



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

TÉCNICA NO CONVENCIONAL UTILIZANDO DESCARGADORES DE ZnO, APLICABLES EN LA MEJORÍA DE DESEMPEÑO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DEL SIN, ANTE SOBRETENSIONES DE FRENTE RÁPIDO

Luis Antonio Sosa Almirón

Administración Nacional de Electricidad - ANDE

Paraguay

RESUMEN

El trabajo tiene como objetivo presentar una técnica aplicable a la mejoría de desempeño de Líneas de Transmisión ante descargas atmosféricas. Con la utilización de técnicas no convencionales como la instalación de descargadores de ZnO, se pretende agregar un paso más a la evolución de las prácticas de la mejoría de desempeño aplicables a Líneas de Transmisión del SIN, ante descargas atmosféricas. Como soporte para el análisis se utilizan el modelo Electrogeométrico y el método de Monte Carlo. El modelado de los fenómenos transitorios y el análisis de alternativas son simulados en el ATP. El Matlab es utilizado para la implantación del modelo Electrogeométrico y el método de Monte Carlo.

PALABRAS CLAVES

Técnica no Convencional – Descargas Atmosféricas - Líneas de Transmisión –
Descargadores de ZnO – Método de Montecarlo – Modelo Electrogeométrico.



X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

1. INTRODUCCION

Las sobretensiones de frente rápido son sobretensiones transitorias con valores de cresta en el rango de $0,1 \mu s < T_f \leq 20 \mu s$. Las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas o rayos en líneas de transmisión (LT's) son consideradas sobretensiones de frente rápido [1].

El comportamiento de las líneas aéreas ante un rayo depende de un conjunto de factores de los cuales los más importantes son los siguientes: la densidad de impactos de rayo, la altura de la línea aérea, la configuración de los conductores, los cables de guardia, la puesta a tierra de los apoyos. También las diferentes distancias mínimas que definen a una línea de transmisión.

La evaluación de desempeño estadístico de líneas de transmisión debe permitir una evaluación consistente de la misma, ante un fenómeno sujeto a parámetros de naturaleza fuertemente aleatoria. En el estudio estadístico se puede emplear el método de simulación de Monte Carlo, sea para la evaluación de sobretensiones de maniobra o de sobretensiones atmosféricas. Las variables aleatorias presentes en el fenómeno son: intensidad de la corriente de rayo, tiempo de frente, local de la caída del rayo, ángulo de caída del rayo, resistencia de aterramiento, tensión instantánea operativa, soportabilidad del aislamiento. En los estudios probabilísticos algunas variables necesitan un tratamiento más simplificado, como por ejemplo la resistencia de aterramiento [2].

En la práctica muchas líneas tienen vanos muy extensos y frecuentemente tienen sus torres en lo alto de colinas, algunas de ellas constituidas de rocas. En ese caso valores extremadamente elevados son encontrados para la resistencia de puesta a tierra de las mismas, mismo cuando cabos contrapesos muy largos sean empleados. En este escenario, en contraposición a una gran extensión, un número limitado de torres correspondientes a las torres posicionadas en esos puntos elevados y de alta resistencia de puesta a tierra (puntos críticos), pueden determinar todo el desempeño ante descargas atmosféricas. Según [2], [3] y [4], en estudios de desempeño de LT's, se verifican que la mayor parte de las desconexiones están asociados a tramos críticos con elevados valores de resistividad del suelo y altos índices cerámicos.

2. UTILIZACION DE DESCARGADORES EN LINEAS DE TRANSMISION

Las prácticas convencionales para la mejoría de desempeño de las líneas de alta tensión ante descargas atmosféricas comprenden un conjunto limitado de acciones. A más de las prácticas tradicionales, existe una variedad de prácticas no convencionales. La instalación de descargadores en las fases de las LT's, es una técnica no convencional que ha sido implantada en distintos países a nivel global, en diversos niveles de tensión como por ejemplo 69, 138, 230 y 400 KV. Fueron obtenidos resultados muy satisfactorios, con reducciones de hasta 70 % de las fallas debidas a sobretensiones originadas por rayo [5]. Diversos fabricantes han desarrollado descargadores ZnO para utilización específica en LT's, provistos con encapsulamiento de material polimérico, que reduce considerablemente el peso de los mismos y permiten su instalación con técnicas de líneas vivas. Así también, contemplan la instalación de dispositivos de desconexión en caso de fallas debidas a excesivas sollicitaciones térmicas en los mismos [6].

3. MÉTODO DE MONTECARLO

Procedimiento numérico iterativo que utiliza en cada nuevo cálculo un conjunto de valores distintos que se varían de acuerdo a la distribución de probabilidad asociada a cada una de las variables involucradas en el proceso [2],[7], [8] y [9].

4. MODELO ELECTROGEOMÉTRICO

Con el modelo Electrogeométrico, se determinan las distintas superficies de atracción producidas por el rayo, y a partir de estas con la ubicación del canal de rayo, se verifica si el impacto del rayo se produce en: la torre, el cable de guardia, en una de las fases o en el suelo [2], [7], [8] y [9].

5. METODOLOGIA UTILIZADA

Se evaluarán los impactos de rayo en una torre correspondiente a una línea de transmisión de con tensión nominal de 220 kV

Con el método de Monte Carlo y el modelo Electrogeométrico, se determinan las entradas para las simulaciones en el ATP [2] y [8]. En este caso se realizaron 30.000 iteraciones en el método de Montecarlo. El método de Monte Carlo y el modelo Electrogeométrico son implementados en MATLAB. En las simulaciones para la obtención de las sobretensiones resultantes, se consideran a las cadenas de aisladores con y sin instalación de descargadores en las fases.

5.1 Modelos Utilizados para las simulaciones en el ATP

Localización del canal vertical de descarga: se obtiene suponiendo una distribución uniforme [2] y [8].

Corriente de rayo: se representa mediante una fuente de corriente con forma cóncava, cuyos parámetros se calculan de forma aleatoria de acuerdo con una función de densidad de probabilidad logarítmica-normal con sus parámetros de base [2] y [8].

Tensiones a frecuencia de operación: el valor de la tensión en cada fase se calcula de forma aleatoria con una distribución uniforme del ángulo de fase entre 0° y 360° [8].

Cadena de Aisladores: considerando el objetivo propuesto en el presente trabajo es representada por llaves controladas por tensión, tomándose como referencia la tensión normalizada a impulso tipo rayo de 950 kV [1] y [9]

Torres: se representan mediante una línea monofásica con parámetros distribuidos y sin pérdidas de acuerdo a los criterios indicados en [2], [8] y [10]. La silueta considerada se observa en la Figura (1).

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

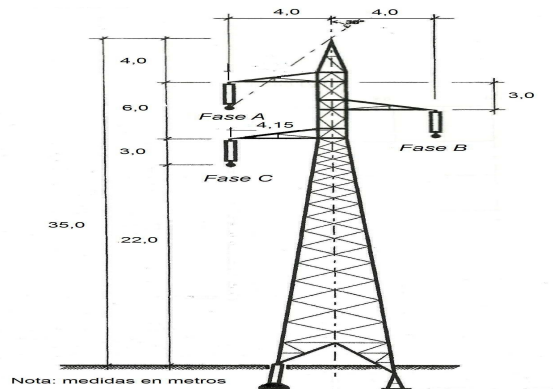


Figura 1: Silueta de Torre utilizada

Línea de Transmisión: se representada con 4 vanos a cada lado del punto de impacto. El modelo de un vano es el de un tramo de línea no transpuesta, con parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia [2] y [8]. Se considera a la línea instalada en perfil de suelo ondulado. Para los conductores de fase se considera el Grosbeak ACSR con sección total de 374,71 mm² y para el cable de guardia un cable de acero EHS, con diámetro de 9,52 mm.

Impedancia de Puesta a Tierra: En la torre estudiada, la impedancia de puesta a tierra es modelada con una resistencia no lineal R_t que tiene en cuenta la ionización del suelo [2] y [8] de acuerdo a la ecuación (1).

$$R_t = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (1)$$

Siendo R_0 la resistencia de puesta a tierra a baja corriente y baja frecuencia, I el valor de cresta de la corriente de descarga a través de la resistencia, I_g la corriente límite que representa la ionización del terreno.

Descargadores: Se utiliza el modelo de descargador sugerido por el IEEE W.G. 3.4.11, para rayos u otras sobretensiones de frente rápido. El cálculo de los parámetros iniciales y el ajuste de los mismos fué realizado de acuerdo a [11] y [12].

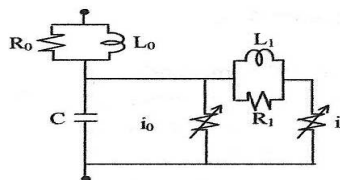


Figura 2: Modelo IEEE de descargador dependiente de la frecuencia [9]

El descargador seleccionado es de tensión nominal 192 kV y $U_{10}=452$ kV para una corriente de 10 kA 8/20 μ s [6].

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

5.1 Validación de modelos utilizados en las simulaciones

A continuación son presentados los resultados considerados para la validación de modelos: En la Figura (3), es posible notar las sobretensiones resultantes de la simulación en la fase inferior C de la torre impactada por un rayo de $I=20\text{ kA}$, $T_1=1\ \mu\text{s}$, $T_2=50\ \mu\text{s}$, $R_0=70\ \Omega$ y la obtenida de acuerdo a [2] en la fase C de una torre con una geometría con bastante similitud correspondiente a una línea de transmisión de 138 kV.

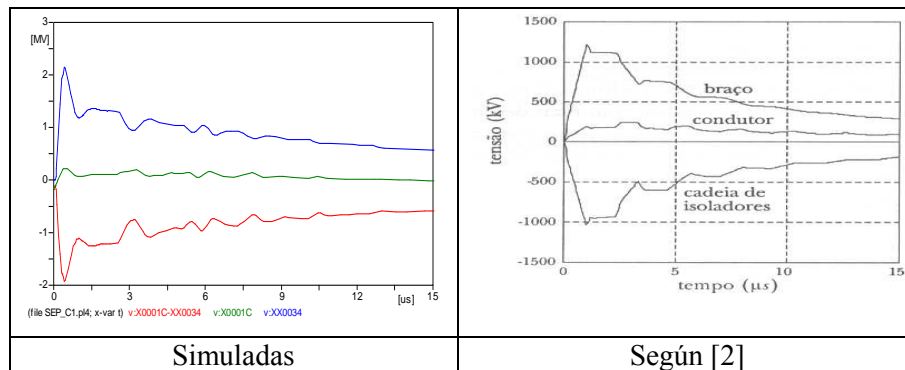


Figura 3: Formas de ondas de sobretensiones simuladas y según [2]

El modelo implantado del descargador ZnO y verificado de acuerdo a [11] y [12], produjo un error menor a 1% con relación a datos de catalogo de fabricante [6].

En la Figura (4) se pueden notar: la distribución de los canales de descargas de rayo y el histograma de las intensidades de corrientes de rayo generadas, resultantes después de 30.000 iteraciones del método de Monte Carlo.

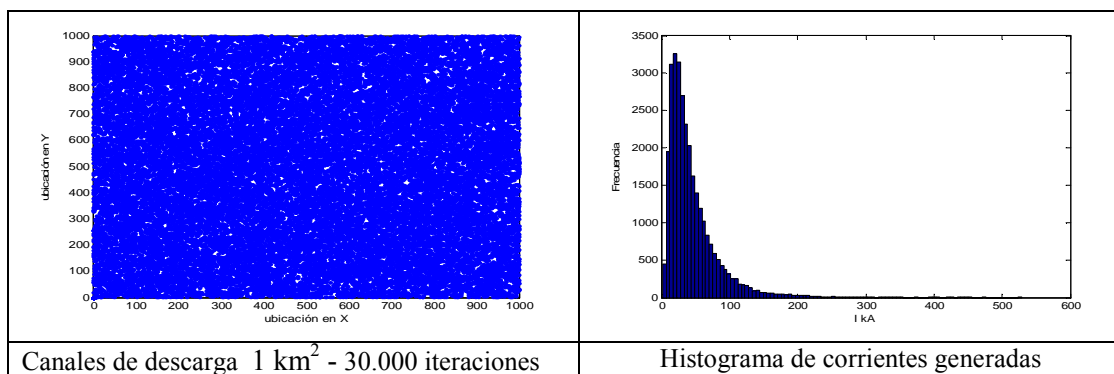


Figura 4: Canales de descargas en 1 km^2 e intensidades de corrientes de rayo generadas

6. RESULTADO DE SIMULACIONES

La Tabla I, contiene los valores para la entradas de las simulaciones en el ATP de ángulos de las tensiones de la fase A de frecuencia industrial y las intensidades de corrientes de rayos con sus respectivos tiempos de duración a: valor de cresta (T_1) y valor medio (T_2), que fueron generados en la simulación del método de Monte Carlo. Se discriminan los casos con los rangos

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
 19, 20 y 21 de setiembre de 2012

de corrientes que impactan a la torre y las que impactan a las fases por falla de blindaje de acuerdo al modelo Electrogeométrico. A más de los límites inferior y superior de cada rango, se toman algunos valores adicionales de la muestra obtenida en la simulación del método de Monte Carlo. También se incluye la probabilidad que cada valor de intensidad de corriente pueda ser excedida $P(\%)$, de acuerdo a [2] y [7].

Tabla I: Corrientes de rayos y ángulos de tensiones a 50 Hz (fase A)

Impacto de Rayo	Casos	Parámetros del Rayo y P(%)				Angulo de Tensión 50 Hz (rad)
		I(A)	P (%)	T ₁ (μs)	T ₂ (μs)	
En la Torre	1	3.190	99,73	1,0902	86,5750	6,2557
	2	15.001	86,84	1,4558	58,2094	6,0353
	3	138.507	2,00	1,0515	42,3123	1,3560
	4	199.794	0,80	4,7370	80,8525	1,7746
Fase A	5	4.968	99,15	0,9965	49,2553	5,8674
	6	7.002	97,95	1,1692	33,7840	4,7098
	7	22.757	69,08	1,6246	71,8260	4,4011
Fase B	8	4.882	99,19	1,6255	95,4337	5,0585
	9	6.946	97,99	4,4986	52,7031	3,1230
	10	13.109	90,36	1,5658	23,7249	4,5641

En la Tabla II, se presentan los resultados indicándose si se producen o no contorneos en las cadenas de aisladores, con y sin descargadores instalados en las fases A, B y C. Las simulaciones fueron realizadas con los valores de los casos de la Tabla 1, para valores de R_o de: 5, 70 y 310 Ω. Los casos sin contorneo se marcan con una X.

Tabla II: Registro de Contorneos en las fases.

Impacto de Rayo	Casos	Sin descargadores en las fases A, B, C			Con descargadores en las fases A, B, C		
		Ro=5 Ω	Ro=70 Ω	Ro=310 Ω	Ro=5 Ω	Ro=70 Ω	Ro=310 Ω
		Contorneo Fases	Contorneo Fases	Contorneo Fases	Contorneo Fases	Contorneo Fases	Contorneo Fases
En la Torre	1	X	X	X	X	X	X
	2	B	B	B	X	X	X
	3	ABC	ABC	ABC	X	X	X
	4	ABC	ABC	ABC	X	X	X
Fase A	5	A	A	A	X	X	X
	6	A	A	A	X	X	X
	7	AB	ABC	ABC	X	X	X
Fase B	8	BC	BC	BC	X	X	X
	9	B	B	B	X	X	X
	10	B	B	BC	X	X	X

En la Figura (5), se presentan las formas de ondas obtenidas de las sobretensiones resultantes simuladas en el *Caso 3* con y sin descargadores instalados en las fases A, B y C. Es posible notar que no se producen contorneos en ninguna de las tres fases cuando se tienen instalados los descargadores.

X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

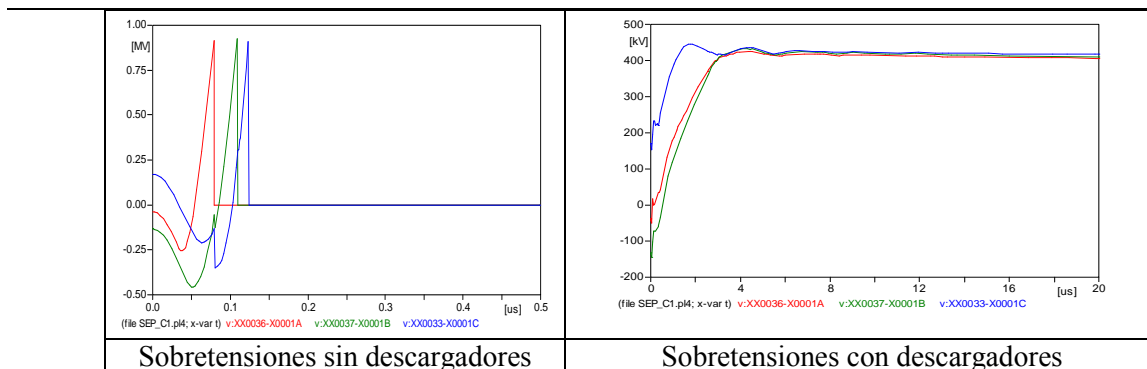


Figura 5: Sobretensiones simuladas en las fases (Caso 3), con y sin descargadores

ALGUNOS REGISTROS DE INTERRUPCIONES

En la Tabla III, se presentan algunos registros de interrupciones en condiciones de tiempo adverso de la LT 220 kV SLO-CAP-ELA-COV, con las señalizaciones de fases afectadas según indicadas por las protecciones. Considerar que las fases A, B y C de las simulaciones, corresponden respectivamente a R, S y T indicadas en las señalizaciones.

La tasa de fallas en tiempo adverso de la LT en el periodo 2007-2011 resultó en 3,6 fallas/año/100 km. En el año 2009 no se registraron interrupciones.

Tabla III: Algunos registros de interrupciones en la LT 220 kV SLO-CAP-ELA-COV

Fecha	Señalización de Fase	Fecha	Señalización de Fase	Fecha	Señalización de Fase	Fecha	Señalización de Fase
03/01/07	ST	19/04/08	RST	23/03/10	RST	16/08/11	RST
03/12/07	RST	16/10/08	RST	06/05/10	RST	24/10/11	RST
18/12/07	R	**	**	23/09/10	RST	29/10/11	RST

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación del método de Montecarlo y del modelo Electrogeométrico en el Matlab, han permitido reproducir con éxito las variables aleatorias consideradas en el estudio. También permitieron identificar los rangos de intensidades de rayos que inciden en la cabeza de la torre y las corrientes que pueden ocasionar falla de blindaje, que en el caso, estas últimas resultaron en intensidades comprendidas entre 4,97 kA y 22,76 kA para la fase A y para la fase B, entre 4,88 kA y 13,11 kA.

Contorneos pueden producirse inclusive para valores bajos de resistencia de puesta a tierra.

La instalación de descargadores en las fases de la torre estudiada en todos los casos ha evitado el contorneo en las fases, inclusive para valores elevados de resistencia de puesta a tierra.

La instalación de descargadores puede ser un complemento aplicable en zonas críticas en donde con técnicas convencionales como la reducción de resistencia de puesta a tierra no se ha logrado un desempeño adecuado, debido a factores tales como: elevados valores de resistividad de suelo, características geográficas de emplazamiento de la línea, índice cerámico elevado, o combinación de estos.



X SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
19, 20 y 21 de setiembre de 2012

La metodología utilizada es aplicable a líneas de transmisión de los demás niveles de tensión del SIN.

Se continuara con la línea de trabajo con la finalidad de obtención de la tasa de falla de líneas de transmisión ante descargas atmosféricas con un método de coordinación de aislamiento estadístico. Con ello se podrán realizar estudios de configuración de instalación de descargadores para un desempeño deseado.

Realizar un seguimiento y registro de la actuación de las protecciones es de fundamental importancia para el estudio de eventos en las LT's ante descargas atmosféricas y para la determinación de las zonas críticas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] IEC 60071 – 1: 2006-01, “Insulation co-ordination. Part 1: Definitions, principles and rules” , páginas 11, 23.
- [2] L. C. Zanetta Junior, “Transitorios Eletromagnéticos en Sistemas de Potencia”, Editora da Universidade de São Paulo, 2003, páginas 442-462, 629-670.
- [3] A. Soares Jr, S. Visacro, L. Leal, “Investigação de Configurações Otimizadas para o Aterramento das Torres do Sistema de Transmissão da CEMIG para a Melhoria de Desempenho frente a Descargas Atmosféricas” – XIV SNPTE – Año 1997, páginas 1 y 6.
- [4] L.A. Sosa Almirón, “Experiencias en el Proceso de la Mejoría de Desempenho de LT 66 kV PAR-QUI-CAU”, *VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO – CIGRÉ, Asunción*, 2008, páginas 2-6.
- [5] Ivo Uglesic, “General Report – Application of Line Surge Arresters in Power Distribution and Transmission Systems”, International CIGRÉ Colloquium 2008, Cavtat, Croatia, 25-29 May, páginas 1-10.
- [6] ABB High Voltage Surge Arrester Buyer’s Guide, Edition 8, 2010-2012, páginas 24-27, 38
- [7] CIGRE Working Group 01(Lightning) of Study Comitee 33 (Overvoltages and Insulation Coordination), “Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines”, CIGRE Brochure 63, 1991, páginas 13-20, 25-29.
- [8] J.A.M. Velazco, F.C. Aranda, “Lightning Performance Analisis of an Overhead Transmission Line Protected by Surge Arrester” , IEEE LATIN AMERICAN TRANSACTION, VOL. 7, NO. 1, MARCH 2009, páginas 63-65.
- [9] Ary D’ajuz, C. Fonseca, F.M. Salgado, *et al*, “Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento – aplicação em sistemas de potencia de alta tensão”, Furnas Centrais Elétricas S.A. – Universidade Federal Fluminense, 1987, páginas 173, 259-261.
- [10] A. Soares, Jr, S. Visacro, A. Pinheiro, “Proposição de Fórmulas Simplificadas para o Cálculo da Impedancia de Surto de Torres de Transmissão Autoportantes”, XVIII SNPTEE – Seminario Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 2005, página 2.
- [11] IEEE WORKING GROUP 3.4.11 – Application of Surge Protective Devices Subcommittee – Surge Protective Devices Committee, “MODELING OF METAL OXIDE SURGE ARRESTERS”, Transaction on Power Delivery, Vol. 7, January 1992, páginas 302-309.
- [12] T. Saengsuwan, W. Thipprasert, “The Lightning Arrester Modeling Using ATP-EMTP”, Kasetsart Journal Natural Science, Kasetsart University, Bangkok , Thailand, Vol. 42, 2008, páginas 156-164.