

Análisis de Sobre Tensiones en una Estructura de Línea de Transmisión debido a descargas de Rayo

Analysis of Envelope Tension in a Line Structure of Transmission Due to Beam Downloads

Erasmó A. Echeverría Peche¹

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

Resumen— El análisis de las sobre tensiones ocasionado por descargas de ondas de corrientes de rayo sobre una línea de transmisión (LT), permite evaluar los métodos existentes para mejorar el diseño y obtener una respuesta eficaz del aislamiento de las estructuras o torres de transmisión, a estos eventos electromagnéticos de corta duración y disipación de gran cantidad de energía. La tensión, capacidad y trazado de ruta son determinantes para el diseño de la LT; sin embargo, el blindaje y aterramiento adecuado son importantes a los transitorios ocasionados por corrientes de rayo. En este trabajo se ha considerado el criterio básico para el control del nivel de aislamiento, a través de los parámetros de los componentes del aterramiento, como el material y geometría de la estructura, apantallamiento del cable de guarda, puesta a tierra y/o pararrayos. Posteriormente se efectuó el análisis de las sobre tensiones transitorias por caída de rayo, aplicando modelos adecuados a los componentes del aterramiento y mediante simulaciones con el uso del ATP (Alternative transient program), se aplicó a una LT 138 kV ubicado en la sierra de Ancash; se ha calculado las sobre tensiones, verificando el sostenimiento del aislamiento de la LT a impulsos de rayo, bajo las condiciones del sistema de aterramiento preestablecido.

Palabras claves- Ondas de Corriente de Rayo, Líneas de Transmisión, Torre de Transmisión, Puesta a Tierra, impedancia de impulso, ATP, Sobre Tensiones por descargas de Rayo, Tensiones Críticas de descarga, Nivel de aislamiento.

Abstract—The analysis of the over tensions caused by wave the lightning currents on transmission line (TL), it allows to evaluate the existing methods to improve the design and to obtain an effective response of the isolation of the structures or towers of transmission, to the electromagnetic events of short duration and dissipation

of great quantity of energy. The tension, capacity and tracing route are determinant for the design of the TL; however, the shielding and the grounding suitable are important to the transitory chances the lightning currents. In this work it has been considered to the basic criterion for the control of the level isolation, through the parameters of the components of grounding as the material, geometry of the structure, guard's screening cable, grounding and / or lightning rod. Later the analyses have been effected the over tensions transitory by lightning strike, for it has been selected the suitable models of elements the grounding and by means of simulations with the use the ATP, for a TL 138 kV located in Ancash's ridge of mountains; it have been calculated the over tensions, checking the level of the isolation of the TL to impulses of lightning, under the conditions of the grounding system pre-established.

Key Words— Wave of lightning current, Transmission Lines, Transmission tower, Grounding, impedance of impulse, ATP, Over tensions to lightning strike, critical tensions of strike, isolation level.

I. INTRODUCCIÓN

La descarga tipo rayo es una de las mayores causas de fallas de las líneas eléctricas que operan en zonas de descargas atmosféricas, como es el caso de las líneas ubicadas en la zona de Sierra y Selva de nuestro país; los fenómenos atmosféricos ocasiona daños en los equipos de las instalaciones eléctricas, daños a vidas humanas, pérdidas económicas a las Empresas por las interrupciones. Revisando las estadísticas de fallas de Líneas de Transmisión (LT) del Sistema Interconectado Nacional (SEIN), se ha determinado que aproximadamente del 25% al 30% de fallas son ocasionados por las descargas de Rayos; razón por la cual amerita efectuar los análisis de la respuesta transitorias a las corrientes de impulso tipo Rayo de los componentes de aterramiento de las LT, y determinar la protección más conveniente para reducir

¹Erasmó Echeverría Peche, Email: eccheverriap@unmsm.edu.pe

el número de interrupciones temporales y controlar las sobre tensiones ocasionadas por las ondas de Rayo.

El comportamiento de una LT ante las descargas tipo rayo, tiene mucha incertidumbre, porque depende de muchas variables, tales como: densidad de rayos a tierra (*Ground Flash Density-GFD*), Intensidad y forma de la onda de Rayo, altura de torre, disposición de los elementos de blindaje respecto a los conductores de fase en la torre y Puesta a Tierra, para disipar la corriente al suelo en corto tiempo; estos elementos deben controlar las sobretensiones para evitar superar el nivel de aislamiento [1].

En este trabajo, se evalúa una metodología para el cálculo estimativo de las sobre tensiones causadas por corrientes de rayo en la estructura de la LT. Para los cálculos se ha modelado y determinado: la impedancia de onda para el cable de guarda (Z_{cg}), Torres de transmisión (Z_t) y Puesta a Tierra (Z_{pt}) con impedancia baja y armados que asegure la distribuya de la corriente de impulso en tiempos cortos. El cálculo se efectuó mediante simulaciones con el soporte del Software *Alternative Transient Program (ATP)*.

El control de las sobretensiones a las corrientes de impulso para la protección del aislamiento de las LT, se logra mediante el control de los elementos del sistema de aterramiento, para los análisis se debe considerar los siguientes criterios.

A. Espaciamiento eléctrico entre conductores y configuración de la estructura.

Actualmente, el dimensionado de los espaciamentos eléctricos de las LT no se toma en cuenta las exigencias de descargas atmosféricas, estas se dimensiona según el nivel de aislamiento interno, el cual tienen menor importancia a medida que el nivel de tensión se eleva por el aumento del nivel de aislamiento

B. Cantidad de aisladores por cadena, relacionados a la capacidad de sostenimiento a las sobre tensión (*BIL*).

La longitud de la cadena de aisladores (cantidad de aisladores) de una LT, se diseña para soportar todas las "sobre tensiones internas" (sobre tensiones por maniobra y sobre tensiones a baja frecuencia), pero no para las "sobre tensiones extremas" (impulso por corrientes de Rayo); porque el costo del aislamiento sería exageradamente elevado.

En el cálculo de sobre tensiones en baja frecuencia (internas), se deben hacer correcciones por variables ambientales, tales como: densidad relativa del aire, humedad absoluta y relativa, precipitación (lluvia), contaminación y viento (factor determinante del

ángulo de balanceo u oscilación). Pero cuando el aislamiento está sometido a impulsos tipo Rayo no se hacen correcciones por variables ambientales, porque no alteran el comportamiento del aislamiento.

C. Ángulo de apantallamiento, característica de blindaje relacionado a las dimensiones de la estructura.

El ángulo de apantallamiento, se dice que se logra el blindaje efectivo de los conductores, cuando la posición de los cables de guarda asegura que el número de salidas debido a la incidencia de los rayos en los conductores de fase (descargas directas) sea igual a cero. Cuando no se logra el blindaje efectivo, se diseña con una metodología de cálculo para determinar el índice de salidas por descargas directas o disrupciones en los conductores de fase.

La performance de la LT a la descargas de rayos, se obtiene por registros estadísticos o estimados, donde la falla del blindaje está asociada a caída de rayos de baja intensidad de corriente; y las salidas por caídas en los cables de guarda o en las torres de transmisión, asociado a corrientes de rayos de alta intensidad [1].

D. Puestas a tierra de las estructuras.

La Puesta a Tierra (PT) es un elemento importante del aterramiento para garantizar la reducción de las sobre tensiones de impulso en pie de la torre y adecuada disipación de la corriente de Rayo al suelo, razón por la cual las impedancias de impulso e impedancia de estado estacionario deben tener valores bajos; caso contrario, ocasionara flámeos inversos (*backflashovers*) que puede provocar falla y salida de servicio de la LT.

Estos criterios deben ser compatibilizados de tal modo que ofrezcan una menor tasa de salida preestablecida, según los criterios básicos del proyecto [2], [3].

II. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO TRANSITORIO

Cuando una onda de corriente de rayo cae en un cable de guarda, la corriente fluye en ambos sentidos a través del cable de guarda. Las ondas de tensión y corriente se propagan hasta llegar a la torre adyacente, luego estas bajan por la estructura y se encuentran con la PT que disipa la energía asociada con la descarga atmosférica, ver Fig.1. Cuando los rayos caen en el cable de guarda, induce una fracción de su potencial en los conductores de fase, afectado por el factor de acople capacitivo entre conductores y cable de guarda.

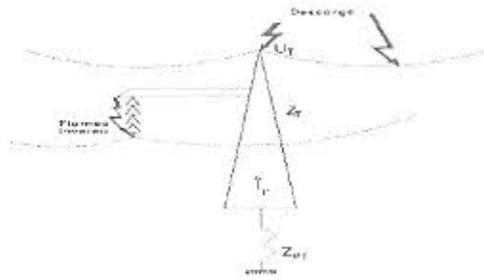


Fig.1 Incidencia del Rayo sobre el vano del cable de guarda y/o la estructura.

En forma idéntica cuando la descarga atmosférica cae directamente en la torre, las ondas de tensión y corriente se propagan a través de la torre hasta llegar al suelo y se encuentran con la PT, ver Fig. 2.

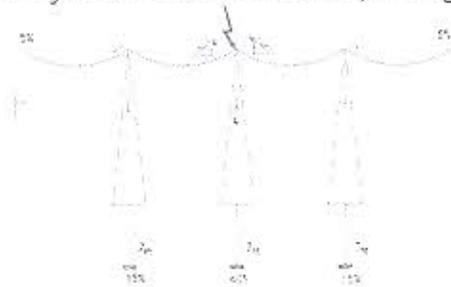


Fig. 2 Incidencia de Rayo en la torre de Transmisión.

Una descarga atmosférica, se considera como una fuente de corriente que fluye asociada al rayo a través de una impedancia. La tensión producida por la descarga es producto de la corriente y de la impedancia a través de la cual fluye. Los Rayos que inciden cercanos a las LT, tienen la tendencia de caer en las proximidades de los cables de guarda (CG) y las torres, porque constituyen los puntos más elevados de las líneas de transmisión.

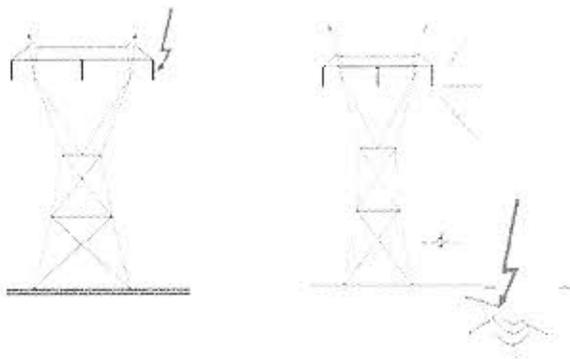


Fig.3 Falla de Protección a los rayos. Fig.4 Caída de Rayo a los rayos cerca a LT

La descarga cuando cae en el cable de guarda o directamente en la torre, al llegar a la base de la torre (suelo), si al encontrar una alta resistencia de puesta a tierra, no tiene un medio propicio para la dispersión de la corriente del rayo de manera eficaz, ocasionando un

súbito aumento de la tensión entre el brazo de la torre y el conductor de fase. Si éste supera el aislamiento de la cadena de aisladores, se presenta un flameo desde el brazo de la torre al conductor de fase; este fenómeno se conoce como descarga inversa (*backflashover*), ver Fig. 3.

Además, la corriente que fluye en la torre o cae cerca a ésta, también produce un campo magnético variable entre el conductor de fase y la torre, que contribuye al flameo inverso, ver Fig. 4. Para obtener un número de salidas de la LT aceptable, la impedancia de PT debe ser baja; más aún, si el nivel cerámico es alto.

III. METODOLOGÍA DE LOS CÁLCULOS ESTIMATIVOS

A. Análisis transitorio de la línea de transmisión

Cuando las corrientes de Rayo caen en el entorno de una LT blindada, este inciden directamente en los cables de guarda o en las torres, o tienden a caer en las proximidades de éstas, en los puntos más elevados del entorno de la LT. Estas corrientes son ondas electromagnéticas de frente escarpado que en tiempos muy cortos generan sobretensiones en los puntos de incidencia o a lo largo de ellos. Por lo tanto, para predecir la respuesta transitoria a la incidencia de estas ondas, se deberá resolver las ecuaciones de Ondas viajeras o ecuaciones de D'Alembert dado por las expresiones (1.1) y (1.2).

$$-\frac{dV}{dx} = Z * I \tag{1.1}$$

$$-\frac{dI}{dx} = Y * V \tag{1.2}$$

La tensión (V) y corriente (I) están relacionados con los parámetros longitudinales de la Impedancia serie (Z) y la Admitancia transversal paralelo (Y) de la LT. Utilizando la teoría de la Línea de Transmisión, mediante configuración trifásica y un cable de guarda como de la Fig. 5, se determina la matriz [Z] y [Y] construidos como en las ecuaciones (2) y (3), determinado según [1], [4] y [5].

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & z_{13} & z_{14} \\ z_{21} & z_{22} & z_{23} & z_{24} \\ z_{31} & z_{32} & z_{33} & z_{34} \\ z_{41} & z_{42} & z_{43} & z_{44} \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} \end{bmatrix} \tag{3}$$

La solución en el dominio de la frecuencia de las ecuaciones (1.1) y (1.2) se obtiene deduciendo las expresiones matemáticas de las Tensiones de recepción (V_R) y las corrientes de recepción (I_R) de una LT multifase, relacionados con las tensiones de suministro (V_S) y las corrientes de suministro (I_S), dado por la expresión (4).

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & [Z_0] \sinh(\gamma l) \\ [Z_0^{-1}] \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (4)$$

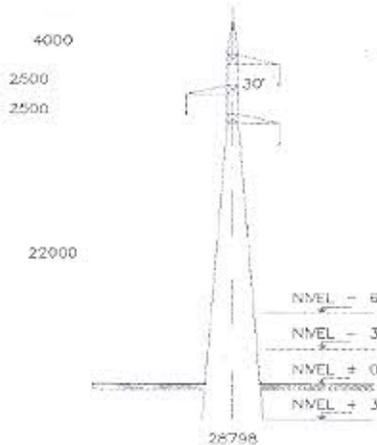


Fig.5 Configuración de torre para una LT con disposición de tres conductores tipo bolilla, con un cable de guarda.

La impedancia característica (Z_0) y el coeficiente de propagación de la onda (γ) de la ecuación (5), esta representado por una matriz 4×4 ; para determinar los elementos de las matrices se requiere calcular las funciones de:

$$Z_0 = \sqrt{Z/Y}, \quad \gamma = \sqrt{ZY}$$

$\cosh(\gamma * l)$ y $\sinh(\gamma * l)$. Para ello se usa las técnicas de descomposición modal [5], definiendo las variables modales $V_m = TV$ e $I_m = TI$; re-escribiendo la ecuación (1.1) y (1.2) se tiene:

$$-\frac{dV_m}{dx} = T^{-1} * Z * T * I_m \quad (5.1)$$

$$-\frac{dI_m}{dx} = T^{-1} * Y * T * V \quad (5.2)$$

Las ecuaciones anteriores mediante transformaciones se obtienen $Z_m = T^{-1} Z T$ y $Y_m = T^{-1} Y T$, estas son matrices diagonales. La función de una matriz diagonal puede ser calculada algebraicamente sus elementos de la función diagonal, donde la matriz de constantes de propagación para los modos independientes (el modo 1, 2, 3, 4) se obtiene por la ecuación (6).

$$\gamma_m = \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{Z_1 Y_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{Z_2 Y_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{Z_3 Y_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{Z_4 Y_4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Similarmente, la característica modal de la matriz impedancia característica puede ser expresada por la ecuación (7).

$$Z_{0m} = \begin{bmatrix} Z_{01} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{02} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_{03} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Z_{04} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{Z_1/Y_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{Z_2/Y_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{Z_3/Y_3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{Z_4/Y_4} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Donde Z_i e Y_i ($i = 1, 2, 3, 4$) son el elemento diagonal de la matriz Z_m e Y_m respectivamente. La matriz $\cosh(\gamma \square_m)$ se calcula por:

$$\cosh(\gamma_m) = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cosh(\gamma_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cosh(\gamma_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cosh(\gamma_4) \end{bmatrix} \quad (8)$$

El $\sinh(\gamma \square_m)$ puede ser calculado en forma idéntica, las matrices Z_{0m} , γ_m , $\cosh(\gamma_m * l)$ y $\sinh(\gamma_m * l)$ se transforma en el dominio de fase, según las expresiones siguientes.

$$Z_0 = TZ_{0m}T^{-1} \quad (9)$$

$$\cosh(\gamma l) = T * \cosh(\gamma_m l) T^{-1} \quad (10)$$

$$\sinh(\gamma l) = T * \sinh(\gamma_m l) T^{-1} \quad (11)$$

Usando la simetría de las líneas en la posición de torre, las ecuaciones terminales de las líneas de transmisión (conductores de fases y cable de guarda) pueden ser obtenidas por la ecuación (12).

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma l) & [Z_0/2] \sinh(\gamma l) \\ [2/Z_0^{-1}] \sinh(\gamma l) & \cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (12)$$

La ecuación de tensión-corriente de la LT, esta dado por:

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \\ V_{S4} \\ I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \\ I_{S4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} \\ c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} & d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} & d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} & d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & d_{41} & d_{42} & d_{43} & d_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{R1} \\ V_{R2} \\ V_{R3} \\ V_{R4} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \\ I_{R3} \\ I_{R4} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Esta ecuación también puede ser escrita en la forma compacta como

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (14)$$

La recepción al final de la línea de transmisión puede ser asumido como circuito abierto ($I_R = 0$); de ahí V_S se calcula por:

$$[V_S] = [A] [C]^{-1} [I_S] \quad (15.1)$$

$$[V_S] = [E] [I_S] \quad (15.2)$$

Donde $[E] = [A] [C]^{-1}$ esta definido como la **Matriz de Coeficiente de acoplamiento**, las corrientes de envío en la recepción (final) son cero para los conductores de fase ($I_{S1} = I_{S2} = I_{S3} = 0$), la ecuación (15.2) puede ser escrito como:

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \\ V_{S4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} & e_{14} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} & e_{24} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} & e_{34} \\ e_{41} & e_{42} & e_{43} & e_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{S1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Para el análisis computacional del transitorio de la LT, ante corrientes de impulso de rayos, se presenta el circuito equivalente de la fig. 6, desarrollado en [6] y [7].

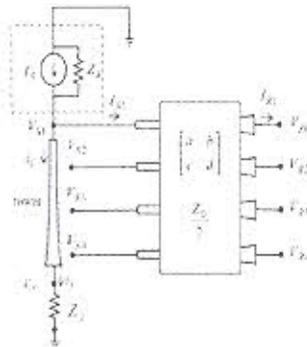


Fig. 6 Modelo de circuito equivalente del sistema de Puesta a Tierra y Línea de Transmisión.

Las Tensiones de envío final de las líneas son obtenidas por las ecuaciones [17].

$$V_{S1} = e_{11} * I_{S1} \quad (17.1)$$

$$V_{S2} = e_{21} * I_{S1} \quad (17.2)$$

$$V_{S3} = e_{31} * I_{S1} \quad (17.3)$$

$$V_{S4} = e_{41} * I_{S1} \quad (17.4)$$

Considerando que I_{S1} se conoce (caída de rayo) según la Fig. 6, se determina la Tensión en la cima de la primera torre (o cable de guarda), usando las ecuaciones parciales de (12) con las ecuaciones (18) y (19).

$$V_{S1}(s) = \frac{I_S(s)}{Y(s)} \quad (18)$$

$$Y(s) = \frac{1}{Z_S} + \frac{1}{e_{11}} + \frac{Z_f c_T + d_T}{Z_f a_T + b_T} \quad (19)$$

En la ecuación (13), los elementos de la matriz a_{ij} , b_{ij} , c_{ij} , d_{ij} indica los parámetros de los coeficientes {ABCD} de la LT. Sustituimos V_{S1} en la Eq. (17.1) para obtener I_{S1} , y luego conseguimos las tensiones inducidos en el dominio de Laplace (s) de los conductores de fase en la posición de la torre, deducido en las ecuaciones (20.1), (20.2) y (20.3), que se indica.

$$V_{S2}(s) = \frac{e_{21}}{e_{11}} I_S(s) \quad (20.1)$$

$$V_{S3}(s) = \frac{e_{31}}{e_{11}} I_S(s) \quad (20.2)$$

$$V_{S4}(s) = \frac{e_{41}}{e_{11}} I_S(s) \quad (20.3)$$

Las ecuaciones de V e I están en el dominio de Laplace (s), para su conversión al dominio del tiempo se puede utilizar la Transformada de Fourier y su Transformada Inversa respectivamente. En esta aplicación utilizaremos como herramienta de cálculo el Software *Alternative Transitor Program (ATP)*, desarrollado en [8] con aplicaciones de análisis de Transitorios Electromagnéticos, el cual nos permite obtener salidas de cálculo numérico y salidas graficas.

B. Calculo de los parámetros de los componentes del sistema de puesta a tierra de la torre de transmisión

1. Impedancia del Cable de Guarda

La impedancia de onda para el cable de guarda de un conductor simple de una LT, es la relación entre la tensión y la onda de corriente que viaja a lo largo del conductor. La expresión matemática para el cálculo de la impedancia de onda, para un conductor "n" paralelo al suelo, de la ecuación (21); donde h_n es altura del cable de guarda al suelo, r_n es Radio eficaz del conductor y R_{cn} es Radio por efecto corona del conductor.

$$Z_{wn} = 60 * \sqrt{\ln\left(\frac{2h_n}{r_n}\right) * \ln\left(\frac{2h_n}{R_{cn}}\right)} \quad (21)$$

Para la LT 138 kV Huallanca-Tayabamba, se calculo según [1] y determino que $Z_{cg} = 400 \Omega$.

Impedancia de la Torre

En la Fig. 7 Se representa a una torre de transmisión de una LT 138 kV, tomando como referencia valores experimentos para la impedancia característica de la torre en [5] y [9], los valores están comprendidos entre 150 Ω a 220 Ω; su valor depende de la altura de la torre medida a partir del nivel del suelo, para los cálculos de la LT 138 kV se considera 180 Ω.

2. Impedancia de Puesta a Tierra o Pie de Torre

Los parámetros de la Puesta a Tierra (PT) con respuesta transitoria a corrientes de impulso, se ha calculado utilizando las ecuaciones desarrollados por [10], para el Modelo de la PT aproximado a LT de un electrodo horizontal simple enterrado en el suelo, se representa por la configuración analógica de la fig. 7; los parámetros están representados por la Resistencia (rΔx), la Inductancia (lΔx), la Conductancia (gΔx) y la Capacitancia (cΔx), en por unidad (p.u.) de longitud, distribuides en circuito PI y conectados en cascada entre elementos; estos parámetros se han calculado por [11], [12] y [13].

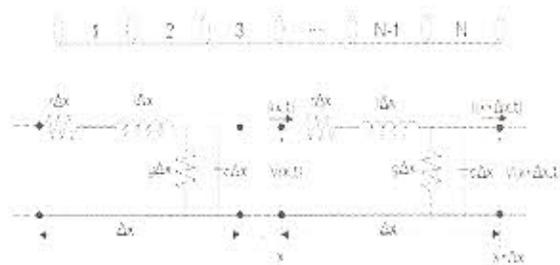


Fig. 7 Modelo de Puesta a Tierra aproximado a Línea de Transmisión, en circuito PI distribuido.

En aplicación a la LT 138 kV de [4], la PT con respuesta transitoria a corriente de impulso tipo rayo, se considera un electrodo conformado de conductor horizontal ramificado con material de cobre de 25 mm² de sección, enterrado a 0,60 m de profundidad, en suelo uniforme con resistividad promedio en zona de sierra de 2000 Ω-m, resistividad relativa eléctrica de 10. Los valores de las características eléctricas del suelo, corresponde a suelos de grava seca existentes en la región de la sierra del Perú, donde se extienden las principales Líneas Eléctricas y se produce descargas atmosféricas. En la Tabla 1 se presenta los parámetros de PT utilizados para el cálculo.

La impedancia de pie de torre en estado estacionario se toma menor a 25 Ω, según el Código Nacional de Electricidad-Suministros obtenido con adecuado dimensionamiento de la Puesta a Tierra; en otras aplicaciones la Puesta a Tierra será dimensionada según las características del suelo cuyos resultados son obtenidos mediante prospecciones de campo.

TABLA I.

PARÁMETROS DE PT CON CONTRAPESOS HORIZONTALES RAMIFICADOS EN SUELOS DE ALTA RESISTIVIDAD

Electrodo PT		Ramal - Longitud (m)	Características del Suelo		Impedancia (Ω) de PT	
N°	Tip o		Resistividad (Ω -m)	Permitividad Relativa	Resistencia Equivalente (Ω)	Imped. De Impulso-Zs (Ω)
1	B1	120	2000	10	19,26	137,75
2	B2	60			17,42	62,30
3	B3	40			16,31	38,97
4	B4	30			15,44	35,36

C.Análisis transitorio en torres de transmisión debido a corrientes de rayo utilizando el ATP

El *Alternative Transient Program (ATP)* de [8], es un programa digital utilizado para simular Transitorios Electromagnéticos, Electromecánicos y de Sistemas de Control en Sistema Eléctricos Polifásicos de Potencia. En la actualidad, el desarrollo y mejoramiento de este Programa esta a cargo de un equipo de la Universidad de Leuven-Bélgica. Los estudios que involucra el uso del ATP, comprende dos categorías:

1. Diseño

Incluye estudios de Coordinación del Aislamiento, Dimensionamiento de los Equipos, Especificación de los equipos de protección, Diseños de los Sistemas de Control, etc.

2. Operación

Comprende la solución a problemas de operación, tales como fallas en los sistemas y análisis de los Transitorios, que normalmente ocurre en la operación del sistema.

Dentro de esta categorías, el programa puede resolver casos típicos de: Transitorios de Maniobra, Impulsos Atmosféricos, Coordinación de Aislamiento, Análisis de Ferro resonancia, Análisis de Armónicos, Sistemas de Control, etc... Una de las ventajas del ATP es su flexibilidad para modelar sistemas, por lo que un usuario experimentado puede aplicar el programa a una gran variedad de estudios. El usuario define el sistema a ser simulado interconectando los componentes que constituyen el modelo del sistema.

En la simulación el ATP prevé las tensiones de barra, corrientes de ramas, energía, variables de maquina, variables de control, etc. Estos valores pueden ser graficados y/o impresos como función del tiempo y almacenados en archivos para usos posteriores, según Fig. 8.

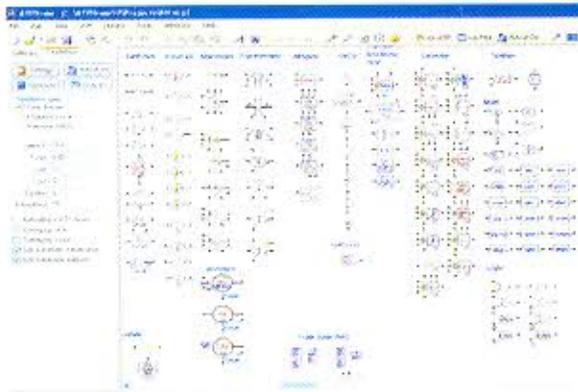


Fig. 8 Menú Principal del Programa ATP.

La clave para obtener una respuesta adecuada con el Programa ATP, es obtener el valor de los parámetros también adecuados de cada uno de los componentes del sistema de PT, usado la metodología adecuada.

En este trabajo se ha simulado los transitorios ocasionado por las corrientes de impulso de rayos, previamente se calculó los parámetros de los componentes del circuito equivalente, mediante software convencional y por [14]; estos elementos conformado por Z_{c2} del Cable de guarda, Z_t de la torre de transmisión Z_{pt} de PT de pic de torre, sus parámetros se han calculado usando el modelado de la PT aproximado a la LT desarrollado en [15]. Para el cálculo se efectuó la simulación mediante el ATP, desarrollando el circuito de la Fig. 9 para cada caso.



Fig. 9 Circuito equivalente de los componentes del Sistema de Puesta a Tierra usado por el ATP para el cálculo de Tensiones y Corrientes transitorias.

D. Cálculo de tensiones de impulso por caída de rayos en torres de transmisión usando el ATP

Mediante simulaciones se calculó la tensión en la cima de la torre de la LT, utilizando el ATP; para observar la respuesta de la tensión máxima ocasionada por la caída del rayo en la torre y el comportamiento del aislamiento de la línea eléctrica.

En esta aplicación se analizó el comportamiento transitorio ante caída de Rayos de LT Huallanca-Sihuas-Tayabamba desarrollado por [4]. Esta LT se extiende desde la Central Hidroeléctrica Huallanca (Cañón del Pato) y recorre territorios muy variados (plano, ondulado, escarpado) entre cotas de 1450 a 4294 msnm, ubicado en el Departamento de Ancash; zona con presencia frecuente de descargas atmosféricas.

Para el análisis se ha considerado los parámetros de los componentes instalados de un Cable de Guarda con cable de acero de 50 mm diámetro y torres de acero según la configuración de la Fig.5; el valor de la impedancia de onda de la torre para 138 kV se considera de 40 mH para los cuatros primeros casos a ser analizados y para el ultimo caso la impedancia de la torre se considera 180 Ω .

La resistividad del suelo se ha determinado mediante pruebas de campo a lo largo de la ruta de la LT del proyecto [14], se ha obtenido valores comprendidos entre 400 Ω -m a 2400 Ω -m; para los análisis de respuesta transitoria del aterramiento se considera la resistividad del suelo uniforme de 2000 Ω -m en promedio.

La mejora de la performance del aislamiento de la LT por caída de rayos, puede lograrse usando armados de PT con ramificaciones; se analizó para los armados de PT típicos B1 (1 ramal), B2 (2 ramales), B3 (3 ramales) y B4 (4 ramales), lográndose idénticas respuestas con sobre tensiones mayores al nivel de aislamiento. Para tomar en cuenta el modelado de los elementos determinantes de las sobre tensiones, se ha seleccionado el armado de PT tipo B4 (4 ramales) con resistencia en estado estacionario menor a 20 Ω , sin considerar el efecto de la ionización del suelo que corresponde a los casos mas desfavorable. Este análisis presenta el reporte para los casos siguientes:

Caso 1: La PT ha usado un electrodo de contrapeso horizontal simple de cuatro ramales de 30 m de longitud (tipo B4-4x30), enterrado a 0.60 m en suelo de 2000 Ω -m y permitividad eléctrica de 10; para la simulación se inyecta una onda de corriente doble exponencial de 20 kA frente rápido de 2/50 μ s tipo Rayo, en la cima de la torre la inductancia de la torre de 40 mH. Los resultados del calculo se han graficado

y se muestra en la fig. 10, donde la tensión máxima en la cima de la torre (V_C) es 2191 kV, tensión máxima en la cadena de aisladores (V_A) es 1835 kV y la tensión máxima en pie de torre (V_P) es 10.585 kV.

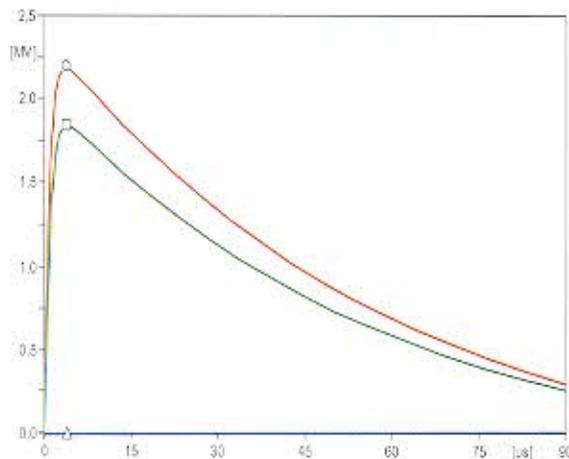


Fig. 10 Tensión máxima en cima de torre, cadena de aisladores y Puesta a Tierra para contrapeso 30 m, armado de PT tipo B4-4x30 en suelo uniforme de 2000 Ω -m, impedancia de torre 40 m Ω .

Caso 2: En este caso la PTe es el mismo con un electrodo de contrapeso horizontal simple de cuatro ramales de 30 m de longitud por ramal (tipo B4-4x30), enterrado a 0,60 m en suelo similar al caso 1 e inyectó una corriente también similar al caso 1 en la cima de la torre, la impedancia de la torre de 180 Ω . Los resultados del cálculo se han graficado y se muestra en la Fig. 11 y Fig. 12, donde la tensión máxima en la cima de la torre (V_C) es 1340 kV, tensión máxima en la cadena de aisladores (V_A) es 1129 kV y la tensión máxima en pie de torre (V_P) es 30.24 kV.

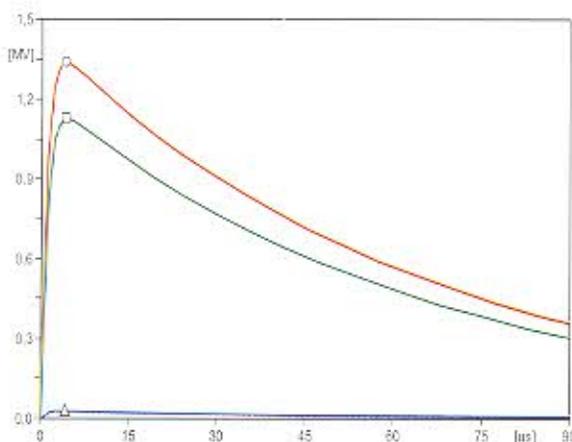


Fig. 11 Tensión máxima en cima de torre, cadena de aisladores y Puesta a Tierra para contrapeso 30 m tipo B4 en suelo uniforme de 2000 Ω -m, impedancia de la torre (Z_t) 180 Ω .

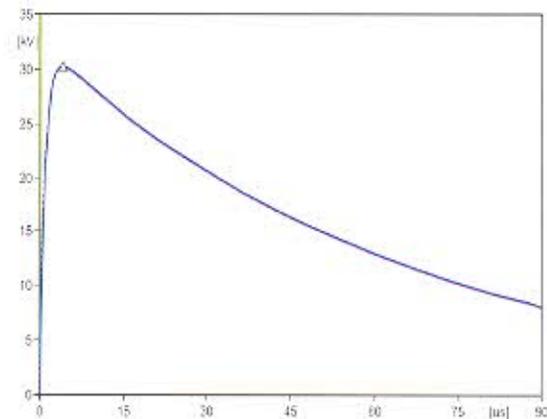


Fig. 12 Tensión máxima en pie de torre (acometida) hacia la Puesta a Tierratipo B4 -4x30 para contrapeso con ramal de 30 m en suelo uniforme de 2000 Ω -m e impedancia de torre (Z_t) de 180 Ω .

Las Tensiones en la cima de la torre y en la cadena de aisladores para los casos 1 y 2, comparado con las Tensiones Críticas de descarga inversa de la Std IEEE 1243, muestra que para el caso 1 se ha superado el nivel de aislamiento y la probabilidad de descarga inversa es evidente. En esta configuración la corriente de rayo máximo para evitar descarga inversa es de aproximadamente 15 kA, mayor a este valor se producirá descarga inversa y ocasionara falla en la LT.

Para el caso2, se observa que las Tensiones en la cima de la torre y en la cadena de aisladores es menor a la Tensión crítica de descarga y por lo tanto no se presentara descarga inversa (*back flashover*); esto indica que el diseño del aterramiento con PT tipo B4 cumple la con protección del aislamiento; y será mejor aún, si se calcula considera la PT con el efecto beneficioso de la ionización del suelo. Según los cálculos para los casos 1 y 2, modelando la torre como L (40 mH) y la Z (180 Ω), los resultados obtenidos son diferentes; esto demuestra que el modelado de los elementos de aterramiento juega un papel importante para obtener una adecuada solución. En este caso para la torre como L, el pulso es más elevado; sin embargo, la disipación es muy corta con tiempo menor a la 5 μ s. Las respuestas del cálculo de Fig. 11 y Fig. 10 coordinando con las curvas V vs Tiempo de la Std IEEE 1243, para tiempos de 2 μ s y 6 μ s, nos predice un buen comportamiento del aislamiento de la LT a las descargas de Rayo, con una Resistencia en CC de PT menor a 20 Ω .

El valor máximo de la Tensión calculado en el aislador de la fase inferior es el más bajo y en la fase superior es el más alto. Esto ocurre porque las tensiones inducidas en el conductor localizado más lejos del cable de guarda, son inferiores, debido a que

los efectos mutuos son más débiles; mientras que las Tensión en la torre en la posición del conductor superior es aproximadamente igual a la Tensión en la cima de la torre.

IV. CONCLUSIONES

1) La respuesta transitoria del sistema de puesta a tierra ante la descarga de rayos, tiene la función de proteger el aislamiento de las líneas eléctricas, para los casos de la LT analizada, muestran una buena performance para los niveles de PT establecidos (menor a 20 Ω), corroborado en el caso 2; sin embargo, si se tiene PT mayores, se puede presentar descargas inversas y ocasionar fallas en la línea. Para estos casos puntuales, se puede proponer utilizar dispersores o Pararrayos.

2) Para este análisis, en el modelado se considera a la torre como una inductancia (40 mH), los resultados de la simulación, nos da valores de sobretensión en la cima de la torre mayor al valor critico de descarga inversa establecido en [2], ésta puede mejorar si se considera el efecto de la ionización del suelo.

3) En el presente trabajo, previo a las simulaciones del calculo de la Tensión, se ha estudiado el comportamiento de la Puesta a Tierra en altas frecuencias, considerando que las ondas de corriente de Rayo, tienen componentes mayores a 30 kHz; posteriormente se ha calculado los parámetros de la Puesta a Tierra usando las ecuaciones de (10) y (15) efectuado los cálculos con aplicación del ATP, las respuestas transitorias obtenidas nos da mayor aproximación en el calculo.

4) En el estudio del diseño de la LT de [4], el diseñador, no ha considerado el análisis transitorio de la puesta a tierra a las descargas de Rayo para altas frecuencias, por lo que se recomienda para futuros estudios, desarrollar el análisis transitorio para una mejora de la coordinación de aislamiento; el cual optimiza el dimensionamiento del cable de guarda, configuración de la estructura y dimensionamiento de la Puesta a Tierra.

REFERENCIAS

- [1] EPRI, "Transmission Line Reference Book 345 kV and above", 2da Edición, Project UHV Technical Resource Operation Large Transformer Division, General Electric Co. Published 1982 by Electric Power research Institute-EPRI, California-USA.
- [2] International Standard IEEE 1243, "Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Line", 2000.
- [3] International Standard IEC 71-2, "Insulation coordination Part 2: Application guide", 1996.
- [4] Ministerio de Energía y Minas, "Estudio de Ingeniería constructiva, Línea de Transmisión Huallanca-Sihuas-Tayabamba", 2008, Perú.
- [5] IEEE Working Group on lightning performance of transmission lines "A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines", IEEE Trans PAS 104, 1985, pp.919-927.
- [6] J.R. Marti, "Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations", IEEE Trans PAS 101 (1982), pp.147-155.
- [7] A.S. Al-Fuhaid, M.M. Saied, "A method for the computation of faults Transients in Transmission Lines" IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 3, N.º 1, pp. 288-297, January 1998. [8] H.V. Dommel, "Transient analysis program reference manual", 2nd edn., Microtran Power System Analysis Corporation, Van-couver, Canadá, 1992.
- [9] M. Ishii, ET. all., "Multistory transmission tower model for lightning surge analysis", IEEE Trans. On Power Del., vol. 6, no. 3, pp. 1327-1335, July 1991.
- [10] E.D. Sunde, "Earth conduction effects in transmission systems", 2nd ed., New York, Dover Publications, 1968.
- [11] M.I. Lorentzou, N.D.Hatziargyriou, "Effective Dimensioning of Extended Grounding Systems for Lightning Protection", Proc. of the 25th ICLP Conference, 18-22 Sept.2000, Rhodes, Greece.
- [12] L.Greev, "Improved Earthing System Design Practices for Reduction of Transient Voltages", CIGRE WorkGroup, 1998.
- [13] L.Greev, V.AmavovsId, "Frequency Dependent and Transient Impedance of Grounding Systems: Comparison between Simulation and Measurement" Lightning & Mountains, Chamonix, France, 1997
- [14] MathWorks, "MATLAB User's Guide", Natick, MA, USA, 1998.
- [15] E. Echeverría, "Modelado y Análisis de Respuesta Transitoria de Puestas a Tierra No extensas", Tesis para optar el Grado de M. Sc. en Sistemas de Potencia-UNI-Perú, 2012.
- [16] CIGRE WG 33.01, "Guide to procedures for estimating the lightning performance of transmission lines", CIGRE Technical Brochure 63, 1991.