



Determinación de la razón de salida por impacto directo de rayos en una línea de transmisión

Alfredo Ramírez
Ángel C. Valcárcel

Recibido: Octubre del 2006
Aprobado: Diciembre del 2006

Resumen / Abstract

Se desarrolla un método de cálculo del índice de salidas por impacto directo de rayos en una línea de transmisión. Basado en el modelo electrogeométrico este método permite la determinación del índice de salida de una línea, con tiempos de cómputo mucho más pequeños que los requeridos por las técnicas de Monte Carlo que con relativa frecuencia se utiliza en este tipo de estudio. Los resultados obtenidos coinciden con los de otros autores consultados.

Palabras clave: Descarga eléctrica atmosférica, nivel cerámico, daños por rayos, modelo electrogeométrico

In the presently work is developed a method of calculation of the outage rate by direct impact of atmospheric discharges on a transmission line. Based on the electrogeometric model this method it allows the determination of the outage rate of a line, with much smaller times of computation that those required by the Monte Carlo techniques frequently used in this study type. The obtained results coincide with those of other consulted authors.

Key words: Lightning, isokeraunic level, damage by lightning, electrogeometric model

INTRODUCCIÓN

Para determinar la razón de salida de una línea aérea de potencia por el impacto de descargas atmosféricas lo más recomendado en la literatura es el uso del modelo electrogeométrico (MEG), tanto para impactos directos como para impactos indirectos.

Se entiende por impactos directos cuando el rayo impacta directamente la línea eléctrica, ya sea en la torre, en el vano entre torres o en los conductores de fase. Cuando el impacto se produce en la torre o en el vano entre torres puede ocurrir lo que se conoce como descarga inversa, ya que esta se produce desde la

estructura hacia los conductores de fase, cuando el impacto tiene lugar en los conductores de fase, lo que se conoce como falla de blindaje, la descarga que se puede desarrollar se conoce como descarga directa, produciéndose esta desde los conductores de fase hacia la estructura.

En el presente trabajo se propone un método de determinación de la razón de salida de una línea eléctrica de transmisión, considerando la posibilidad de ser determinadas las corrientes mínimas de rayo que hacen fallar el aislamiento para impactos en la torre, en el vano entre torres y en los conductores de

fases y con estas se determinan la razones de salida por cada uno de estos posibles lugares de impacto.

MODELO ELECTROGEOMÉTRICO

Basado en el modelo electrogeométrico (MEG) el ancho del área de atracción de una línea aérea puede observarse en la figura 1.¹⁻³

$$A = b + 2x \text{ (m)} \quad \dots(1)$$

o lo que es lo mismo:

$$A = b + 2\sqrt{r_s^2 - (r_{sg} - h)^2} \text{ (m)} \quad \dots(2)$$

siendo:

$$r_s = 8 \cdot I_s^{0.65} \text{ (m)} \quad \dots(3)$$

$$r_{sg} = k_{sg} \cdot r_s \text{ (m)} \quad \dots(4)$$

donde:

r_s : Distancia de impacto.

r_{sg} : Distancia de impacto al plano de tierra.

I_s : Corriente de retorno en (kA).

k_{sg} : Entre 0,6 y 1 según el criterio de diferentes autores dependiendo del nivel de voltaje y la altura de la línea.

h : Altura de los cables protectores de la línea en caso de que esté desprotegida.

b : Separación entre los cables protectores para una línea protegida con dos cables o la separación entre las fases extremas de una línea desprotegida e igual a cero para una línea protegida con un solo cable protector.

La razón de salida total de la línea es la suma de las salidas por impactos en la torre, por impactos en el vano entre torres y por fallas de blindaje.

Según lo planteado anteriormente el área total de impacto en una línea está dado por:

$$A_{total} = \frac{A}{1000} L \text{ (km}^2\text{)} \quad \dots(5)$$

donde:

L : Longitud de la línea en kilómetros.

El área de impacto en la torre será según la figura 2.

$$A_{torres} = A_t N_t \text{ (km}^2\text{)} \quad \dots(6)$$

donde:

A_t : Área de atracción de una torre.

$$A_t = \frac{\pi A r}{2} \text{ (km}^2\text{)} \quad \dots(7)$$

N_t : Número de torres de la línea.

$$r = \sqrt{r_s^2 - (r_{sg} - h)^2} \text{ (km)} \quad \dots(8)$$

El área del vano entre torres se determina por la diferencia entre el área total (A_{total}) y el área de las torres (A_{torres}):

$$A_{vano} = A_{total} - A_{torres} \text{ (km}^2\text{)} \quad \dots(9)$$

Una situación especial se presenta para valores de corriente de rayo donde las áreas de atracción de las torres se solapan (figura 3); en este caso al área de las torres calculada anteriormente se le resta a las áreas de solapamiento:

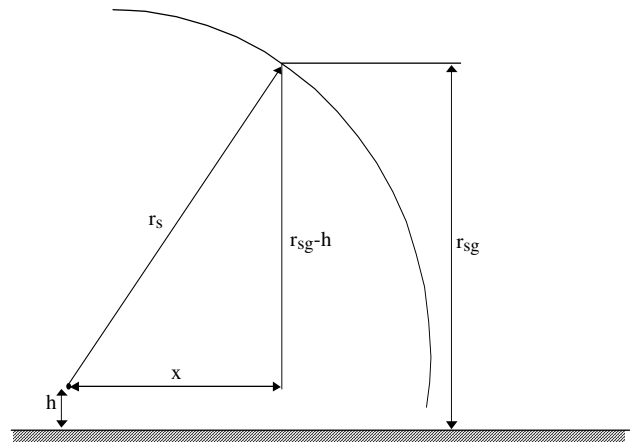
$$A_{torres} = A_{torres} - (N_t - 1) A_{solapamiento} \text{ (km}^2\text{)} \quad \dots(10)$$

donde:

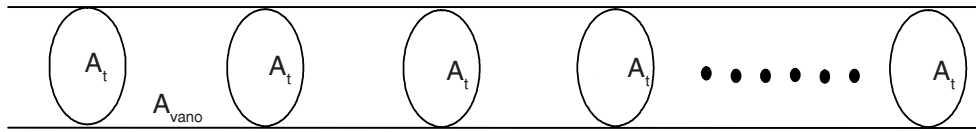
$$A_{solapamiento} = \frac{1}{8} \left[-2L_v \sqrt{A^2 \left(4 - \frac{L_v^2}{r_s^2} \right)} + \left(4L_v^2 + A^2 \left(4 - \frac{L_v^2}{r_s^2} \right) \right) \text{ArcTan} \left(\frac{\sqrt{A^2 \left(1 - \frac{L_v^2}{4r_s^2} \right)}}{L_v} \right) \right] \quad \dots(11)$$

donde:

L_v : Longitud del vano entre torres.

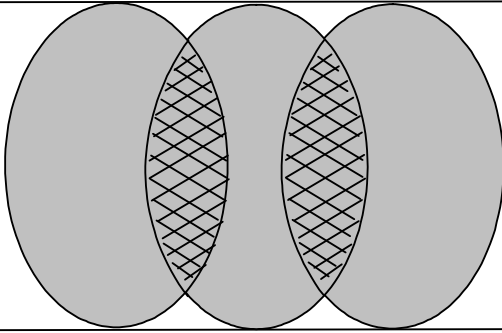


Área de atracción a ambos lados de la línea.



Áreas de impacto en una línea.

2



Solapamiento del área de atracción de las torres.

3

DETERMINACIÓN DE LA RAZÓN DE SALIDA POR IMPACTOS EN LA TORRE Y EL VANO

Partiendo de la corriente mínima capaz de hacer fallar el aislamiento para impacto en la torre I_1 con un tiempo de frente medio de $5,5 \mu s$. Cualquier corriente igual o mayor que esta I_1 impactará la torre si incide dentro de su área de atracción A_{torres} . Este valor de corriente se incrementa hasta 250 kA en pasos de $0,5 \text{ kA}$. Para cada corriente se calcula la nueva distancia de impacto y con ella la nueva área de atracción.

Si la densidad de rayos a tierra de la región es N_g (número de rayos por km^2 al año) para cada corriente la razón de salida será:^{2,3}

$$N_{A1} = P(I) \cdot N_g \cdot A_1 \quad \dots(10)$$

donde:

$P(I)$: Función de la distribución acumulada de la corriente y está dada por:

$$P(I) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_1}{31}\right)^{2.6}} \quad \dots(11)$$

en cada incremento de corriente se calcula:

$$\Delta N_{A1} = P(I) \cdot N_g \cdot \Delta A \quad \dots(12)$$

donde:

ΔA : Incremento de área para cada corriente.

El índice de salida total por impacto en la torre N_{A1T} es:

$$N_{A1T} = N_{A1} + \sum_{I=I_1}^{250} \Delta N_{A1} \quad \dots(13)$$

De igual forma se procede para el cálculo de la razón de salida por impactos en el vano, siendo en este caso el área de impacto el área de vano A_{vano} y la corriente mínima I_1 , es la menor corriente de rayo que impactando en el vano hace fallar el aislamiento. En este caso para cada incremento de la corriente de rayo se produce una reducción del área de impacto en el vano, existiendo por tanto un decremento de área ΔA , por lo que el número de salidas por impacto en el vano es:

$$N_{A1V} = N_{A1} - \sum_{I=I_1}^{250} \Delta N_{A1} \quad \dots(14)$$

El índice total de salidas por descargas inversas es:

$$N_{DI} = N_{A1T} + N_{A1V} \quad \dots(15)$$

DETERMINACIÓN DE LA RAZÓN DE SALIDA POR FALLA DE BLINDAJE

La figura 4 se construye de la siguiente forma:

1. Se calculan las distancias r_g y r_c para una corriente específica I .
2. Se traza una línea paralela a la tierra con una separación r_g .
3. Se trazan los arcos con radios r_c tomando como centro el punto correspondiente a la altura a que se encuentra el cable de protección y el punto correspondiente a la altura a que se encuentra el conductor de fase.
4. Según el modelo, una descarga con una intensidad de cresta I a la que corresponde un arco de radio r_c .
 - Debe terminar en el conductor de fase, zona de falla (Z_f), si el canal vertical de la descarga está entre A y B .

- Más allá del punto B la descarga terminará en la zona de tierra.
- Finalmente, si el canal vertical está sobre el arco AO , la descarga irá al cable de tierra zona protegida (Z_p).

Para cada valor de corriente se presenta una zona desprotegida, que corresponde al arco AB o la distancia horizontal Z_f de la figura 4.

De la figura 4 se calculan L y b .

$$L = a_2 - a_1 \quad \dots(16)$$

$$b = y_1 - y_2 \quad \dots(17)$$

El ángulo entre los radios r_c está definido con 2β y es:

$$\beta = \sin^{-1} \frac{c}{2 \cdot r_c} = \sin^{-1} \frac{\sqrt{L^2 + b^2}}{2 \cdot r_c} = \sin^{-1} \frac{b \cdot \sqrt{1 + \tan^2 \alpha}}{2 \cdot r_c} \quad \dots(18)$$

Los ángulos θ y α son:

$$\theta = \sin^{-1} \frac{r_g - y_2}{r_c} \quad \dots(19)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{L}{b} \quad \dots(20)$$

De aquí se obtienen las zonas protegidas y de falla

$$m = r_c \cdot \cos \theta \quad \dots(21)$$

$$n = r_c \cdot \cos(\alpha + \theta) \quad \dots(22)$$

$$Z_p = D_g = r_c \cdot \cos(\alpha - \beta) \quad \dots(23)$$

$$Z_f = m - n = r_c \cdot [\cos \theta - \cos(\alpha + \beta)] \quad \dots(24)$$

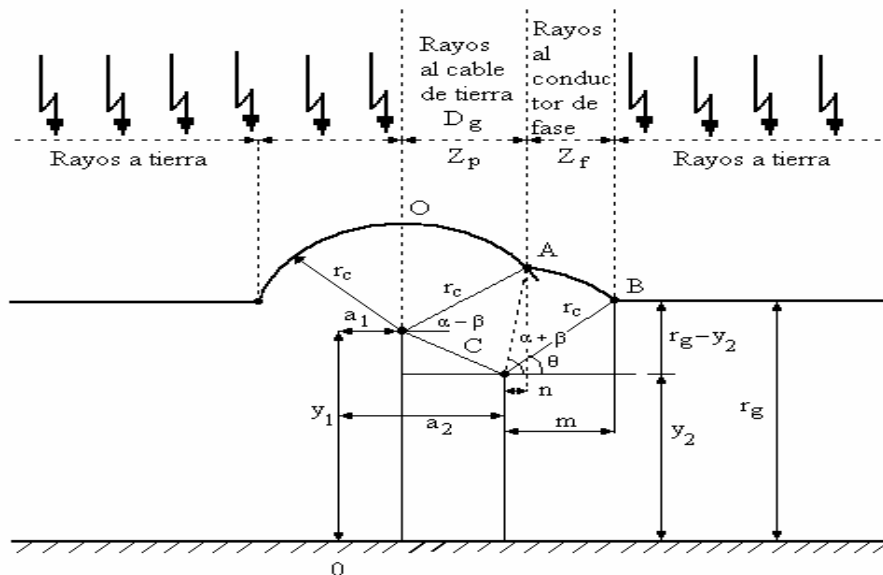
Si r_g es menor o igual a y^2 se hace θ igual a cero.

$$A_1 = m - n \quad \dots(25)$$

Partiendo de la corriente mínima capaz de hacer fallar el aislamiento con un tiempo de frente medio de $5,5 \mu s$, por impacto en los conductores de fase, cualquier corriente igual o mayor que esta I_1 impactará los conductores de fase si incide dentro del área de atracción A_1 (área de atracción de la torre de la figura 4). Este valor se incrementa hasta la máxima corriente capaz de provocar falla de blindaje, en pasos de $0,5 \text{ kA}$. Para cada corriente se calcula la nueva distancia de impacto y con ella la nueva área de atracción.

Se repite el mismo proceso descrito hasta obtener el índice de salida por falla de blindaje N_f . El índice de salidas total de la línea N es:

$$A_1 = m - n \quad \dots(26)$$



Área de atracción para falla de blindaje.

En la tabla 1 se hace una comparación de los resultados obtenidos con el método propuesto y los obtenidos por Grant y Anderson utilizando técnicas de Monte Carlo y por Chowdhuri usando

un método alternativo pero menos exacto que el desarrollado en este trabajo.¹ Como se puede apreciar los resultados son muy similares.

TABLA 1
Resultados comparativos entre el método propuesto y los desarrollados por Grant y Anderson, y por Chowdhuri¹

Altura de la Línea (m)	Rayos incidentes en 100 km de línea al año								
	Grant y Anderson (Monte Carlo)			Chowdhuri (Alternativo)			Método propuesto (Alternativo)		
	Ksg=0,6	Ksg=0,8	Ksg=1	Ksg=0,6	Ksg=0,8	Ksg=1	Ksg=0,6	Ksg=0,8	Ksg=1
10	175,6	142,3	85,1	176,4	145,0	85,7	176,74	146,92	88,76
20	184,4	159,4	117,6	185,8	161,2	117,7	185,62	162,32	121,01
30	189,8	171,5	139,0	192,5	173,4	139,6	191,7	173,74	141,73
40	193,4	179,7	155,3	196,9	182,5	155,8	195,2	181,99	156,88

CONCLUSIONES

1. Con la determinación de las corrientes críticas por impacto en la torre y en el vano y la determinación por separado de ambos índices de salida, se logra una mayor exactitud en el índice de salidas por impactos directos.
2. El método propuesto brinda una mayor exactitud que el método propuesto por Chowdhuri,¹ específicamente en lo relacionado con la determinación de las áreas de impacto en las torres y el vano entre torres.
3. Los métodos alternativos superan los métodos basados en la aplicación de las técnicas de Monte Carlo reduciendo considerablemente los tiempos de cómputo.

REFERENCIAS

1. **Chowdhuri, P.:** "Electromagnetic Transients in Power Systems", *Research Studies Press LTD*, 1996.
2. **Anderson, J. G.:** "Lightning Performance of Transmission Lines", *Transmission Line Reference Book 345 kV and Above*, second edition, Revised. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, 1987.
3. **Valcárcel, A.:** "Simulación de transitorios electromagnéticos generados por rayos en redes eléctricas", Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencia Técnicas, UCLV, Cuba, 2001.

AUTORES

Alfredo Ramírez Ramírez

Ingeniero Mecánico Electricista, Catedrático, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad Veracruzana, Veracruz, México
e-mail: alramirez@uv.mx

Ángel C. Valcárcel Rojas

Ingeniero Electricista, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Universidad Central de Las Villas, Villa Clara, Cuba
e-mail: valca@uclv.edu.cu

UNIVERSIDAD 2008

La Universalización de la Universidad por un mundo mejor

6to. Congreso Internacional de Educación Superior

11 al 15 de febrero del 2006, Palacio de las Convenciones, La Habana, Cuba

