



Modelado y Simulación de Sistemas de Distribución frente a Descargas Atmosféricas

Felipe Alegre Chamorro ^{a, b}, Tamara R. Soloneski ^{a, b}, Roberto J. Cabral ^{a, b, d}, Fernando Botterón ^{a, c, d},
Mario O. Oliveira ^{a, b}

^a Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones – FI UNaM, Oberá, Misiones, Argentina

^b LIDEE, FI UNaM, Oberá, Misiones, Argentina

^c GIDE, FI UNaM, Oberá, Misiones, Argentina

^d CONICET, Argentina

e-mails: felipesantiago.ach@gmail.com; tamarasoloneski@gmail.com; robert_rjc@hotmail.com; botteron@gmail.com; ingenioli@gmail.com, botteron@gmail.com

Resumen

Parte de las fallas ocurridas en las líneas aéreas de distribución son producidas por las descargas atmosféricas, estas afectan directamente al consumidor por el desabastecimiento de energía que producen, por esta razón son datos relevantes para las concesionarias de energía ya que requieren de acciones correctivas. Hoy en día este fenómeno sigue siendo una de las problemáticas persistentes para el desarrollo energético por dos motivos, en principio la naturaleza de este, ya que medir los parámetros relacionados a las descargas atmosféricas es una tarea muy difícil, y por otro lado el costo económico relacionado a las protecciones contra estas. El objetivo de este trabajo es exponer el estado del arte de acuerdo a diversas referencias bibliográficas halladas en la literatura para poder caracterizar correctamente el fenómeno de sobretensión por una descarga atmosférica y plantear ecuaciones que modelan el comportamiento de una línea de distribución frente a descargas atmosféricas y poder cuantificar el número de fallas en la línea dependiendo el tipo de descarga directas o indirectas.

Palabras Clave – Caracterización del rayo, Descargas atmosféricas, Líneas de media tensión, Líneas aéreas, Líneas de distribución, Sobretensiones impulsivas.

Introducción

Incluso antes de que se conozcan los principios de funcionamiento de la electricidad y también hoy en día las descargas atmosféricas han sido de gran interés. Estas representan un gran problema para el sistema de protección utilizado por las concesionarias de energía con el fin de mantener el abastecimiento continuo del servicio a la población en general. Debido a su naturaleza, las descargas atmosféricas son muy difíciles de estudiar ya que no se puede detectar con exactitud el momento o lugar donde se producirá una descarga, por su gran intensidad y corta duración es difícil obtener mediciones con precisión cuando es localizada para ser medida. Aun así, con todas las dificultades que presenta caracterizar el comportamiento de una descarga, a lo largo de los años se fue recopilando información acerca de estas. Este artículo busca lograr un análisis referido al efecto que tienen sobre las líneas aéreas de distribución eléctrica tanto cuando la descarga se produce directamente sobre la red como cuando lo hace en cercanías induciéndose en ellas.

Las desconexiones debido a fallas por descargas atmosféricas son uno de los mayores inconvenientes que se presentan en las líneas de distribución, esto se debe a su bajo nivel de aislación y al elevado costo que presentan los sistemas de protección haciendo inviable su implementación a lo largo del alimentador en líneas de media y baja tensión. Esta realidad se ve directamente afectada por el número de descargas anuales que se tiene en una región determinada.

El análisis realizado en este artículo se enfocará en el noreste argentino (NEA) y principalmente en la provincia de Misiones, siendo esta una de las regiones del país con mayor índice cerámico (n° de descargas atmosféricas anuales por kilómetro cuadrado). Esta región presenta un número de descargas anuales por kilómetro cuadrado y una geografía similar al estado de Santa Catarina de Brasil, por lo que en este estudio nos valdremos de estudios realizados para esta región [1].

Por lo anteriormente mencionado se buscará en este artículo exponer el estado del arte de acuerdo a diversas referencias bibliográficas y caracterizar correctamente el fenómeno de sobretensión por una descarga atmosférica para poder cuantificar el número de fallas en la línea dependiendo el tipo de descarga directas o indirectas, para un futuro presentar el desarrollo de un modelo realizado en software de cálculo (*script* de MatLab) el cual nos permitirá introducir la posibilidad de alterar valores y ecuaciones según se considere necesario para cada aplicación de red y/o caso de estudio que requiera el usuario.

Descargas atmosféricas

El conocimiento de las características y la frecuencia de ocurrencia de los rayos es fundamental para desarrollar correctamente los sistemas de protección. Dos de los principales parámetros utilizados para caracterizar una descarga atmosférica son la corriente de retorno y la energía específica. La corriente de pico I_p es obtenida a partir del campo eléctrico radiado por la descarga esto se puede observar en la siguiente ecuación.

$$I_p = \frac{-2\pi \epsilon_0 c^2 D}{v} E_p \quad (1)$$

Donde: c es la velocidad de la luz; D es la distancia de la descarga a la antena; v es la velocidad de la corriente de retorno; $E_p = cB_p$; B_p es el valor pico de la inducción magnética.

La ecuación (1) presenta simplificaciones que conllevan a errores de cálculo debido a que considerar la velocidad de la corriente de retorno constante no es correcto. Por otro lado, las mediciones se realizan triangulando una serie de antenas y midiendo los parámetros de la descarga que caiga en el interior de estas, sin embargo, dichas mediciones pueden presentar un error por la intensidad del campo en cercanías a estas, mientras que mediciones muy alejadas presentan un error debido a la resistividad del suelo. Estos errores pueden variar entre un 20 y 50% [2] a [5].

El índice encargado de medir el número de ocurrencias de descargas atmosféricas en una región es denominado N_g o GFD por sus siglas en inglés - *Ground Flash Density*. La Fig. 1 generada por la NASA [5], describe el número de descargas por kilómetro cuadrado en una región, sin embargo, estas descargas representan a la totalidad de ellas que ocurren en una tormenta, es decir, la sumatoria de las descargas intra-nube, entre-nubes y nube-suelo. En la figura 2 se puede observar que la región noreste de Argentina es una zona muy afectada por las descargas atmosféricas.

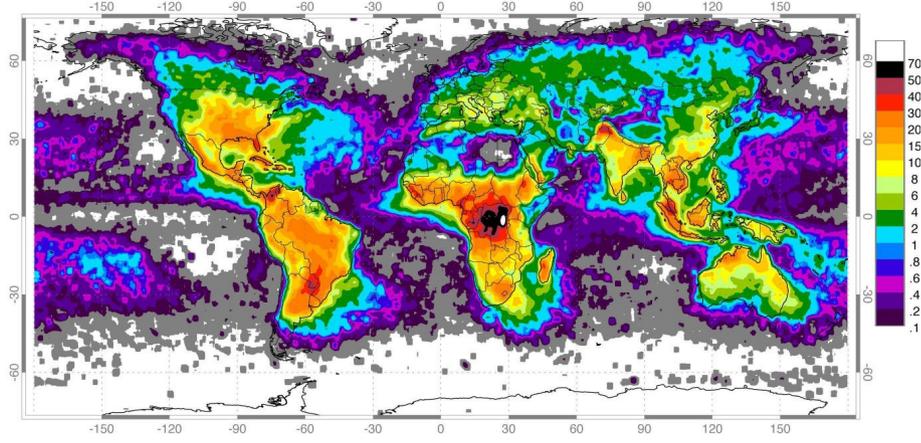


Fig. 1. Numero de descargas anuales mundiales por km² [2].

Para fines de estudio, son más importantes las descargas nube-suelo, la cual se relaciona con N_g a través de la ecuación (2), la cual es altamente aceptada.

$$\frac{N_c}{N_g} = 4.16 + 2.16 \cos 3\lambda \quad (2)$$

Donde: N_c es el número de descargas intra-nube y entre nubes; N_g es la densidad de descarga de la nube a tierra; λ es la latitud de la zona considerada.

También es posible estimar el valor de N_g a partir de la ecuación (3), la cual depende únicamente del índice cerámico N_g y T_d es el índice cerámico de la región [1] y [6].

$$N_g = 0.04 T_d^{1.25} \quad (3)$$

Por otro lado, se observa a partir de datos obtenidos a lo largo de años de estudio que la variación estadística de los parámetros de descarga atmosférica se comporta aproximadamente como una distribución logarítmica normal y se presenta en la ecuación (4) como la densidad de probabilidad de $p(x)$ [2], [3], [7] y [8].

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\beta x}} e^{\frac{-z}{2}} \quad (4)$$

Donde: z se obtiene a partir de la siguiente expresión proporcionada por la ecuación (5).

$$Z = \left(\frac{\ln\left(\frac{x}{M}\right)}{\beta} \right)^2 \quad (5)$$

Donde: M es el valor mediano del parámetro; β es el desvío logarítmico.

En la Fig. 2 se muestra la forma de onda típica de una descarga [4]. Donde I_{p1} es el valor de corriente pico inicial que determina el tiempo del frente de onda; I_{p2} es el valor final del pico de corriente que determina la amplitud de la onda; I_{10} , I_{30} e I_{90} son valores referidos al 10, 30 y 90% de I_{p1} ; T_{10} es el tiempo entre los valores actuales I_{10} e I_{90} ; T_{30} es el tiempo entre los valores actuales I_{30} e I_{90} ; S_{10} es la tasa de crecimiento de corriente media entre los valores I_{10} e I_{90} ; S_{30} es la tasa de crecimiento de corriente media entre los valores I_{30} y I_{90} ;

La variación de la corriente de retorno puede ser caracterizada a partir de la ecuación (6) [4].

$$i(t) = \frac{I_p}{\eta} \frac{k_s^n}{1+k_s^n} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (6)$$

Donde: I_p = corriente de pico; η es el factor de corrección de la corriente de pico; $K_s = t/t_1$; t_1 y t_2 son constantes que definen el tiempo de subida y bajada de la corriente respectivamente; n es el factor de crecimiento de la corriente.

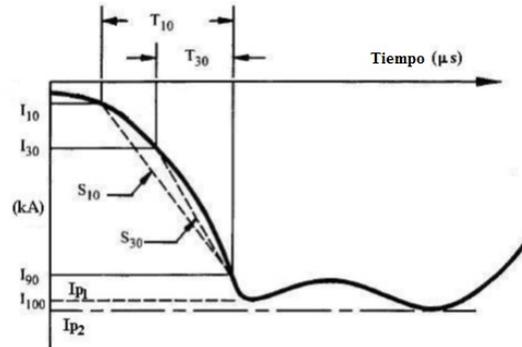


Fig. 2. Forma de onda típica de la corriente de descarga de retorno.

Con el fin de presentar la mayor información posible en este informe, se presentará la Tabla 1 que expresa las características de la primera descarga negativa, medida en Morro do Cachimbo, Brasil [9] y la ecuación (7) que describe la densidad de energía de la descarga.

Tabla 1: Características de la corriente: Descarga negativa, Morro do Cachimbo [9].

| Parámetro | M |
|------------------------|------|
| I_p [kA] | 45,3 |
| T_{10} [μ s] | 5,6 |
| T_{30} [μ s] | 2,9 |
| t_f [μ s] | 4,8 |
| t_h [μ s] | 53,5 |
| S_{10} [kA/ μ s] | 5,8 |
| S_{30} [kA/ μ s] | 8,4 |
| S_m [kA/ μ s] | 19,4 |

$$E = \int i(t) dt \quad (7)$$

Con las ecuaciones presentadas anteriormente, se obtiene una rápida caracterización de una descarga atmosférica.

Descargas directas en una red

Para determinar el impacto de una descarga atmosférica en una línea de transmisión aérea, se entiende que la descarga atmosférica inyecta a la red una corriente impulsiva, que se propaga en dos direcciones. Esto da origen a una tensión U en [kV] que puede ser representada por la ecuación (8) [3] en la cual se debe considerar la impedancia transitoria de la red o impedancia característica de la línea conocida en la literatura como Z_0 en [Ω] y la corriente inyectada por el rayo a la red es I en [kA].

$$U = \frac{Z_0 \cdot I}{2} [kV] \quad (8)$$

El cálculo de la impedancia característica como se puede esperar, implica la utilización de la resistencia y reactancia de la línea en cuestión, y al considerar tanto su efecto capacitivo como

inductivo, se obtiene la ecuación (9) [10]. Sin embargo, por las características del fenómeno a estudiar, la misma se puede simplificar como se observa en la ecuación (10), en la cual se considera que la resistencia en serie y la conductancia en paralelo, son despreciables en el análisis. Por otro lado, el valor de capacitancia e inductancia de la línea se pueden estimar a partir de la altura de conductor respecto del suelo h y el radio del conductor r , como se muestra en las ecuaciones (11) y (12) [11].

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} [\Omega] \quad (9)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} [\Omega] \quad (10)$$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{2h}{r}\right) \left[\frac{H}{m}\right] \quad (11)$$

$$C = \frac{10^{-9}}{18 \ln\left(\frac{2h}{r}\right)} \left[\frac{F}{m}\right] \quad (12)$$

Con las ecuaciones presentadas anteriormente se analiza el fenómeno ocurrido en un solo conductor. No obstante, en las líneas aéreas de transmisión se suele tener más de un conductor, por lo que a continuación es representado en la ecuación (13) el cálculo de la impedancia característica para una línea aérea de transmisión con 3 conductores.

$$Z_0(3) = \frac{1}{9} (Z_{11} + Z_{22} + Z_{33} + 2(Z_{12} + Z_{13} + Z_{23})) [\Omega] \quad (13)$$

Generalizando el cálculo de las impedancias propias (Z_{nn}) de cada conductor, las mismas pueden calcularse a partir de la ecuación (9). Las impedancias mutuas (Z_{nm}) deben ser calculadas con la ecuación (14) que se presenta a continuación.

$$Z_{12} = Z_{21} = 60 \cdot \ln\left(\frac{b_{12}}{a_{12}}\right) [\Omega] \quad (14)$$

En la ecuación (14), a_{12} corresponde a la distancia entre conductores y b_{12} a la distancia del conductor 2 a la imagen del conductor 1. Lo explicado anteriormente se detalla en la Fig. 3.

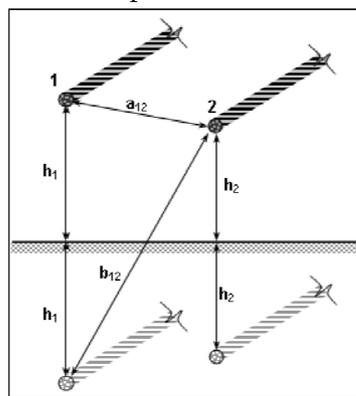


Fig. 3. Análisis de distancias entre conductores.

Para las líneas aéreas de transmisión un valor importante a determinar es y_{min} que representa la distancia mínima a partir de la cual una descarga atmosférica deja de llegar al conductor y la misma

puede ser determinada a partir de las ecuaciones (15) (16) y (17) de la teoría del modelo electrogeométrico que se ilustra en la Fig. 4, seguido de sus correspondientes ecuaciones.

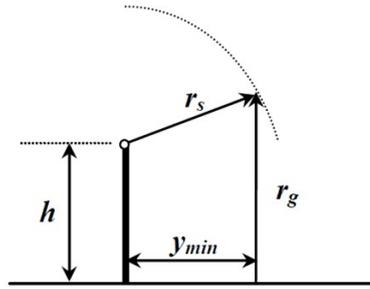


Fig. 4. Modelo electrogeométrico.

$$y_{min} = \sqrt{r_s^2 - (r_g - h)^2} [m] \quad (15)$$

$$R_s = (\alpha \cdot I_0)^\beta [m] \quad (16)$$

$$r_g = K_g \cdot r_s [m] \quad (17)$$

Para el análisis de las ecuaciones anteriores los valores de α , β , K_g pueden ser determinados a partir de la guía de la IEEE Std. 1410 [3] para redes de media tensión, la cual sugiere valores de 10; 0,65 y 0,9 respectivamente. Sin embargo, para valores de h menores de 10 metros se sugiere determinar el valor de K_g con la ecuación Error: no se encontró el origen de la referencia recomendado por [12].

$$k_g = 0.36 + 0.17 \ln(43 - h) \quad (18)$$

Por otro lado, la distancia máxima y_{max} presentada en (19) establece el punto en el que una descarga deja de provocar fallas en el sistema de transmisión. Esto se puede observar en la figura 5.

$$y_{max} = \frac{38,8 \cdot I_0 \cdot h_{eficaz}}{1,5 \cdot CFO} [m] \quad (19)$$

$$h_{eficaz} = h + \frac{4,7}{\sqrt{\sigma}} [m] \quad (20)$$

Donde CFO es el nivel de aislación máximo establecido por el aislador de la red, h es la altura de los conductores respecto del suelo [m] y σ es la conductividad del suelo [mS/m].

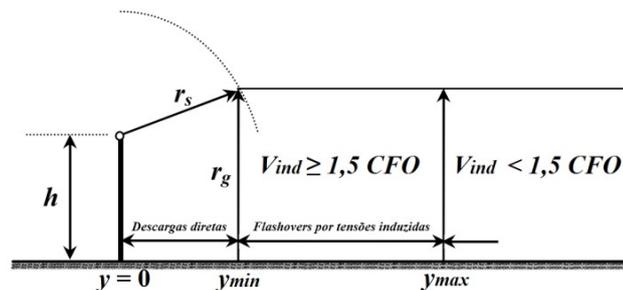


Fig. 6. Modelo electro-geométrico de Rusck para la determinación del tipo de falla.

Tensiones inducidas en la red

Muchas de las fallas producidas en las líneas aéreas son producto de descargas próximas a la red eléctrica, las cuales inducen tensiones en esta, generando fallas. Aunque no hay unanimidad en

cuanto a la forma más adecuada de calcular los campos electromagnéticos, y las tensiones inducidas Error: no se encontró el origen de la referencia [13] y [14], la metodología desarrollada por Rusck [15] es muy utilizada.

En el modelo de Rusck se realizan ciertas simplificaciones que se presentan a continuación.

- El tipo más común de descarga es negativa.
- La primera fase de la descarga ocurre con una velocidad insuficiente para provocar variación de campo.
- El canal de descargas posee ramificaciones, sin embargo, el modelo considera rectilíneo, vertical, sin ramificaciones y con un diámetro mucho menor a la distancia al punto de observación.
- El canal se comporta como una línea de transmisión ideal.
- La tierra se considera como un conductor perfecto (resistividad nula).

Teniendo en cuenta estas simplificaciones y considerando las ecuaciones de Maxwell es posible determinar los campos electromagnéticos producidos por la distribución de carga y densidad de corriente de una descarga atmosférica [15]. Las ecuaciones (28) y (29) de campo eléctrico.

$$E_v = +30 \cdot I_0 \cdot \frac{c}{v} \left[\frac{1}{\sqrt{(vt-h)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right) r^2}} \right] + 30 \cdot I_0 \cdot \frac{c}{v} \left[\frac{1}{\sqrt{(vt+h)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right) r^2}} \right] \quad (28)$$

$$-30 \cdot I_0 \cdot \frac{c}{v} \left[\frac{1}{\sqrt{(L-h)^2 + r^2}} - \frac{1}{\sqrt{(L+h)^2 + r^2}} \right] E_A = -30 \cdot I_0 \cdot \frac{v}{c} \left[\frac{1}{\sqrt{(vt-h)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right) r^2}} + \frac{1}{\sqrt{(vt+h)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right) r^2}} \right] \quad (29)$$

Donde: E_v es el campo eléctrico debido al potencial escalar; E_A es el campo eléctrico debido al potencial vectorial. Igualando h a cero se obtienen las siguientes ecuaciones de campo eléctrico al nivel del suelo.

$$E_v = 60 \cdot I_0 \cdot \frac{c}{v} \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{v}{c}\right)^2 [(ct)^2 - r^2]}} - \frac{1}{\sqrt{L^2 + r^2}} \right] \quad (30)$$

$$E_A = -60 \cdot I_0 \cdot \frac{v}{c} \left[\frac{1}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{v}{c}\right)^2 [(ct)^2 - r^2]}} \right] \quad (31)$$

Para el cálculo del campo magnético sustituyendo Error: no se encontró el origen de la referencia en Error: no se encontró el origen de la referencia se obtiene la siguiente ecuación.

$$H = \frac{I_0}{2\pi r} \cdot \frac{\frac{vt}{r}}{\sqrt{1 + \left(\frac{v}{c}\right)^2 \left[\left(\frac{ct}{r}\right)^2 - 1\right]}} \quad (32)$$

Con los datos de campo proporcionados anteriormente se calcula las tensiones inducidas en las líneas de transmisión con las ecuaciones (33), (34) y (35) [1]. A continuación, en la Fig. se expone una representación que pone en claro el entendimiento de las ecuaciones antes mencionadas.

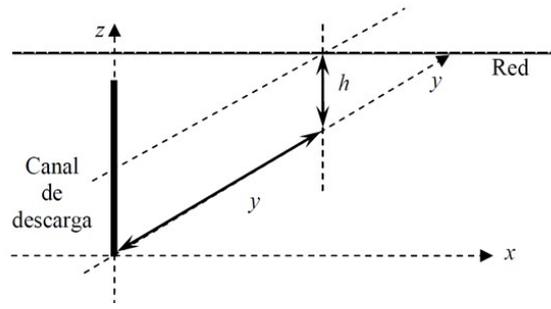


Fig. 7. Dimensiones utilizadas para el cálculo de tensiones inducidas.

$$U = U_1 + U_2 \quad (33)$$

$$U_1 = V_{1(+x)} + \frac{1}{2} \cdot h \cdot \frac{\delta A_i}{\delta t} \quad (34)$$

$$U_2 = V_{1(-x)} + \frac{1}{2} \cdot h \cdot \frac{\delta A_i}{\delta t} \quad (35)$$

Donde: U es la tensión inducida total en el punto de la línea; V_1 es el potencial escalar obtenido por la ecuación (36) a partir del campo eléctrico E_v de la ecuación (31).

$$V_1 = \frac{30 \cdot I_0 \cdot h \cdot \left(\frac{v}{c}\right)}{y^2 + \left(\frac{v}{c}\right)^2 (ct - x)^2} \cdot \left[\frac{xtc - x^2 - y^2}{\left(\left(\frac{v}{c}\right)^2 (ct)^2 + \left(1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2\right)(x^2 + y^2)\right)^{\frac{1}{2}}} + ct - x \right] \quad (36)$$

Para el cálculo de v_2 simplemente se sustituye el valor de x por $-x$ en la ecuación anterior.

El valor máximo de tensión inducida U es el punto más próximo de descarga ($X=0$) y está dado por la siguiente expresión.

$$U_{o_{max}} = \frac{30 \cdot I_0 \cdot h}{y} \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \right] \quad (37)$$

No obstante, para el cálculo de una tensión inducida en un punto distante de la línea se puede utilizar la ecuación (38) [1].

$$U_{\infty_{max}} = \frac{30 \cdot I_0 \cdot h}{y} \quad (38)$$

El valor de la tensión inducida por una descarga, en los terminales de una línea larga, en un punto distante de ocurrencia de la descarga puede ser deducido por la ecuación (39).

$$U_{FR} = 2U_{\infty max} = \frac{60 \cdot I_0 h}{y} \quad (39)$$

En los cálculos anteriores, se considera el suelo como un conductor perfecto. Por lo que, se presenta la ecuación (40) Error: no se encontró el origen de la referencia, la cual incluye estos valores y disminuye los errores en los cálculos.

$$U_{max} = 33 \cdot I_0 \cdot \frac{h}{y} + 1.1 \cdot I_0 \sqrt{\frac{\rho}{y}} \quad (40)$$

Siendo ρ la resistividad del suelo.

Distancias según el modelo electrogeométrico

Primeramente, se define un nuevo valor de altura, conocido como altura eficaz y se representa en la ecuación (41). La diferencia con la altura del poste es que la altura eficaz tiene en cuenta la resistividad del suelo, por ende, es más representativo a nuestro fin.

$$h_{eficaz} = h_{poste} + \frac{4,7}{\sqrt{\rho}} \quad (41)$$

Donde ρ es la resistividad del suelo que se considera 100 Ω/m .

Probabilidad

Si bien en la ecuación (4) se presenta la función de probabilidad [5], aquí sumamos la ecuación de probabilidad acumulada, y se contrasta sus gráficas con respecto a dos autores diferentes.

$$P_x = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_{crit}}{I_p}\right)^x} \quad (42)$$

Donde $I_p = 31kA$; $I_{crit} = 1,2kA$; y el valor de x depende el autor. En esta ocasión compararemos las probabilidades por Anderson-Erikson donde $x=2,6$ y Popolansky donde $x=2$. En la Fig. se presenta un gráfico comparativo de ambas probabilidades acumuladas y de la probabilidad de corriente de pico de una descarga.

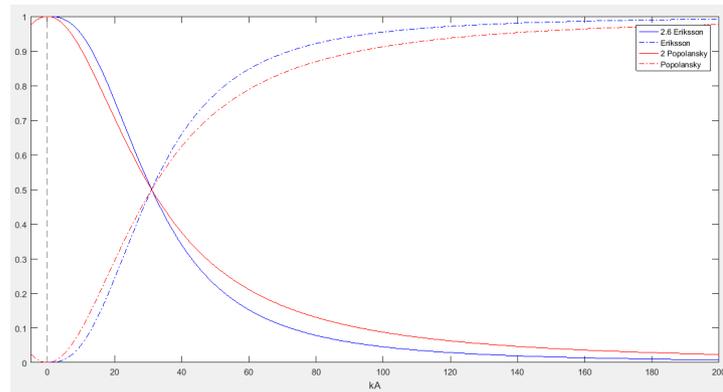


Fig. 8. Probabilidad de corriente de pico de una descarga.

En el gráfico anterior se puede notar la probabilidad de que una determinada descarga atmosférica tenga un valor dado de corriente pico, la cual se representa con las líneas de trazo continuo. Las líneas de trazo corto representan las funciones acumuladas respectivamente.

Descargas directas

Para determinar el impacto de una descarga atmosférica en una línea de transmisión aérea, se entiende que la descarga atmosférica inyecta a la red una corriente impulsiva, que se propaga en dos direcciones. Esto da origen a una tensión U en [kV] que puede ser representada por la ecuación (8) en la cual se debe considerar la impedancia transitoria de la red o impedancia característica de la línea conocida en la literatura como Z_0 en [Ω] y la corriente inyectada por el rayo a la red es I en [kA].

$$U = \frac{Z_0 \cdot I}{2} [kV] \quad (43)$$

Una descarga directa en la red de distribución es considerada directamente una condición de falla en la misma. Esto se debe a la magnitud de la misma. Si bien es interesante caracterizarla, es importante resaltar que en los sistemas de distribución de energía se busca evitar la ocurrencia de estos colocando hilos de guarda: no se encontró el origen de la referencia .

Para determinar el número de descargas directas que impactarán en la línea se utiliza (44).

$$N_{dir} = N_g \left(\frac{28 \cdot h^{0.6} + b}{10} \right) \quad (44)$$

Donde N_{dir} es el número de descargas que impactarán en la línea, N_g se determina a partir de (3), h es la altura de la conductor y b es el ancho de la cruceta.

Descargas indirectas

Las descargas indirectas de interés en este estudio son aquellas que se encuentren dentro de los valores y_{min} e y_{max} ya que serán las que generen fallas en la misma.

Para determinar el nivel de sobretensión que impone una descarga indirecta en la red se utiliza el método de Rusck Error: no se encontró el origen de la referencia-Error: no se encontró el origen de la referencia y Error: no se encontró el origen de la referencia. La ecuación utilizada se presenta en (45) la cual no representa la formula completa establecida por Rusck, ya que presenta simplificaciones establecidas en Error: no se encontró el origen de la referencia-Error: no se encontró el origen de la referencia.

$$U_{ind} = \frac{30 \cdot I_0 \cdot h}{y} [kV] \quad (45)$$

Al momento de modelar el sistema de distribución, es de especial interés el número de fallas por descargas indirectas N_{ind} provocadas por sobretensiones inducidas Error: no se encontró el origen de la referencia-Error: no se encontró el origen de la referencia. Estas fallas estarán en función de la probabilidad de que una descarga tenga el nivel de corriente requerido para esta condición y se calcula con la siguiente ecuación.

$$N_{ind} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot N_g \cdot \sum_{I_0=1}^{200} (y_{imax} - y_{imin}) \cdot P(I_0 > i_0) \quad (46)$$

Descargas de Contorno Totales

El número total de descargas disruptivas en los límites de una red aérea de distribución es la suma del número de fallas por descargas directas y el número de fallas por sobretensiones inducidas, como todas las descargas disruptivas de contorno (fallas por descargas directas e indirectas) son las que provocan fallas en el sistema eléctrico Error: no se encontró el origen de la referencia. La tasa de falla total por rayos en los alimentadores de distribución N_{Total} se cuantifica mediante Error: no se encontró el origen de la referencia:

$$N_{Total} = N_{dir} + N_{ind} + \dots \quad (47)$$

Dónde N_{Total} es el número total de descargas de contorno [fallas/100km/año]; N_{ind} es el número de descargas límite de tensión inducida [fallas/100km/año]; N_{dir} es el número de descargas límite debido a descargas directas [fallas/100km/año].

Descargas sobre hilo de guarda

El hilo de guarda es una protección presente en gran parte de las estructuras de transmisión de energía, la cual evita las fallas provocadas por descargas directas en algunas de las fases esta puede generar fallas en determinadas circunstancias. Debido a que las estructuras con hilo de guarda disponen de conexión con la puesta a tierra, y que estos suelen ser consecutivos en postes adyacentes, el modelo eléctrico establecido se presenta en la figura 9.

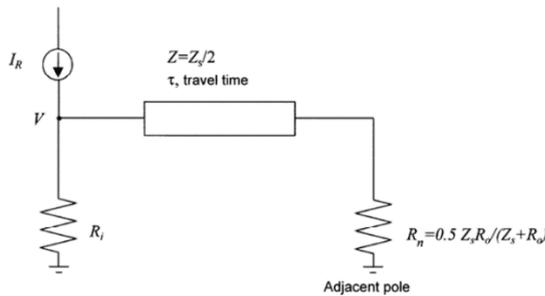


Fig.9. Esquema eléctrico establecido para sistemas con hilo de guarda.

Para determinar la necesidad de colocar una protección de este tipo es útil conocer el factor de blindaje: no se encontró el origen de la referencia-Error: no se encontró el origen de la referencia. Este factor determina cuan protegida se encuentra una estructura debido a las características de su entorno. Si bien este coeficiente debe ser medido en campo para determinar su valor. Es de suma importancia considerarlo ya que modifica directamente en el número de descargas directas sobre la línea, siguiendo la expresión presentada en (48).

$$N_s = N(1 - (Sf_{der} + Sf_{izq})) \quad (48)$$

Donde Sf es el factor de blindaje (*Shielding factor*), pudiendo ser diferentes valores Sf_{der} del lado derecho de la línea y Sf_{izq} del lado izquierdo.

Conclusiones y Trabajos Futuros

Los conceptos y ecuaciones presentadas a lo largo de este artículo sirven como herramienta para caracterizar el fenómeno de un rayo y conocer su efecto en las sobretensiones de las líneas aéreas de distribución, tanto si se trata de sobretensiones producidas por descargas atmosféricas directas o indirectas, debe notarse que no se contemplan protecciones que puedan encontrarse ya instaladas en las redes eléctricas ni el efecto que tienen ante las descargas atmosféricas.

Actualmente el modelo está siendo implementado en MatLab, por lo que se encuentra en desarrollo y puede ser utilizado para facilitar el proceso de cálculo que involucre el modelado de sistemas de distribución y/o transmisión para su análisis frente a descargas atmosféricas.

Referencias

- [1] V. L. Coelho “Análise do desempenho de redes aéreas de distribuição de média tensão frente à ação das descargas atmosféricas” Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil, 2010.
- [2] P. Chowdhuri, “Significant Parameters in Estimating the Striking Distance of Lightning Strokes to Overhead Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.4, n°3, July de 1989.
- [3] IEEE Power Engineering Society. IEEE Guide for Improving Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines, IEEE Std 1410. New York, 2004.
- [4] P. Chowdhuri, J.G Anderson, W.A.Chisholm, Parameters of Lightning Strokes: A Review. IEEE Transactions on Power Delivery. New York, vol. 20, issue 1, Jan 2005 p. 346-358
- [5] K.L. Cummins, E.P. Krider, M.D. Malone, The US National Lightning Detection Network™ and applications of cloud-to-ground lightning data by electric power utilities, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, vol. 40, issue 4, nov. 1998, pages 465-480
- [6] NASA - Global Hydrology and Climate Center. Website: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/2002/where-lightning-strikes>
- [7] IEEE Power Engineering Society. IEEE Guide for Improving Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Std 1243. New York, 1997.
- [8] J. G. Anderson, “Lightning Performance of Transmission Lines”, Transmission Line Reference Book, 345 kV and Above, Electric Power Research Institute: Palo Alto, CA, 1982, ch. 12.
- [9] S. Visacro, J. Soares, M.A.O. Schroeder, “Statistical Analysis of Lightning Current Parameters: Measurements at Morro do Cachimbo Station”, Journal of Geophysical Research, 109, D01105, doi: 10.1029/2003JD003662, 2004b.
- [10] M.N.O Sadiku, Elements of Electromagnetics. 3. ed. Oxford University Press: New York, 2001.
- [11] W.D. Stevenson Jr., Elementos de Analise de Sistemas de Potencia. Sao Paulo - SP: McGraw-Hill do Brasil Ltda,1978.
- [12] P. Chowdhuri, “Significant Parameters in Estimating the Striking Distance of Lightning Strokes to Overhead Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.4, n°3, July de 1989
- [13] F. L. da Fonseca, "Cálculo do Campo Eletromagnético e Análise da Tensão Induzida em Linhas Aéreas Devido a Descargas Atmosféricas", Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1990.
- [14] A. Piantini; “Contribuição ao Estudo das Tensões induzidas em Linhas de Distribuição por Descargas Atmosféricas Indiretas”. São Paulo, 1991. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [15] S. Rusck, “Induced Lightning Over-Voltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Over Voltage Protection of Low Voltage Networks”. Göteborg, 1957.