

Análisis del efecto de la impedancia dinámica de pie de torre a las descargas inversas por ondas de rayo en una línea eléctrica de 500kv del S.E.I.N.- Perú

Analysis of the effect of the dynamic impedance of the foot of a tower in the inverse wave discharges lightning on a 500kv power line SEIN Peru.

Erasmó Echeverría Peche¹

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

Resumen— Este artículo analiza la incidencia de la impedancia de puesta a tierra a las respuestas transitorias ocasionado por las corrientes de impulso de rayo, los impulsos de sobretensiones producidos pueden generar descargas inversas o Back Flashover a través de la cadena de aisladores de una de las Línea de Transmisión (LT) del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN) del Perú. Utilizando el software "Alternative Transient Program-ATP" ha sido posible simular el comportamiento de la línea de transmisión de 500kV de Mantaro-Caraveli al impacto de un rayo.

Para el análisis se ha considerado ondas de corriente de rayo de registros históricos de otros países, por falta de registros en el país. Los cálculos se han efectuado con variaciones de la impedancia de puesta a tierra en respuesta dinámica a la corriente de rayo, para valores en estado estacionario entre 5 a 100 ohm. Los resultados muestran que mediante este método, pueden limitarse las sobre tensiones producidas por las corriente de rayo, y evitar superar la tensión crítica de aislamiento, que causa la descarga inversa (BFO) en la cadena de aisladores de las fases. Este método permita la mejora del aislamiento de la línea de transmisión evitando quedar fuera de servicio repentinamente. De este modo es garantizada la continuidad, la confiabilidad y la calidad del suministro de energía a los grandes consumidores del Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (S.E.I.N) del Perú.

Abstract— This article analyzes the impact of the grounding impedance to transient responses caused by lightning impulse currents, overvoltage

pulses produced can generate reverse discharges or Back Flashover through the insulator string of one line transmission (LT) of the National Electrical Interconnected System (SEIN) of Peru. Using the Alternative Transient Program-ATP software has been possible to simulate the behavior of the transmission line of 500kV Mantaro-Caraveli the lightning strike.

The analysis has been considered lightning current wave of historical records from other countries, due to lack of records in the country. The calculations have been taken with variations of impedance grounding in dynamic lightning current to steady-state response values between 5-100 ohm. The results show that using this method can be limited overvoltages produced by lightning current and avoid exceeding the critical voltage insulation, causing reverse flush (BFO) in the insulator string phase. This method allows improved insulation avoiding the transmission line out of service suddenly. Thus it is ensured continuity, reliability and quality of energy supply to large consumers of the National Electrical Interconnected System (SEIN) of Peru.

Palabras claves— Impedancia o Resistencia dinámica de puesta a tierra de la torre, Descarga Inversa (backflashover), modelo de torre de acero, corriente de choque de rayo, sobre tensión de impulso.

Keywords— Dynamic resistance or impedance grounding of the tower, back flashover, model steel tower, lightning impulse current, over-voltage pulse

¹ Erasmó Echeverría Peche. Email: echeverriap@unmsm.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

Perú es un país andino y amazónico, atravesado en forma longitudinal por la cordillera de los andes y clima tropical extendido longitudinalmente en el oriente; presentándose muchos días de tormenta y actividades de descarga de rayo durante el año. Actualmente, el Sistema de Transmisión del SEIN está reforzándose con la implementación de Líneas de Transmisión (LT) en 500 kV, concesionadas a empresas privadas con circuitos al norte y sur del Perú, la zona Sur se muestra en la Fig.1 presentado en [1], donde se desarrolla el proyecto materia de estudio. El fenómeno climático produce caída ondas de rayo en las líneas eléctricas, que ocasiona sobre tensiones de impulso, el cual es uno de los factores determinantes para el adecuado diseño del aislamiento del sistema de potencia y protección de equipos en las líneas de transmisión y subestaciones.

Cuando se produce descargas de ondas de rayo en la cima de una torre de transmisión, una corriente de rayo fluye por la torre hacia el pie de torre y causa una súbita tensión, el cual puede ocasionar una descarga inversa (*backflashover*) a través de la cadena de aisladores. Sin embargo, la estimación de la sobre tensión que puede ocurrir por la caída de ondas de corriente de rayo, puede alcanzar o superar la tensión de sostenimiento de la LT, aún no determinado por ser una línea nueva. Por lo tanto, este tema es de gran interés del presente trabajo.

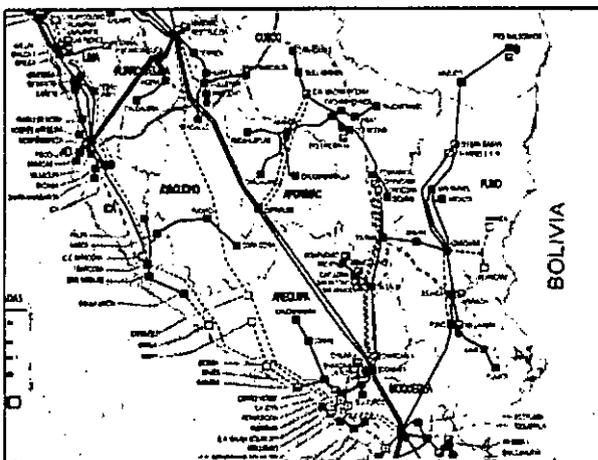


Fig. 1 Sistema Eléctrico Interconectado Nacional (SEIN)-Zona Sur del Perú, la LT 500kV Mantaro-Caraveli-Montavo (línea entre cortada).

El rayo con frecuencia es responsable de la salida de las líneas de transmisión, el cual reduce la confiabilidad de la red eléctrica. Cuando ocurre un choque de rayo en la línea, este termina en el cable de guarda o golpeará la cima de una torre, esta corriente fluye en la torre y va hacia la Puesta a Tierra (PT). La PT no es perfecta (de valor cero), los cables de blindaje y la misma estructura tiene una impedancia de onda; cuando ocurre un choque de rayo, por su alta energía genera una onda de sobre tensión en los aisladores causándoles descargas [2].

La onda de tensión de impulso aparece en los conductores de fase, ocasionando sobre tensión en la cruceta y en la cadena de aisladores, en muchos casos lo suficientemente alto-que puede ocasionar descarga a través de la cadena de aisladores; si esta tensión transitoria de rayo excede el nivel de sostenimiento del aislamiento, ocurre una descarga inversa (*Back Flashover*). Las tensiones de descarga inversa son generadas por múltiples reflexiones en la torre golpeada y también a lo largo del cable de blindaje y las torres adyacentes.

La tensión de descarga inversa depende del factor de acoplamiento, que es función de la distancia relativa de los conductores a tierra y conductores a los cables de guarda o blindaje, la impedancia de la torre y la impedancia de puesta a tierra [2].

II. METODOLOGÍA

A. Descripción y Modelado de la Línea de Transmisión de 500 Kv

La descarga inversa está asociado a la respuesta transitoria al impulso de los parámetros eléctricos e impedancia de los componentes de la Línea de Transmisión (LT) y su Puesta a Tierra, como son: Línea de Transmisión (propriadamente), Cables de Guarda, Torre de Transmisión y Puesta a Tierra de pie de torre. El análisis de la Descarga Inversa (*Backflashover-BFO*) está relacionado también a otros factores importantes, como la magnitud de la corriente de impulso de rayo, tiempo de frente y cola, así como la distancia de interrupción.

En este trabajo se analiza la incidencia principal de la Descarga Inversa (BFO) por efecto de variación de la impedancia de puesta a tierra; sin embargo, para el estudio se ha efectuado también el modelado y análisis de los otros componentes del sistema de puesta a tierra (rayo, cable de guarda, torre, cadena de aisladores).

Los cálculos y simulaciones se efectuaron utilizando el software *Alternative Transient Program (ATP)*.

1). *Configuración de las Estructuras de la Línea de Transmisión de 500 kV*

En el estudio se ha tomado las torres prototipo S1 y/o S2 (5°)-suspensión, seleccionado en el Estudio de Factibilidad y EIA [3]. Las dimensiones de la torre son ilustrados en la Fig. 2. El detalle de los componentes principales de la Línea de Transmisión de 500 kV se describe a continuación.

Conductor de Fase:

- 4 conductores por circuito o fase
- 4 x 1200 MCM – AAAC

Cable de Guarda estándar:

- 1x50 mm² Acero EHS

Cable de Guarda tipo OPGW:

- x36 fibras tipo mono modo

Estructuras:

- Torres metálicas de A° G° de celosía tipo S1, S2.

Aisladores:

- 37 aisladores U120BS en suspensión
- 38 aisladores U120BS en anclaje

Altitud: Tramo analizado

- Entre 3000 y 4000 m.s.n.m.

Cimentación:

- Tipo parilla y stubs de hormigón

Puesta a Tierra:

Contrapeso de cable de acero descarburado, para 10 Ohm o menos.

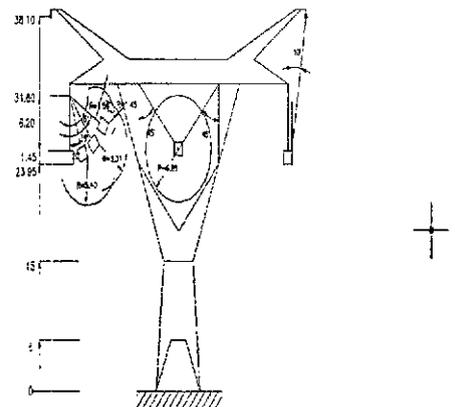


Fig. 2 Estructura de acero tipo Suspensión para LT 500 kV.

2) *Modelo de la Torre de Transmisión*

La configuración de las torres típicas de transmisión para 500 kV, es de simple circuito con dos cables de guarda aéreos, como se muestra en la Fig. 2. La impedancia de onda de la torre se ha modelado como una línea de transmisión, para el cálculo de la impedancia de onda de las secciones de la torre se aplicó el modelo de torre de múltiples pisos [4]; en esta aproximación, cada parte de la torre se representa por el modelo de parámetros distribuidos, sin pérdidas de alta frecuencia, donde la onda de rayo se propaga aproximadamente a la velocidad de la luz hacia el pie de torre y la puesta a tierra. El modelo de la torre se muestra en la Fig. 3.

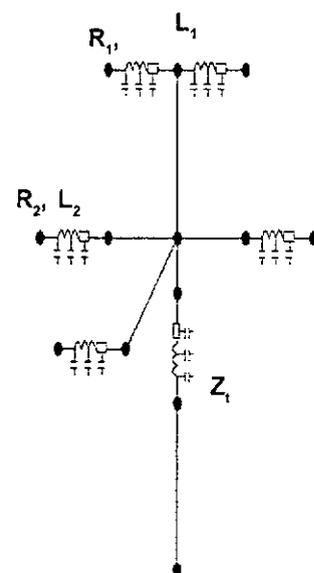


Fig. 3 Modelo de parámetros de la torre-múltiple sección

3) Modelo de la Onda de Corriente de Rayo

La magnitud de la corriente de impulso de rayo es una función probabilística, los niveles de descarga de baja corriente de rayo recurrentes está entre 5 kA a 25 kA, pueden causar una tendencia más alta para el choque de rayo directo y golpear a un conductor de fase de la LT, mientras que para mayores magnitudes de corriente de impulso de rayo, ésta tiende a golpear la cima de la torre o el cable de blindaje, el cual puede ocasionar una descarga inversa (*back flashover*) a través de la cadena de aisladores [5] y [6].

Las estadísticas de ocurrencia de rayos en la región de Perú son nulas, para este estudio se ha tomado valores de otras fuentes, efectuados por investigadores experimentados en el tema, se usó también como referencia las curvas de tormentas o nivel ceráuneo, se observó que las mayores tormentas se presentan entre Diciembre a Marzo. En este trabajo los valores de las corrientes de rayo se han tomado de los investigadores en [7], [8] y [9]. De estas referencias se ha determinado que las descargas de rayo son positivas aproximadamente entre el 5% al 10%, con magnitud entre 12 kA y 140kA. Pero, las descargas de rayo son negativas aproximadamente entre el 90% al 95 %, con magnitudes entre -10 kA y - 140 kA; los valores de mayor probabilidad de ocurrencia de descargas de rayo está entre -10 kA y - 80 kA. De acuerdo a la referencia de corriente pico media del primer choque negativo puede variar de 12 kA a 80 kA, mientras que para sucesivos choques estos valores pueden variar de 5 kA a 50 kA.

Las amplitudes de las ondas de corriente de rayo, el tiempo de frente de impulso y tiempo de cola de la onda, previsto en este estudio están dados en la Tabla I.

TABLA I

AMPLITUD Y FORMAS DE ONDAS DE CORRIENTE DE RAYO

Casos	Corriente de Rayo (kA)	Formas de Ondas t_f/t_r	Standard
1	- 30	1.2/50 mS 1.5/40 mS	IEC
2	- 50		
3	- 80		ANSI
4	- 100		
5	- 140		

4) Modelo de la Impedancia de Puesta a Tierra

La Resistencia de Puesta a Tierra (PT) en pie de torre en respuesta a ondas de corriente de rayo, no es bien entendida; ésta es la impedancia de impulso de PT en alta frecuencia, mayor a la resistencia en estado estacionario medido a baja frecuencia (R en DC). El modelo de la PT con respuesta transitoria a corrientes de impulso tipo rayo, se puede aproximar a una Línea de Transmisión (LT), el comportamiento dinámico se representa por un circuito eléctrico de elementos distribuidos tipo PI, conectados en cascada, como en la Fig. 4, en trabajos elaborados por [10] y [11].

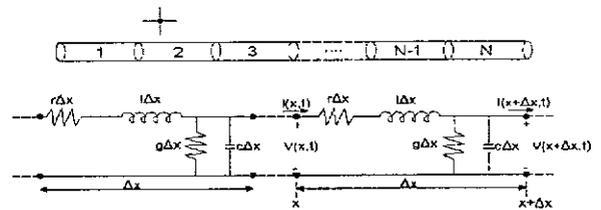


Fig. 4 Circuito Transitorio de la Puesta a Tierra

Este modelo de la PT aproximado a una LT, constituye un modelo eficaz para el análisis transitorio de la respuesta dinámica de la PT ante una onda de corriente de impulso tipo rayo de alta disipación de energía electromagnética, el cual puede predecir su respuesta mediante simulaciones, con el uso del software especializado como el ATP; para aplicaciones en ingeniería de proyectos o mejoras de puestas a tierra existentes.

Cuando incide corrientes de rayo de frente rápido a una LT, estas altas corrientes circulan hacia tierra, ocasionando gradientes de potencial suficientes para la ruptura del suelo (ionización) alrededor del electrodo de PT. En este trabajo, para efectos de simplificación se ha usado una aproximación con valores de resistencia de PT en D.C. y considerando el efecto de la Ionización; este se ha modelado, teniendo en cuenta que la resistencia varía en función de la corriente y este a su vez varía con el tiempo, se puede calcular como en (1), previsto en modelado del ATP, según [10] y [12].

$$R_f = \frac{R_g}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (1)$$

Donde:

Rg : Resistencia de pie de torre a baja corriente y baja frecuencia, Rcc.

Rf : Resistencia de PT de la torre (Ohm).

I : Corriente de onda en el suelo (kA).

Ig : Limite de corriente para inicio de la ionización del suelo (kA).

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{E_0 \rho_0}{R_g^2} \right) \quad (2)$$

r0 : Resistividad del suelo en pre ionización (Ohm-m).

E0 : Gradiente o Intensidadde campo Electrico para inicio de ionización del suelo (aproximadamente 300 kV/m).

En cálculos más rigurosos de PT, debe utilizar la metodología y procedimientos desarrollados en [10] y [11].

5) Modelado del aislamiento de Líneas Eléctricas

La característica de aislamiento de la cadena de aisladores, es conocida como la característica de tensión vs tiempo o curva "V - t"; la capacidad de la tensión de sostenimiento para una cadena de aisladores, se puede calcular por una expresión simplificada dado por la ecuación (3), según [13].

$$V_f = K_1 + \frac{K_2}{t^{0.5}} \quad (3)$$

Dónde:

Vf : Tensión de descarga (kV)

K1 : es igual a 400*L

K2 : es igual a 710*L

L : Longitud del aislador o cadena de aisladores

t : tiempo transcurrido después del choque o descarga de rayo (µs)

En la Fig. 5, se ha graficado la Curva de la Tensión Critica Disruptiva V(t), donde V(t) está dado en kV y el tiempo en µs, cada curva corresponde a la distancia del aislamiento (longitud del aislador); en este estudio para la LT 500 kV en el tramo ubicado a 3000 msnm se ha determinado que la longitud de la cadena de aisladores (L) es de 6,20 m, cuando la tensión a través de la cadena de aisladores excede su capacidad de sostenimiento la tensión de impulso, ocurre la descarga inversa (*back flashover*).

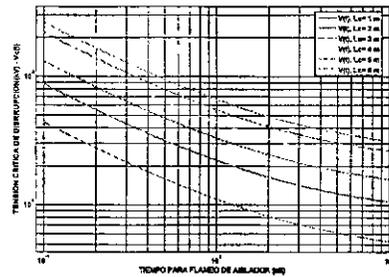


Fig. 5 Curva de Tensión de Sostenimiento de Aislamiento (V-t) de la cadena de aisladores.

La cadena de aisladores puede soportar una alta magnitud de tensión de impulso que tiene una corta duración, esta misma puede fallar al soportar una tensión de impulso de magnitud inferior con la duración más larga.

III. RESULTADOS

A. Procedimiento de la Simulación del Cálculo

La respuesta dinámica de la LT 500 kV a las corrientes de rayo se analizó como paso previo, para determinar la distribución de la corriente de impulso de rayo en las torres de transmisión y puesta a tierra, considerando configuraciones de las torres con dos Cables de Guarda, circuito trifásico con disposición horizontal de 4 conductores/fase; posteriormente se analizó la distribución de la corriente de impulso a lo largo de la LT para un tramo conformado por 5 torres, según se muestra en la Fig. 6. Cuando el rayo cae en la estructura intermedia, la onda se propaga en los vanos adyacentes a lo largo de la línea y por las torres hacia la PT de pie de torre. En el modelado se ha usado el Programa de cálculo Alternative Transient Program (ATP).

La resistencia de PT en pie de la torre, es uno de los factores que más influye en el valor de la sobre tensión y cuando ésta supera la tensión de aislamiento, ocurre la Tensión de Descarga Inversa (*Back Flashover-BFO*) a través de la cadena de aisladores de la LT produciendo falla a tierra y su salida de servicio.

Este trabajo considera varios factores que afectan la descarga inversa, tales como: la impedancia de PT, para el análisis se aproximó a su valor en estado estacionario o en DC (incluye el efecto de ionización comprendido en el modelado del ATP), impedancia de la torre, impedancia de cables de guarda. Así mismo, se analizó la respuesta dinámica de la LT, considerando la magnitud de las ondas de corriente de rayo y el tiempo de frente-cola.

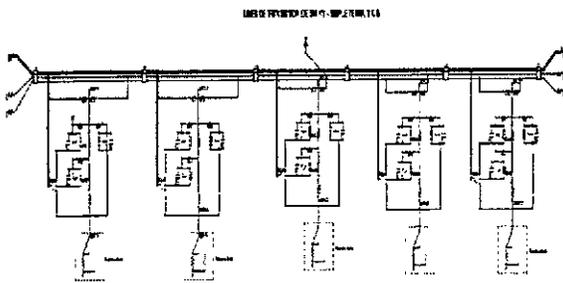


Fig. 6 Modelo Dinámico de una Línea de Transmisión con torres metálicas, dos cables de guarda y Puesta a Tierra; ante caída ondas de corriente de Rayo.

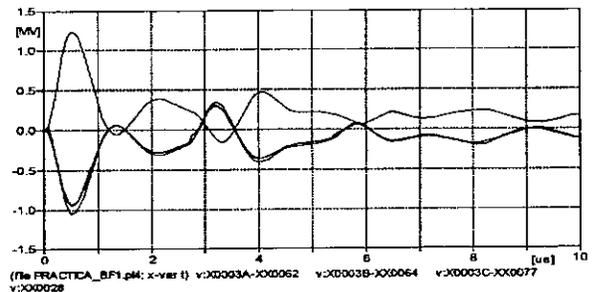
1) Tiempo de Frente de corriente de Choque de Rayo.

Una descarga de rayo generalmente consiste en varios choques debido a cargas inferiores de las nubes, que son negativos o positivos que caen de la nube a la tierra. El primer choque con mayor frecuencia es más severo que los choques subsecuentes [6]. Como se muestra en la Fig. 5, la capacidad de la tensión de sostenimiento al impulso de la cadena del aislador depende del tiempo de frente de choque de rayo.

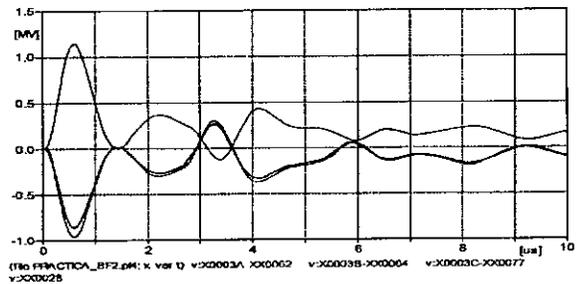
En la simulación se analizó para la magnitud más recurrente de la corriente de rayo de -30 kA, se evaluó el efecto de frente de onda, para las ondas de frentes de onda y tiempo de cola de $1.2/50$ μ s (IEC) y $1.5/40$ μ s (ANSI) utilizado por los estándares,

en pruebas del asilamiento en Laboratorio; para simular la tensión inducida de rayo a través de las cadenas de aisladores como en [14] y [15].

Los resultados de esta simulación se ha graficado en la Fig. 7, se observa diferencias de la magnitud de impulso a través de las cadenas de aisladores para cada fase y formas de onda ligeramente diferentes; a pesar que son de la misma magnitud de la corriente de choque de rayo y la misma resistencia de PT.



a) Onda de Corriente $1.2/50$ μ s (IEC), V-XX0028- Sobre Tensión en la cima de la Torre; V-3 A, V-3 B, V-3 C, Tensiones en fases, Resistencia de PT 5ohm.



b) Onda de Corriente $1.5/40$ μ s (ANSI), V-XX0028- Sobre Tensión en la cima de la Torre; V-3 A, V-3 B, V-3C, Tensiones en fases, Resistencia de PT de 5ohm.

Fig 7 Formas de Onda de la Tensión de impulso en cadena de aisladores de fases y cima de torre, por caída directa de corriente de rayo de -30 kA.

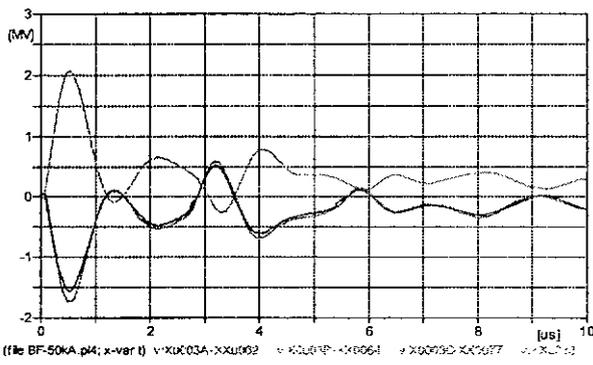
2) Magnitud de Corriente de Choque de Rayo

Estadísticamente la corriente de choque de rayo se ha determinado que aproximadamente el 95% es negativo, con magnitudes entre -10 kA a -140 kA y la magnitud de la corriente de choque de rayo más frecuente está en el rango de magnitud de -10 kA a -50 kA; se analizó para los casos más recurrentes de -30 kA en la sección 3.1, los resultados se muestran

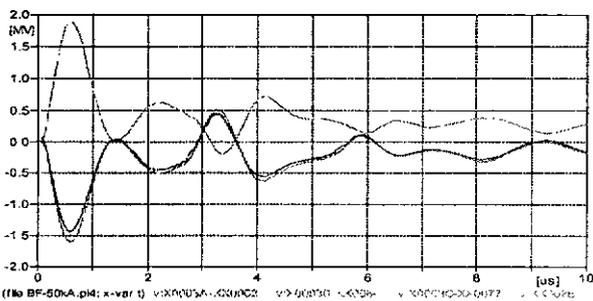
en la Fig. 7, se observa que para la LT 500 kV no se presenta Descarga Inversa (BFO), RPT de 5 ohm hasta 20 ohm.

El análisis del comportamiento dinámico de la LT 500 kV por caída de la corriente de rayo, se ha simulado para corrientes de rayo incidentes en la cima de la torre de magnitudes de - 50kA, 65 kA, -80 kA, -100kA y -140 kA, para ondas de frentes de onda y tiempo de cola de 1.2/50 μ s (IEC) y 1.5/40 μ s (ANSI) tratado en [9]. Los resultados de la simulación se ha graficado en la Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 y Fig. 11; se observa que la amplitud de la tensión inducida por el rayo a través de las cadenas de aisladores de fases y la tensión en la cima de la torre, se incrementa con el incremento de la corriente de rayo.

La falla del aislamiento se presenta con la Descarga Inversa (*Back Falshover-BFO*) de una fase a partir de - 65 kA y para magnitudes superiores de corrientes de Rayo se presenta BFO en dos fases y tres fases respectivamente con RPT de 5ohm y más.

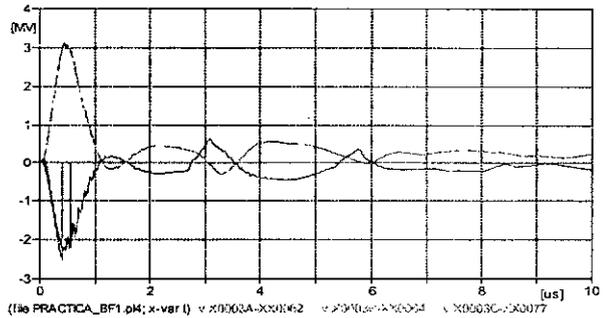


a) Onda de Corriente 1.2/50 μ s (IEC), V-XX0028 - Sobre Tensión en la cima de la Torre; V-3 A, V-3 B, V-3 C, Tensiones en fases, Resistencia de PT de 5ohm.

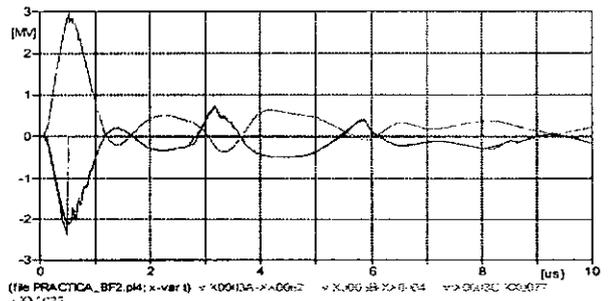


b) Onda de Corriente 1.5/40 μ s (ANSI), V-XX0028 - Sobre Tensión en la cima de la Torre; V-3 A, V-3 B, V-3C, Tensiones en fases, Resistencia de PT de 5ohm.

Fig 8 Formas de Onda de la Tensión de impulso en las cadenas de aisladores de fases y cima de torre, por caída directa de corriente de rayo de -50 kA.

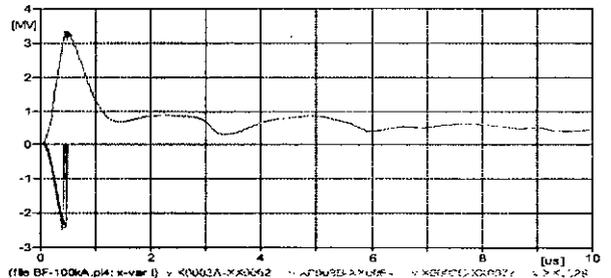


a) Onda de Corriente 1.2/50 μ s (IEC), V-XX0028- Sobre Tensión en la cima de la Torre; V-3 A, V-3 B, V-3 C, Tensiones en fases, Resistencia de PT de 5ohm.

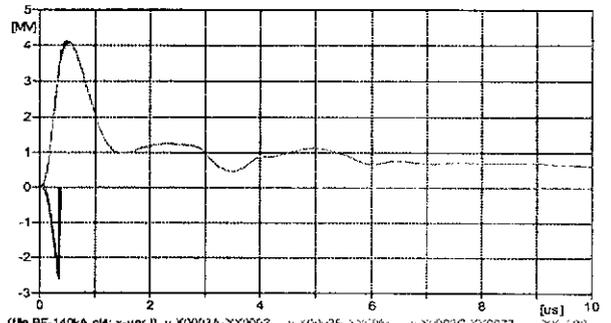


b) Onda de Corriente 1.5/40 μ s (ANSI), V-XX0028- Sobre Tensión en la cima de la Torre; V-3 A, V-3 B, V-3C, Tensiones en fases, Resistencia de PT de 5ohm.

Fig. 9 Formas de Onda de la Tensión de impulso en las cadenas de aisladores de fases y cima de torre, por caída directa de corriente de rayo de - 80 kA.

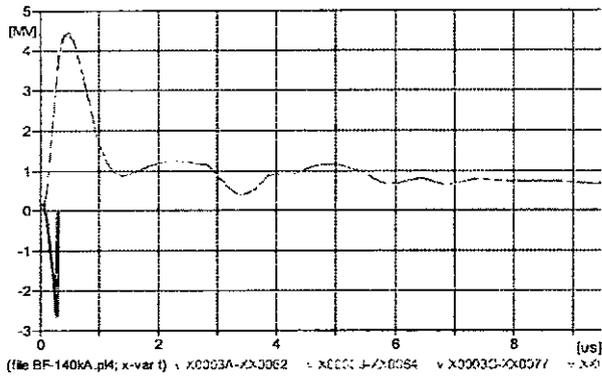


a) Onda de Corriente 1.2/50 μ s (IEC), V-XX0028- Sobre Tensión en la cima de la Torre; V-3 A, V-3 B, V-3 C, Tensiones en fases, Resistencia de PT de 5ohm.

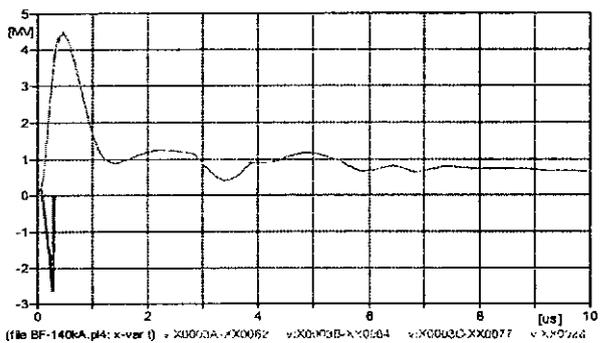


b) Onda de Corriente 1.5/40 μ s (ANSI), V-XX0028- Sobre Tensión en la cima de la Torre; V-3 A, V-3 B, V-3C, Tensiones en fases, Resistencia de PT de 5ohm.

Fig. 10 Formas de Onda de la Tensión de impulso en las cadenas de aisladores de fases y cima de torre, por caída directa de corriente de rayo de -100 kA.



a) Onda de Corriente 1.2/50µs (IEC), V-XX0028- Sobre Tensión en la cima de la Torre; V-3 A, V-3 B, V-3 C, Tensiones en fases, Resistencia de PT de 5ohm.



b) Onda de Corriente 1.5/40 µs (ANSI), V-XX0028- Sobre Tensión en la cima de la Torre; V-3 A, V-3 B, V-3C, Tensiones en fases, Resistencia de PT de 5ohm.

Fig. 11 Formas de Onda de la Tensión de impulso en las cadenas de aisladores de fases y cima de torre, por caída directa de corriente de rayo de -140 kA.

3. Variación de la Impedancia de Puesta a Tierra

La incidencia de la impedancia de PT en el efecto de la Descarga Inversa (Back Flashover-BFO), se analizó para variación de la Resistencia de PT desde 1 a 100 µs para ondas de frentes de onda y tiempo de cola de 1.2/50 µs (IEC) y 1.5/40 µs (ANSI). Se determinó mediante simulaciones con el ATP, la ocurrencia o no de la descarga inversa a través de la cadena de aisladores, en las fases de la LT ocasionado por las corrientes de choque de rayo.

Se determinó que no ocurre descarga inversa para corriente de choque de rayo hasta -50 kA para resistencias de PT hasta 40ohm para valores mayores de la corriente de rayo si ocurre descarga inversa (*Back Flashover*). En los casos de -100 kA, ocurre Descarga Inversa sobre la cadena de aisladores de las tres fases para los dos tipos de corriente analizadas; así como, para para -140kA, ocurre descarga inversa en todos los casos.

En las simulaciones se observó que la tensión de sostenimiento de la LT 500kV es aproximadamente 2150 kV, el cual puede lograr Corrientes de Rayo de frente de onda rápidas, de magnitudes hasta -62 kA y resistencia hasta 10ohm; para mayores sobre tensiones ocurrirá Descarga Inversa o para igual magnitud de corrientes, de frente de onda más lento.

IV. CONCLUSIONES

En este estudio se analizó las sobre tensiones ocasionado por corrientes de Rayo en la LT 500 kV Mantaro-Caraveli, para el tramo comprendido entre 3000 msnm y 4000 msnm, determinando la incidencia de los componentes de la LT en las Sobre Tensiones Inversas que ocurre en la cadena de aisladores. Los parámetros de los componentes se han modelado para la torre de transmisión, Línea de Transmisión, cable de guarda, Puesta a Tierra, Corriente de Rayo en magnitud y tiempos de frente y cola de onda; estos parámetros de la LT se ha modelado y adaptado, para el cálculo mediante simulaciones con el soporte del Programa ATP.

Uno de los objetivos del análisis es determinar mediante simulaciones la influencia de la impedancia de la PT en la respuesta dinámica y su influencia sobre la descarga inversa (*back flashover*) en las cadenas de aisladores de las fases de la LT. Estas simulaciones se efectuó para los tiempos más cortos del frente de onda de corriente de choque de rayo (según Std IEC y ANSI), para los casos de magnitudes de corriente de rayo entre -10 kA y -40kA (-30 kA valor predeterminado), en este rango no ocurrió descarga inversa. En los casos de corrientes de rayo hasta -62 kA tampoco ocurrió descarga inversa; sin embargo, para corrientes superiores se producirán descargas parciales (1, 2 o 3 fases), hasta -80 kA. Para corrientes de rayo negativas superiores, se presentará descarga inversa para cualquier valor de la resistencia de puesta a tierra. En la determinación del aislamiento de la LT se requiere efectuar la coordinación del aislamiento.

REFERENCIAS

- [1] Plan de Transmisión 2013 a 2022, COES-MEM 2012.
- [2] C. Jaipradidham, "Electromagnetic Field Analysis on Surge Response of 500 kV EHV Single Circuit Transmission Tower in Lightning Protection System using Neural Networks", Proc. of Int. Conf. on Control, Automation and System, KINTEX, Gyeonggi-Do, Korea, 2-5 June 2005.
- [3] Estudio de Impacto Ambiental de la Línea de Transmisión 500 kV Mantaro-Caraveli-Montalvo, CESEL S.A, 2012.
- [4] Ossama E. Gouda, A.Z. El Dein, G.M. Armer "Parameters Affecting the Back-Flashover across the Overhead Transmission Line Insulator caused by Lightning", Cairo University, Egypt, Dec 19-21, 2010.
- [5] L.V. Bewly, "Traveling Waves on Transmission Systems", Dover Publications, New York, N.Y., USA, 1951.
- [6] S. Visacro, "Direct Strokes to Transmission Lines: Considerations on the Mechanisms of Overvoltage Formation and their Influence on the Lightning Performance of Lines", Journal of Lightning Research, Volumen I, 2007, pag. 60-68.
- [7] R. B. Anderson, A.J. Erickson, "Lightning Parameters for Engineering Application", Electra 69, USA 1980.
- [8] V.M.A Rakov, Uman and K.J. Rambo "A Review of ten years of triggered-lightning experiments in Camp Blanding, Florida", Journal of Atmospheric Research, Vol. 76, pp 503-517, 2005.
- [9] F. Heidler, Z. Flisowski, "Parameters of Lightning Current Given in IEC 62305-Background, experience and Outlook", 29th International Conference on Lightning Protection, University of the Federal Armed Forces, 2008.
- [10] E.D. Sunde, "Earth conduction effects in transmission systems", 2nd ed., New York, Dover Publications, 1968.
- [11] 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.
- [12] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distributions Lines, IEEE Std 1410, 2004.
- [13] IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines, IEEE Std 1243, 2000.
- [14] M. Ishii, T. Kawamura, T. Kouno, E. Ohsaki, K. Shiokawa, K. Murotani and T. Higuchi, "Multistory Transmission Tower Model for Lightning Surge Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, July 1991, pp. 1327 – 1335.
- [15] ATP-Alternative Transients Program, Book, Universidad Nacional La Plata.
- [16] 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.
- [17] A. R. Hileman, Insulation Coordination for Power Systems, Marcel Dekker, New York, USA, 1989.
- [18] P. Yadee and S. Premrudeepreechacharn, "Analysis of Tower Footing Resistance Effected Back Flashover Across Insulator in a Transmission System", Proc. of Int. Conf. on Power Systems Transients (IPST'07), Lyon, France, June 4-7, 2007.