$

si la línea tiene un único cable de guarda, y

$$Z_{eq} = \frac{Z_T \cdot Z_g}{4 \cdot Z_T + Z_g} + Z_{PAT} \tag{5.23}$$

si la línea tiene dos cables de guarda; donde Z_T es la impedancia del apoyo y Z_g es la impedancia característica del cable de guarda.

La intensidad crítica, I_c, para la cual se produce el cebado inverso es la intensidad que produce una sobretensión en el apoyo que supera el nivel de aislamiento del aislador.

$$I_c = \frac{CFO}{Z_{eq}} \tag{5.24}$$

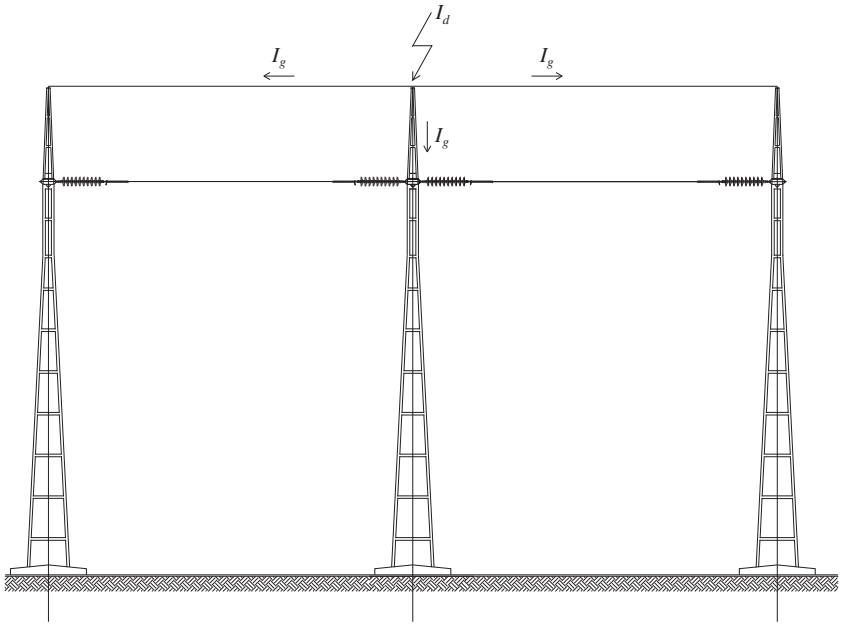

Figura 5.10. Para el cebado, el voltaje debe ser mayor que el nivel de aislamiento a impulso tipo rayo de los aisladores.

Esta intensidad crítica se puede obtener mediante simulación, que permite tener en cuenta las sucesivas reflexiones que aparecen cuando la onda de corriente llega a la base del apoyo, a un apoyo próximo al del impacto o cualquier otro elemento de la línea. Además este cálculo también incluirá el acoplamiento entre fases, y entre fase y tierra.

La tasa de cebados inversos por cada 100 km se expresa:

$$N_{INV} = 0{,}2 \cdot N_g \left[\int_{I_c}^{I_m} D_g \cdot p(I) \cdot dI + \int_{I_m}^{\infty} D'_g \cdot p(I) \cdot dI + S_g \right] \tag{5.25}$$

Puesto que lo habitual es que la intensidad para la cual se produce cebado inverso (I_c) sea mayor que la intensidad máxima de fallo de apantallamiento (I_m), la ecuación anterior queda:

$$N_{INV} = 0{,}2 \cdot N_g \cdot \left[\int_{I_c}^{\infty} D'_g \cdot p(I) \cdot dI + S_g \right] \tag{5.26}$$

5.3.3. Tasa de cebados inducidos (IVFOR, Induced Voltage FlashOver Rate)

Cuando el rayo no cae en el conductor de fase ni en el cable de guarda sino en tierra, se induce una sobretensión en la línea cuyo valor, en algunos casos, puede superar al nivel de aislamiento de los aisladores y provocar su cebado. Para el estudio de las sobretensio-

nes inducidas existen diferentes modelos en la literatura; en este trabajo se emplea el modelo de Rusck [4].

Para la configuración de la figura, y despreciando la distancia de separación del conductor de fase al apoyo (a) frente a la distancia de impacto (x), la sobretensión inducida entre el conductor de fase y el cable de guarda (que está conectado a tierra) viene dada por la expresión:

$$U_{ind} = \frac{30 \cdot I \cdot K_v}{x}\left[y - \frac{Z_m + 2R}{Z_g + 2R} \cdot h\right] \tag{5.27}$$

donde x es la distancia perpendicular entre el punto de caída del rayo y la línea, h es la altura del cable de guarda, I es el valor de pico de la corriente de rayo (kA), Z_g es la impedancia característica del cable de guarda (Ω), Z_m es la impedancia mutua entre el cable de guarda y el conductor de fase (Ω), R es la resistencia de puesta a tierra del apoyo (Ω) y K_v es una constante que se obtiene según la siguiente expresión:

$$K_v = 1 + \frac{v}{\sqrt{2 - v^2}} \tag{5.28}$$

donde v es la velocidad del rayo (en tanto por uno respecto de la luz), que puede estimarse mediante

$$v = \frac{0{,}486}{1 + {}^{27{,}3}\!/_{I}} \tag{5.29}$$

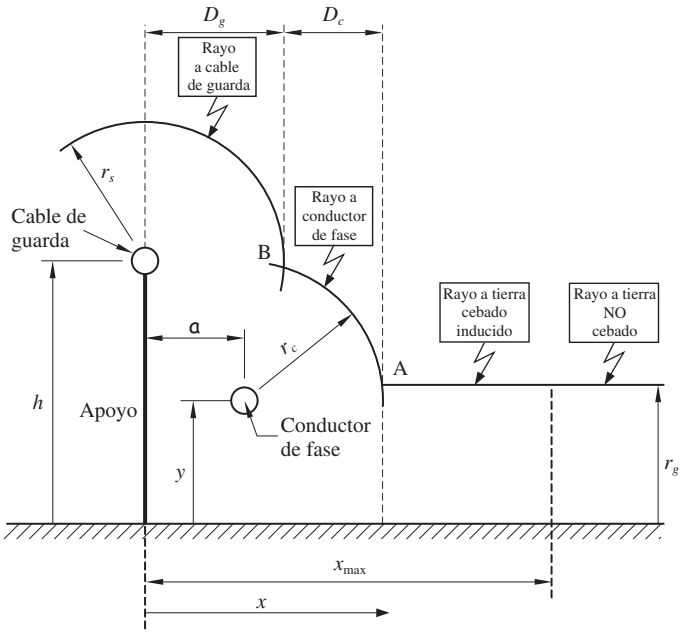

Figura 5.11. Cebados inducidos.

Para una configuración determinada de línea, dada la altura del conductor (y), hay para cada intensidad I una distancia máxima de caída del rayo, x_{max}, para la cual la tensión inducida será exactamente la tensión de cebado ($U_{ind} = CFO$),

$$x_{\max} = \frac{30 \cdot I \cdot K_v}{CFO}\left[y - \frac{Z_m + 2R}{Z_g + 2R} \cdot h\right] \tag{5.30}$$

El cebado por sobretensiones inducidas se produce cuando el rayo cae a una distancia x tal que $D_g + D_c < x < x_{\max}$. De esta forma, se tiene que la tasa de cebados inducidos por cada 100 km es:

$$N_{IND} = 0{,}2 \cdot N_g \cdot \left[\int_{\mathrm{Im}\,in}^{\mathrm{Im}} (x_{\max} - D_g - D_c) \cdot f(I) \cdot dI + \int_{\mathrm{Im}}^{\infty} (x_{\max} - D'_g) \cdot f(I) \cdot dI\right] \tag{5.31}$$

5.4. ÁNGULO DE APANTALLAMIENTO TOTAL

Se define como apantallamiento total aquel con el cual la tasa de cebados (*SFFOR*) es nula. El ángulo de apantallamiento perfecto es el máximo ángulo α que debe formar la línea que une el cable de guarda y la fase más desfavorable con respecto a una línea vertical. Esto se puede lograr cuando la intensidad crítica y la intensidad máxima de fallo de apantallamiento son iguales. De la Figura 5.12 se obtiene el ángulo de apantallamiento perfecto (α_p)

$$\begin{aligned} \alpha_p - \beta &= \mathrm{sen}^{-1}\left(\frac{r_{gc} - h}{r_{cc}}\right) \\ \alpha_p + \beta &= \mathrm{sen}^{-1}\left(\frac{r_{gc} - y}{r_{cc}}\right) \end{aligned} \tag{5.32}$$

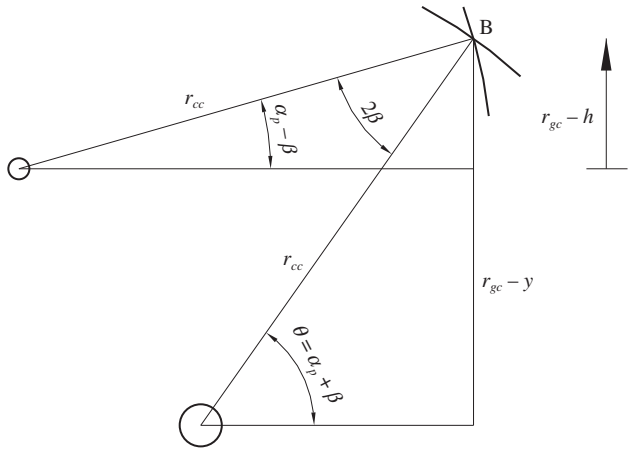

Figura 5.12. Apantallamiento perfecto.

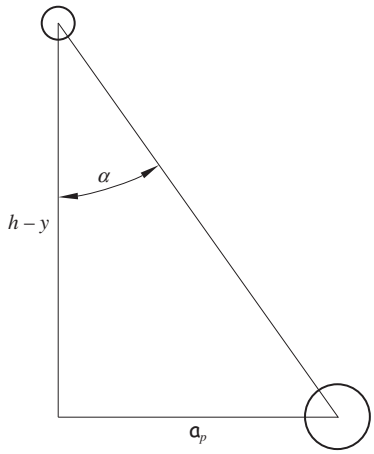

Figura 5.13. Detalle de la Figura 5.6.

donde r_{gc} y r_{cc} son respectivamente la distancia crítica de tierra y la distancia crítica de conductor correspondientes a la intensidad crítica (I_c).

Sumando las ecuaciones anteriores se obtiene el ángulo de apantallamiento perfecto

$$\alpha_p = \frac{1}{2} \cdot \left[\text{sen}^{-1}\left(\frac{r_{gc} - h}{r_{cc}} \right) + \text{sen}^{-1}\left(\frac{r_{gc} - y}{r_{cc}} \right) \right] \tag{5.33}$$

Otra forma de calcular este ángulo se basa en determinar la distancia horizontal para el apantallamiento perfecto (a_p)

$$a_p = \sqrt{r_{cc}^2 - (r_{gc} - h)^2} - \sqrt{r_{cc}^2 - (r_{gc} - y)^2} \tag{5.34}$$

Según la Figura 5.13, el ángulo de apantallamiento perfecto será entonces

$$\alpha_p = \text{tg}^{-1} \frac{a_p}{h - y} \tag{5.35}$$

5.5. EJEMPLO DE UNA LÍNEA 132 kV PROTEGIDA CON UN ÚNICO CABLE DE GUARDA

Se va a estudiar un tramo de línea de 132 kV cuyos apoyos son normalizados y corresponden al tipo Cóndor, cuya geometría se presenta en la Figura 5.14. Las fases menos protegidas contra descargas atmosféricas son evidentemente las superiores. Aplicando la ecuación (5.12) el ángulo de apantallamiento resultante es

$$\text{tg}\,\alpha = \frac{a}{h - y} = \frac{3}{29{,}1 - 23{,}42} = 0{,}53 \quad \Rightarrow \quad \alpha = 27{,}9^{\circ} \tag{5.36}$$