

"MODELOS DEPENDIENTES DE LA FRECUENCIA PARA ANÁLISIS DE ENERGIZACIÓN Y DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE 500 KV"

Vasconcellos Paredes José, Vera Merchancano Ricardo y Layana Chancay José
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación
Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)
Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 Vía Perimetral, Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador
jvasconc@fiec.espol.edu.ec, rdvera@fiec.espol.edu.ec y jose.layana@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta una explicación de los modelos de líneas de transmisión con parámetros distribuidos constantes (Modelo de Bergeron) y dependientes de la frecuencia (Modelo de J. Martí).

Se realiza un estudio de transitorios en líneas de transmisión a nivel de 500 KV debido a maniobras de energización y descargas atmosféricas. La línea de transmisión en estudio es Las Lojas – Taday, la cual se encuentra contemplada en el Plan de Expansión de Transmisión para el periodo 2009 – 2020.

El análisis de transitorios debido a maniobras de energización y descargas atmosféricas a través de la línea de transmisión Las Lojas – Taday utiliza el programa computacional Alternative Transient Program (ATP), además se realiza una comparación entre los modelos de líneas de transmisión Bergeron y J. Martí.

La comparación de los dos modelos de líneas de transmisión (Bergeron y J. Martí) se realiza considerando el tiempo de respuesta computacional y los valores picos que muestra como respuesta al disturbio.

Palabras Claves: *Transitorios, modelos de líneas de transmisión, energización, descargas atmosféricas, ATP.*

Abstract

This paper presents an explanation of transmission line models with distributed parameters constant (Bergeron's Model) and frequency-dependent (J. Marti's Model).

Is performed a transients's study in transmission lines at 500 KV due to energization maneuvers and lightning. The transmission line under consideration is Las Lojas - Taday, which is referred to in Transmission Expansion Plan for the period 2009 to 2020.

The transient analysis due to energization maneuvers and lightning through the transmission line's Las Lojas - Taday computer program uses the Alternative Transient Program (ATP), plus a comparison is made between models of transmission line, Bergeron and J. Martí.

Comparing the two models of transmission lines (Bergeron and J. Marti) is carried out considering the computational response time and showing the peak values in response to disturbance.

Keywords: *Transients, models of transmission lines, Energization, lightning, ATP.*

1. Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia en la mayor parte del tiempo operan en régimen permanente; sin embargo se los debe diseñar para soportar condiciones desfavorables a los que pueden estar sometidos durante un periodo de tiempo, estas condiciones pueden ser causadas debido a sobrevoltajes de origen externo provocadas por descargas atmosféricas o de origen interno debido a maniobras de energización. Se entiende por sobrevoltaje a un voltaje superior al valor máximo nominal de operación del sistema eléctrico.

La implementación de cada modelo cumple con la función de interpretar los parámetros dependientes de la frecuencia por medio de estimaciones y finalmente con un circuito equivalente obteniendo una serie de graficas como resultado del análisis y así saber si la línea puede o no soportar un disturbio.

2. Los transitorios y su origen

Los transitorios son manifestaciones de leyes físicas, independientes del control humano y se originan debido a cambios repentinos en la configuración de un circuito energizado, los cuales generalmente ocasionan sobrevoltajes transitorios de magnitudes impredecibles que a pesar de lo breve de su duración, pueden ser peligrosas por las amplitudes que se producen y que pueden originar la ruptura o el deterioro del aislamiento.

Los sobrevoltajes transitorios son toda alteración de voltaje en función del tiempo entre un conductor de fase y tierra o entre 2 conductores de fase, su magnitud es elevada y de naturaleza transitoria cuyo valor de cresta sobrepasa el valor de la tensión máxima de servicio (V_n) o la tensión máxima para el aislamiento (V_m) en un sistema eléctrico.

2.1 Sobrevoltajes producidos por una descarga atmosférica

Se producen luego del impacto de un rayo en una línea de transmisión, dichos sobrevoltajes tienen una forma de onda con frente de elevado gradiente y característica unipolar, que se desplazan a lo largo de los conductores en ambos sentidos a partir del punto de origen, y después de alcanzar su valor máximo desciende progresivamente con una pendiente suave.

2.2 Sobrevoltajes de maniobra

Se originan por una operación de interrupción o por la falla que ocurre en el sistema durante una operación de un recierre del interruptor, la interrupción de una falla y la conexión o desconexión de circuitos capacitivos o inductivos.

Los sobrevoltajes producidos por estas conexiones y desconexiones son sustancialmente de mayor duración que las producidas por descargas atmosféricas, sus valores de cresta pueden alcanzar hasta cuatro veces la tensión nominal dependiendo del nivel de tensión del sistema, y desde el punto de vista del sostenimiento del aislamiento, son más peligrosos por su mayor duración y forma de onda [6].

En sistemas eléctricos con voltajes de servicio menores a 300 KV, la probabilidad de una falla debida a un sobrevoltaje de maniobra es mínima ya que el aislamiento es suficiente para sostener dicho transitorio, por tanto el diseño del aislamiento externo se orienta a las sollicitaciones eléctricas provocadas por impactos de rayo.

Por encima de 300 KV, gracias a mejoras en la tecnología de puesta a tierra, diseño de torres y métodos de protección con el hilo de guarda, los niveles de sobrevoltaje de maniobra son los que determinan las distancias de los aislamientos; las cuales se incrementan en forma proporcional con la tensión del sistema, en tanto que las debidas a rayos permanecen constantes.

La tabla 1 muestra los valores típicos de sobretensiones de maniobra tomados del libro de referencia para líneas de transmisión [7].

Tabla 1. Valores típicos de sobretensiones de maniobra.

Causas de la sobretensión de maniobra	Máxima sobretensión por unidad (pu)
Energización de línea de 200 millas (322 km)	3.5
Iniciación de falla en fase	2.1
Interrupción de falla	1.7 - 1.9
Energización de línea y transformador	1.2 - 1.8
Primer re cierre en banco de capacitores	3

3. Modelos analizados

Los fenómenos transitorios ocasionados por descargas atmosféricas o por maniobras, son analizados a través de los diferentes modelos de líneas de transmisión. Se detallan los modelos de Bergeron y J. Martí.

3.1. Modelo de Bergeron[8].

Este método se basa en la propagación de las ondas en una línea de transmisión sin pérdidas y con parámetros L (Inductancia) y C (Capacitancia) constantes distribuidos a través de la línea de transmisión. La figura 1 representa el modelo de Bergeron para una línea de transmisión, donde las ecuaciones que relacionan los voltajes y corrientes en los extremos de la línea están representadas por las ecuaciones:

$$i_{km}(t) = \frac{1}{Z_c} v_k(t) + i_k(t - \tau) \quad (1)$$

$$i_{mk}(t) = \frac{1}{Z_c} v_m(t) + i_k(t - \tau) \quad (2)$$

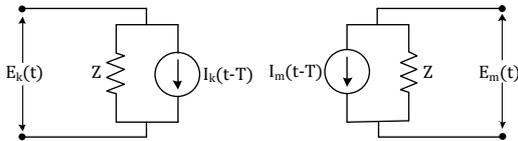


Figura 1. Circuito representativo del modelo de Bergeron.

3.2. Modelo de J. Martí [9].

La metodología usada por J. Martí evita problemas numéricos de estabilidad, y es útil para un amplio rango de frecuencias, de 0 Hz a 106 Hz. Debido a la naturaleza distribuida de las pérdidas y a la dependencia en frecuencia de los parámetros, es más conveniente desarrollar las ecuaciones de línea en el dominio de la frecuencia, como se ilustra en las siguientes ecuaciones:

$$V_k(\omega) = Z_c(\omega)I_k(\omega) + E_{mh}(\omega) \quad (3)$$

$$V_m(\omega) = Z_c(\omega)I_m(\omega) + E_{kh}(\omega) \quad (4)$$

El circuito equivalente de las ecuaciones (3) y (4) en el dominio de la frecuencia, se ilustra en la figura 2.

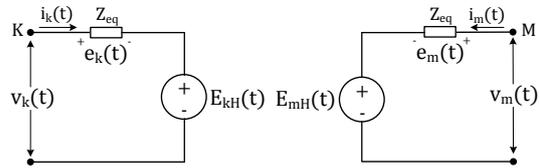


Figura 2. Circuito representativo del modelo J. Martí.

4. Análisis transitorio

De los estudios preliminares realizados por CELEC EP – Transelectric las líneas de transmisión de 500 KV tendrán cuatro conductores por fase para ayudar a disminuir el efecto corona, la separación entre conductores es de 45.7 cm. El sistema en sí, estará conformado por cuatro líneas de transmisión a nivel de 500 KV con un banco de reactores en cada extremo, las cuales se resumen en la tabla 2 [4]:

Tabla 2. Líneas de transmisión de 500 KV.

Línea de transmisión	Longitud (km)
El Inga – Las Lojas	300
El Inga – Coca Codo	125
Las Lojas - Taday	180
Molino – Taday	12

El conductor de fase a utilizar en todas las líneas de transmisión de 500 KV es el 750 ACAR, distribuida en un haz de cuatro conductores, además se contará con dos hilos de guarda uno de acero galvanizado de 7 hilos y 3/8” de diámetro global y otro de fibra óptica llamado OPGW, el cual contiene hilos de fibra óptica en su interior y recubiertos por cable de acero galvanizado. Para la línea de 500 KV se usa la torre de simple circuito de la figura 3.

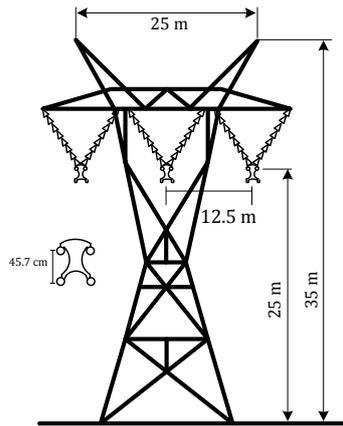


Figura 3. Esquema de la torre de transmisión de simple circuito de 500 KV.

Se presentan tres tipos de análisis transitorio, el primero es ocasionado por la energización de la línea de transmisión Las Lojas - Taday, el segundo debido a una descarga atmosférica en la mitad de la línea en vacío, y finalmente se presenta el circuito simulado de una torre en la cuál cae una descarga atmosférica en el hilo de guarda para analizar el efecto de las resistencias de pie de torre. A continuación se muestran los diferentes casos y escenarios:

4.1. Energización de la línea de transmisión Taday – Las Lojas

La energización primero se la realiza desde Taday y luego desde Las Lojas bajo los siguientes casos y usando los siguientes modelos de líneas de transmisión.

- Modelo Bergeron y Modelo de J. Martí respectivamente.
 - Caso 1: Energización utilizando pararrayos y reactores.
 - Caso 2: Energización con pararrayos y sin reactores.
 - Caso 3: Energización con reactores y sin pararrayos.
 - Caso 4: Energización sin reactores y sin pararrayos.

4.2. Descargas atmosféricas

- Descarga atmosférica en la mitad de la línea de transmisión Las Lojas – Taday, con un

extremo en vacío usando los modelos J. Martí y Bergeron.

- Descarga atmosférica en el hilo de guarda de una línea de 500 KV
 - Con un extremo abierto y con resistencia de pie de torre de 10 Ω y 400 Ω.

Para realizar el análisis de sobrevoltaje debido a la energización de la línea de transmisión Taday – Las Lojas bajo la utilización de interruptores estadísticos se debe efectuar una cantidad apreciable de simulaciones, para el proyecto que se presenta se ha simulado un total de 100 maniobras de energización, cabe recalcar que en el ATP es posible considerar varios interruptores estadísticos independientes o con tiempos dependientes entre un interruptor maestro y los restantes como esclavos.

Cuando se energiza una línea de transmisión con el extremo en vacío se produce una propagación de ondas viajeras a lo largo de toda la línea, donde la onda reflejada es igual a la onda de voltaje incidente. A continuación se muestran las tablas de sobrevoltajes obtenidos para cada caso y escenario, el voltaje base esta dado por:

$$V_{pico} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} [V_{L-L}]$$

$$V_{pico} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} 500 \text{ KV} = 408.56 \text{ KV}$$

5. Energización en vacío de la línea de transmisión Taday – Las Lojas desde Taday

5.1. Modelo de Bergeron.

Tabla 3. Valores picos obtenidos con el modelo Bergeron.

		VOLTAJE [pu]		
		FASE A	FASE B	FASE C
CASO 1	BERGERON	1.52	1.48	1.49
CASO 2		1.55	1.47	1.49
CASO 3		2.11	2.49	2.04
CASO 4		2.43	2.8	2.27

En la tabla 3 se presentan los valores de sobrevoltajes obtenidos para la energización de la línea de transmisión Taday – Las Lojas, desde Taday con el modelo Bergeron para los diferentes casos.

Cabe mencionar que el modelo Bergeron está basado en la propagación de las ondas en una línea de transmisión sin pérdidas y con los parámetros L y C constantes distribuidos a través de la línea de transmisión [8].

Para sobrevoltajes ocasionados por la energización de una línea la frecuencia de los transitorios es alta, es decir la longitud de la onda es menor comparada con la longitud de la línea de transmisión produciéndose un retardo de tiempo en la onda.

Cuando se energiza en vacío la línea de transmisión Taday – Las Lojas desde Taday, se originan valores de sobrevoltajes para los diferentes casos analizados tal como se muestra en la tabla 3, se observa que los valores más críticos de sobrevoltajes son para los casos 3 (energización sin pararrayos) y 4 (energización sin pararrayos y sin reactores), para los dos casos los sobrevoltajes tienen un valor por encima del 2 pu.

5.2. Modelo de J. Martí.

Tabla 4. Valores picos obtenidos con el modelo J. Martí.

	MODELO	VOLTAJE [pu]		
		FASE A	FASE B	FASE C
CASO 1	J. MARTÍ	1.5	1.49	1.47
CASO 2		1.53	1.49	1.5
CASO 3		1.97	2.19	1.83
CASO 4		2.26	2.47	2.13

Al analizar la energización en vacío de la línea de transmisión Taday – Las Lojas para los diferentes casos por el modelo J. Martí se aprecia que el nivel de sobrevoltaje varía para los diferentes casos.

Con la inclusión de los pararrayos y los reactores en la línea de transmisión al momento de la energización los picos de sobrevoltajes llegan a 1,5 pu en promedio, el pararrayo ayuda a mantener valores de sobrevoltajes manejables para el nivel de voltaje de la línea de transmisión, tal como se observa en la tabla 4.

6. Energización de la línea de transmisión Taday – Las Lojas desde Las Lojas

6.1. Modelo Bergeron.

Tabla 5. Valores picos obtenidos con el modelo Bergeron.

	MODELO	VOLTAJE [pu]		
		FASE A	FASE B	FASE C
CASO 1	BERGERON	1.52	1.48	1.49
CASO 2		1.55	1.47	1.49
CASO 3		2.12	2.5	2.04
CASO 4		2.43	2.84	2.28

En la tabla 5 se presentan los valores de sobrevoltajes obtenidos para la energización de la línea de transmisión Taday – Las Lojas, desde Las Lojas con el modelo de Bergeron para los diferentes casos.

En la energización de la línea de transmisión Taday – Las Lojas, desde Las Lojas por el modelo Bergeron, los picos de sobrevoltajes para los diferentes casos son considerables, sin embargo se puede apreciar en la tabla 5 que para el caso 3 (sin pararrayos) y caso 4 (sin pararrayos y sin reactores) el nivel de sobrevoltaje llega a un valor de 2.6 pu en promedio, mientras que para el caso 1 (energización utilizando pararrayos y reactores) y el caso 2 (sin reactores) el nivel de sobrevoltaje alcanza valores de 1.5 pu que son valores de sobrevoltajes manejables para el nivel de voltaje de la línea de transmisión en estudio (500 KV). Es decir que el pararrayos brinda una protección que ayuda a amortiguar el sobrevoltaje al momento de la energización.

6.2. Modelo J. Martí.

Tabla 6. Valores picos obtenidos con el modelo de J. Martí.

	MODELO	VOLTAJE [pu]		
		FASE A	FASE B	FASE C
CASO 1	J. MARTÍ	1.5	1.49	1.47
CASO 2		1.53	1.49	1.5
CASO 3		1.97	2.2	1.84
CASO 4		2.26	2.48	2.11

En la tabla 6 se presentan los valores de sobrevoltajes obtenidos para la energización de la línea de transmisión Taday – Las Lojas, desde Las Lojas con el modelo J. Martí para los diferentes casos.

Para los casos de energización sin la presencia de pararrayos, se observa que los picos de sobrevoltajes llegan a valores promedios de 2.2 pu, tal como se muestra en la tabla 6, mientras que para los casos en los que se incluyen los pararrayos los valores de sobrevoltajes llegan a 1.5 pu, que es un valor de sobrevoltaje manejable para el nivel de voltaje de la línea de transmisión.

7. Descargas atmosféricas en la línea de transmisión Taday – Las Lojas.

7.1. Descarga en una de las fases de la línea.

La línea de transmisión Taday – Las Lojas fue simulada con una fuente perturbadora de 1.2/50 μ seg con un valor pico de 120 KA la cual cae en la mitad de la línea y en las tres fases independientemente para análisis.

Se obtuvieron los siguientes resultados al simular la línea con ambos modelos (Bergeron y Martí) con un extremo en vacío.

Tabla 7. Valores de sobrevoltajes obtenidos con el modelo J. Martí y el modelo Bergeron.

Fase disturbio	Fase Medida	Valor [pu]	
		Bergeron	Martí
A	A	1.96	1.99
	B	1.85	1.8
	C	1.84	1.85
B	A	1.8	1.85
	B	1.89	2.01
	C	1.82	1.89
C	A	1.79	1.81
	B	1.85	1.8
	C	1.94	1.96

En la tabla 7 se presentan los valores de sobrevoltajes producidos por la caída de una descarga atmosférica en la mitad de la línea de transmisión Taday – Las Lojas con un extremo en vacío.

Las descargas atmosféricas influyen mucho en la fase donde impacta y en ella produce la mayor sobretensión como se aprecia en la tabla 7.

8. Descarga atmosférica en el hilo de guarda de una línea de 500 KV.

Se estudia la caída de una descarga atmosférica en el hilo de guarda de una torre de transmisión cerca de un extremo abierto.

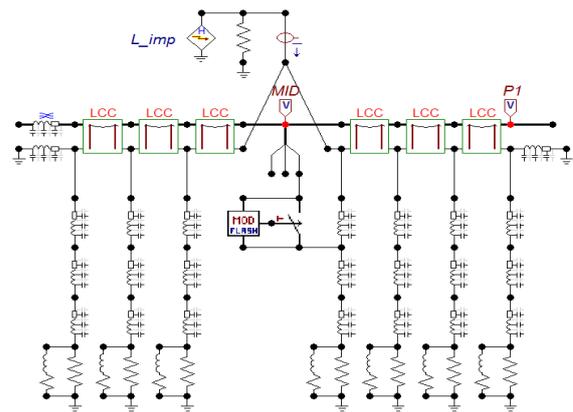


Figura 4. Circuito para la simulación de una torre con extremo abierto.

En la figura 4 se presenta el circuito de una línea de seis vanos cortos de 300 metros llegando a un extremo abierto, utilizado para simular el fenómeno transitorio de una descarga en el hilo de guarda con sus respectivas torres y cada torre con su resistencia de pie de torre la cual refleja la onda enviada a tierra.

Tabla 8. Valores picos obtenidos para diferentes resistencias de pie de torre.

Medición	Resistencia Pie de Torre		
	10 Ω	40 Ω	400 Ω
[KV]	2607.2	3379.1	3829.3
[pu]	6.39	8.28	9.38

En la tabla 8 se presentan los valores de sobrevoltajes producidos por la caída de una descarga atmosférica en el hilo de guarda de una torre con un extremo en vacío y un extremo abierto y con diferentes resistencias de pie de torre.

Cuando una descarga atmosférica impacta en una torre de transmisión, produce el mismo efecto que si cae en el hilo de guarda, debido a que ambos están interconectados, es decir tanto el hilo de guarda como la torre de transmisión están conectados a tierra.

El valor pico del sobrevoltaje que aparece sobre la torre está principalmente determinado por la resistencia de pie de torre aparente en el momento de la descarga, debido a que la reflexión de la base de la torre puede llegar mucho más rápido al tope de la torre que las reflexiones de las torres adyacentes. La influencia de la resistencia de pie de torre aparente sobre la tensión en el tope de la torre es determinada por su respuesta que depende de la corriente y el tiempo.

Cuando el disturbio ve el extremo abierto, la onda se refleja completamente, lo que produce un sobrevoltaje mayor, como se aprecia en la tabla 8. Debido al principio de superposición esta onda que viaja en sentido contrario por la reflexión se suma con la otra onda en sentido normal produciendo un alto pico de sobrevoltaje.

Cuando el extremo es continuo podemos apreciar que la medición es más baja, esto se debe principalmente a que se está realizando la medición en un punto donde pasa la onda y no es reflejada ni transmitida, sino continúa.

9. Conclusiones

Los sobrevoltajes producidos por maniobras de energización para una línea con un extremo en vacío no muestran mucha diferencia entre los modelos de J. Martí y Bergeron, la diferencia en la simulación radica en el tiempo de recuperación del voltaje base en el modelo de J. Martí ya que es un poco más rápido que el modelo de Bergeron, además los pararrayos y los reactores son de fundamental ayuda para evitar los picos muy altos de sobrevoltajes reduciéndolos a valores manejables para un nivel de 500 KV.

Las descargas atmosféricas que impactan en una fase de la línea de transmisión producen un pico muy alto en la fase perturbada de casi 2 pu teniendo en cuenta la ayuda de los pararrayos.

Las descargas atmosféricas que impactan en el hilo de guarda de una línea de transmisión

producen una superposición de ondas en las torres debido al valor de resistencia de pie de torre, ya que a mayor resistencia de pie de torre, mayor valor pico de sobrevoltaje tanto cerca como lejos de un extremo abierto de la línea de transmisión.

10. Referencias

- [1] CONELEC, Estadísticas del Sector Eléctrico Ecuatoriano Primer Semestre del Año 2009. Ecuador, Junio 2009.
- [2] CONELEC, Estadísticas del Sector Eléctrico Ecuatoriano Año 2008. Ecuador, Diciembre 2008.
- [3] CONELEC, Plan Maestro de Electrificación 2009 - 2020. Ecuador, Agosto 2009.
- [4] TRANSELECTRIC S.A., Plan de Expansión de Transmisión 2009 – 2020. Ecuador, Agosto 2009.
- [5] TRANSELECTRIC S.A., Sistema de Transmisión de 500 KV, Descripción de la Pre – factibilidad del Proyecto de 500 KV. Ecuador, Octubre 2008.
- [6] Diseño y modelo a escala de un generador de impulsos de tensión. Salvador Roca Poma 2005 Lima – Perú.
- [7] Electric Power Research Institute. Transmission Line Reference Book 345 KV and above 1979 Pag. 435.
- [8] L. H Restrepo, Modelos de Líneas de Transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia. Trabajo de Grado en Ingeniería Eléctrica, Universidad del Valle, Cali- Colombia, 2008.
- [9] J. R. Marti, “Accurate modeling of frequency dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations”, IEEE Trans. on Power App. and Systems. Vol. PAS-101 No. 1, pp. 147-155, Jan, 1982.
- [10] ATPDRAW version 5.6 for Windows 9x/NT/2000/XP/Vista Users' Manual, Noviembre 2009.