

# Metodología para la Determinación de Transitorios Electromagnéticos en la Excitación para Elementos de Líneas de Transmisión Eléctrica

Cesar Castillo Cáceres, Ms.<sup>1</sup>, Jorge Castro Valdivia, Ms.<sup>2</sup>, Deidamia Chani Ollachica, Ms.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú, ccastill@ucsm.edu.pe

<sup>2</sup>Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú, jlcastro@ucsm.edu.pe

<sup>3</sup>Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú, dchani@unsa.edu.pe

**Resumen** – *Los Sistemas Eléctricos de Potencia son sistemas altamente complejos a la hora de operar en estado permanente, y más aún si se analizan en determinados instantes de tiempo, por tanto el diseño, planificación, construcción y operación de un sistema eléctrico de alta potencia (más aún las líneas de Transmisión), juegan un papel importante, ya que deben suministrar electricidad de forma altamente confiable, segura y constante hacia el usuario final.*

*Por eso la electricidad es producida justamente en el instante que es consumida, es decir la demanda es simultánea con la producción de la cantidad necesaria de electricidad.*

*Esto hace que la operación de estos sistemas sea restringida a la satisfacción de la demanda en un intervalo de tiempo determinado, tratando siempre de mantener el voltaje y la frecuencia estables, para conservar a los equipos funcionando correctamente.*

*En los sistemas de potencia, específicamente en las líneas de transmisión se producen sobretensiones y sobrecorrientes al momento de su energización, causando daños en los equipos como transformadores, capacitores, reactores, y en las mismas líneas, por lo que es necesario estudiar estos componentes durante su energización, para definir una correcta operación y evitar en lo posible la presencia de estos eventos nocivos para los equipos.*

**Palabras clave** - *Fenómenos transitorios, modelamiento, sobretensión, sobrecorriente.*

## I. INTRODUCCIÓN

Los transitorios electromagnéticos deben ser tomados en cuenta para su estudio, con la misma importancia del análisis en estado estacionario. Pese a que el estado transitorio se produce en muy cortos períodos de tiempo, en comparación con el estado estable, su incidencia sobre los equipos es mucho mayor debido a los altos valores de voltaje y corriente a los cuales están sometidos, provocando grandes esfuerzos que en casos extremos pueden causar daños irreparables a los componentes del sistema eléctrico. Dependiendo el equipo involucrado puede afectar a plantas de generación, subestaciones, líneas de transmisión, e incluso dejar sin servicio eléctrico a toda una gran población.

Por estas razones es necesario tener una idea clara de los eventos que ocurren durante los períodos transitorios para poder hacer correctivos en el manejo de los sistemas de potencia tanto en estado estable como en el transitorio.

En la operación de un interruptor, la corriente y voltaje se desfasan debido al efecto capacitivo e inductivo de los diferentes elementos asociados al interruptor, que provocan

fenómenos transitorios llamados transitorios por maniobras a frecuencia industrial.

Por último la operación de apertura de un interruptor durante una falla con su posterior recierre. Si es una falla transitoria, también causará sobrevoltajes y sobrecorrientes en los elementos que están asociados al interruptor.

## PRINCIPIOS BÁSICOS PARA LA MODELACIÓN

La medición del comportamiento transitorio de elementos de transmisión es muchas veces complicada, costosa y ocasionalmente es riesgoso para el equipo. No obstante, se necesita conocer como los componentes reaccionan en operaciones de maniobras, en fallas y descargas atmosféricas, para preservar un sistema eléctrico confiable y seguro. También si los elementos fallan estando en servicio, se necesita tener una forma de mejorar los diseños y eliminar futuras fallas. La modelación, simulación y análisis es una solución para estos problemas.

Un modelo es una representación del circuito en forma de resistencias, inductancias y capacitancias, que responden muy bien a lo que se quiere representar en la modelación. El sistema de potencia abarca un gran número de componentes. Un modelo para dicho sistema puede ser construido con la unión de modelos de grandes elementos que se lo hace mediante barras o cables, método que ocasiona una variación entre escalas de tiempo de los transitorios en los diferentes elementos.

Es suficiente representar los componentes con las inductancias o reactancias en función de la frecuencia, algunas veces también se representa los elementos mediante la resistencia. Igualmente la capacitancia de los elementos tiene un papel importante en la respuesta transitoria. Esto hace que el modelo para estado transitorio sea más complicado y para determinar la respuesta transitoria se requiere que la modelación sea evaluada de una forma sencilla mediante análisis computacional que se analizará posteriormente.

El análisis también requiere el conocimiento pleno de los valores de resistencia, inductancia y capacitancia de los elementos involucrados en el estudio. La reactancia inductiva de algunos componentes están indicados en el dato de placa, o la puede proporcionar el fabricante del elemento, no sucede lo mismo con la capacitancia cuyos valores son complicados de obtener, porque no están dados por el fabricante y deben ser

medidos en el campo.

El grado de detalle del modelo depende del uso que se le dará, también dependerá de la ubicación del elemento en el sistema con respecto al punto donde se produce el evento transitorio. Si un interruptor está abriéndose o cerrándose, si una falla ocurre, el impacto será mayor en los componentes cercanos al interruptor o a la falla.

### RESPUESTA DE FRECUENCIA PARA REDES Y COMPONENTES

En el sistema eléctrico, un fenómeno transitorio se produce a diferentes frecuencias que varían entre los 0 Hz a 50 MHz aproximadamente. Los valores de frecuencia que están sobre la frecuencia industrial (60 Hz) involucran fenómenos electromagnéticos, si los valores están por debajo de esa frecuencia, involucran fenómenos electromecánicos. La figura muestra varios fenómenos transitorios comunes con sus respectivas frecuencias.

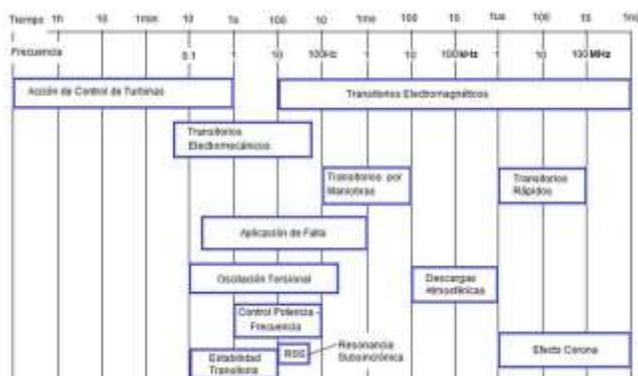


Fig. 1 Respuesta de frecuencia en sistemas de potencia

En consecuencia, la simulación de los elementos de la red debe necesariamente corresponder a una frecuencia del fenómeno transitorio particular. El espectro de frecuencias se puede dividir en cuatro partes.

- Frecuencia de 0 Hz a 100 Hz.- Cambios de carga y fenómenos transitorios debido a la saturación.
- Frecuencia de 100 Hz a 10 kHz.- Transitorios por maniobras.
- Frecuencia de 10 kHz a 1 MHz.- Transitorios por descargas atmosféricas.
- Frecuencia de 1 MHz a 50 MHz.- Transitorios rápidos.

Cuando se necesita que un fenómeno transitorio sea estudiado, se debe tomar en cuenta el rango de la frecuencia donde se encuentra el transitorio.

Un sistema eléctrico comprende una gran cantidad de inductancias y capacitancias con combinaciones complejas, con varias frecuencias naturales, son las que se determinarán el orden de la ecuación diferencial de corriente en cualquier rama o de voltaje en cualquier nodo.

### PARÁMETROS DEPENDIENTES DE LA FRECUENCIA

Cuando se construye un modelo con  $R$ ,  $L$  y  $C$ , que puede generar oscilaciones por operaciones de maniobra o cualquier otro evento, se tiene que trabajar con los parámetros dependientes de la frecuencia.

La principal razón para tomar en cuenta la dependencia de frecuencia, es la penetración de flujo magnético a un conductor. Si se consideran dos barras paralelas, la densidad de corriente es uniforme a través de la sección cuando circula una corriente directa, pero tiende a fluir en gran densidad alrededor del conductor (efecto piel) cuando la corriente es alterna. Si la frecuencia es mayor, la corriente fluye por la superficie del conductor y en el interior de este casi no existe flujo. En el caso de las barras, la resistencia aumenta y la inductancia disminuye. Se observan efectos similares en máquinas donde el flujo magnético concatena con núcleos, terminales, paredes del tanque, etc., induciendo corrientes de circulación en ellos.

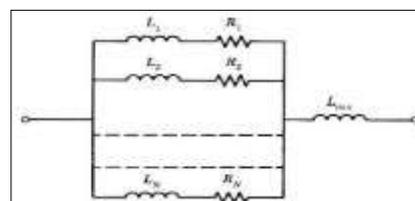


Fig. 2 Modelo de circuito con parámetro dependientes de la frecuencia

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### MODELACIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Para empezar con la modelación de las líneas de transmisión se debe tomar en cuenta los fenómenos que producen los transitorios electromagnéticos que pueden ser causados por descargas atmosféricas, maniobras de energización y desconexión, o fallas en las líneas.

Los estudios de transitorios en líneas muestran los efectos de las ondas viajeras. Cuando alcanzan un transformador de potencia, existe una distribución de esfuerzos, los cuales no son uniformes pudiendo provocar una rotura del sistema de aislamiento. El fenómeno transitorio también se produce en sistemas de comunicación cuando las señales se transmiten por las líneas de transmisión.

Como la línea de transmisión es una red con parámetros distribuidos, el análisis de los transitorios se realiza por medio de ecuaciones diferenciales con derivadas parciales.

Para representar a la línea se debe primero tomar en cuenta la aplicación para la cual va a servir el modelo, en este caso para el estudio de transitorios electromagnéticos. El modelo puede resultar a menudo complicado de obtener porque dependerá de varios parámetros que están en función de la frecuencia.

## CIRCUITO EQUIVALENTE CON PARÁMETROS DISTRIBUIDOS

La manera para mejorar la representación de la línea es dividirla en pequeñas secciones, con una fracción apropiada de la capacitancia e inductancia apropiada para cada una de las secciones, la precisión de cada red en escalera mejorará progresivamente mientras más secciones tengan.

Si los parámetros  $R$ ,  $G$ ,  $L$  y  $C$  están uniformemente distribuidos a través de toda la longitud de la línea, se puede representar la línea larga como una cadena de infinito número de secciones incrementales  $dx$  con los parámetros: resistencia  $Rdx$ , inductancia  $Ldx$ , conductancia  $Gdx$  y capacitancia  $Cdx$  conectadas en serie y paralelo como se muestra en la figura

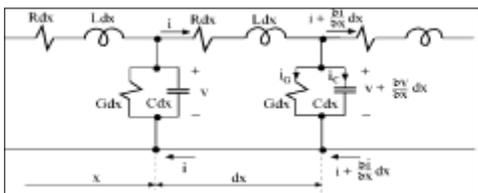


Fig. 3 Sección incremental de una línea de transmisión

Aquí se puede apreciar que el voltaje y la corriente de una línea de transmisión son función de dos variables  $x$  y  $t$ . Basándose en la figura anterior, se puede escribir dos ecuaciones para esta sección aplicando las dos leyes de Kirchhoff.

## METODOLOGÍA

Para realizar los estudios de transitorios electromagnéticos se efectúan simulaciones digitales con el programa ATP y su interfaz gráfica ATP Draw

En la figura siguiente se muestra una secuencia de pasos a seguir para el análisis de los fenómenos transitorios electromagnéticos con el software ATP

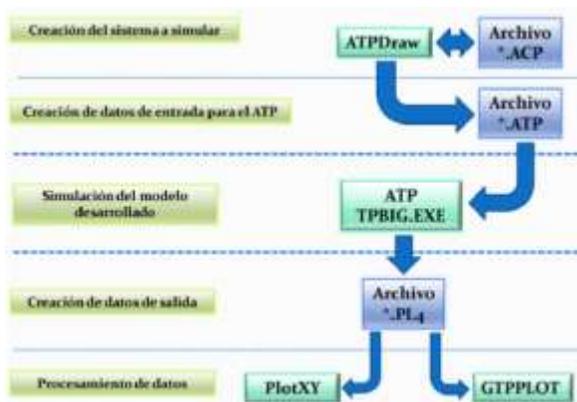


Fig. 4 Flujo de simulación de Transitorios Electromagnéticos

Las simulaciones efectuadas para las diferentes operaciones generadoras de fenómenos transitorios:

- Energización de líneas
- Recierre monopolar de líneas
- Energización de transformadores

También se realizan los siguientes análisis:

- Análisis de la tensión transitoria de recuperación
- Análisis de la extinción del arco secundario
- Respuesta en frecuencia de la red

Las maniobras estadísticas simuladas, permiten obtener los valores medios y la desviación estándar ( $\sigma$ ) con las cuales se calcula el valor estadístico que corresponde a las sobretensiones con el 98% de probabilidad de ocurrencia, que corresponden a las tensiones representativas, de acuerdo a las Normas IEC.

## PARÁMETROS ELÉCTRICOS DE LAS LÍNEAS MODELADAS

La subestación X es un nodo en el cual están conectadas eléctricamente las líneas del tramo 1 en 220 kV. y el tramo 2 en 138 kV. Los circuitos a modelar presentan los siguientes parámetros electromecánicos

TABLA I  
PARAMETROS ELECTROMECANICOS DE LAS LINEAS MODELADAS

Tramo	Tensión (kV)	Capacidad (MVA)	Longitud (km)	Conductor	Diam. Interno (mm)	Diam. Externo (mm)	Resist. Ohm/km 20° C DC
1	220	200	172.807	ALCAR Cutiew 523.7 mm <sup>2</sup>	10.54	31.71	0.0542
			28.618	ALCAR Priesant 644.5 mm <sup>2</sup>	11.70	35.08	0.0443
2	138	200	3.237	ALCAR Cutiew 523.7 mm <sup>2</sup>	10.54	31.71	0.0542

## III. RESULTADOS

Tomando en consideración el tiempo de cierre del interruptor que generó la mayor corriente de energización, a continuación mostramos simulaciones EMT de las formas de onda de las tensiones y máxima corriente que se producen por la maniobra de energización.

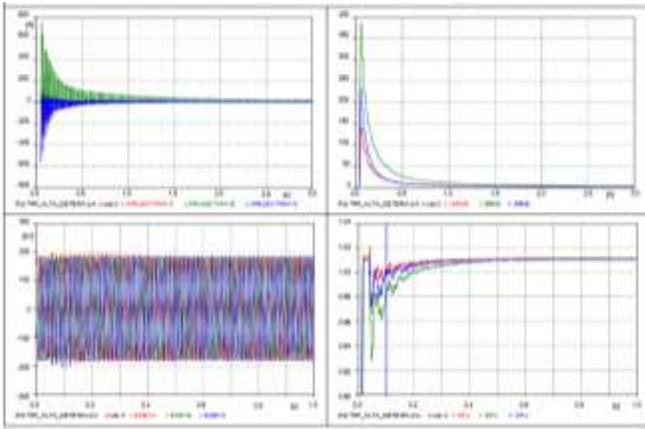


Fig. 5 Transitorios electromagnéticos para tensiones y corrientes a 220 kV.

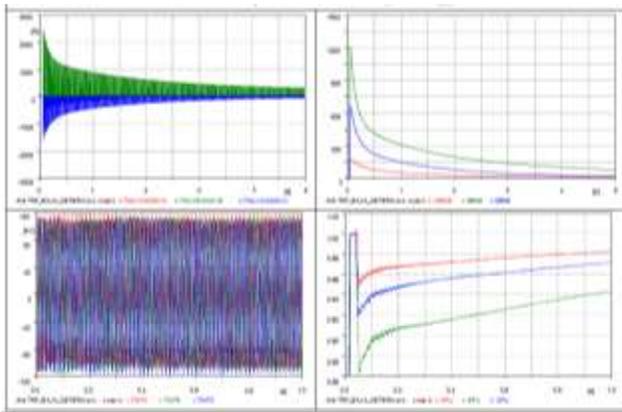


Fig. 6 Transitorios electromagnéticos para tensiones y corrientes a 138 kV.

#### IV. DISCUSION

Los resultados obtenidos de las simulaciones se expresan en p.u. Para las sobretensiones de maniobra se utiliza como base la tensión pico por fase-tierra y fase-fase las tensiones nominales (referidos a 220 kV. y 138 kV. según corresponda).

Los resultados de las maniobras de energización se muestran en las figuras 5 y 6, en la que se ha medido las tensiones fase – tierra, fase – fase y la energía disipada por los descargadores de sobretensión, respectivamente, para las subestaciones asociadas al tramo modelado.

En la energización de la línea en el tramo1 a 220 kV se obtuvo la mayor sobretensión representativa de fase - tierra de 2.032 p.u.; asimismo, en la energización de la línea en el tramo 2 se obtuvo la mayor sobretensión representativa de fase - tierra de 1.824 p.u. Debido a que en todos los casos de energización de líneas, la disipación de energía en descargadores de sobretensión no superó la capacidad nominal dada por el fabricante, se considera que el resultado

es admisible y no presenta ningún riesgo, porque está dentro del rango de protección.

#### CONCLUSIONES

Se simularon maniobras de energización de líneas y recierre monopolar, los niveles de sobretensiones están dentro de los valores esperados para este tipo de maniobra dado en las referencias y normas IEC 60071-2, para todas las maniobras, los pararrayos seleccionados ( $U_r=180$  kV y  $U_r=117$  kV) disipan una energía menor a la especificada en su ficha técnica.

La energía en los descargadores de sobretensión, en esta maniobra de energización de transformadores, no supera la capacidad de absorción de energía de los mismos. Las sobretensiones obtenidas no representan riesgo para los equipos, por lo que el transformador soportará dicha maniobra. Se comprueba que las simulaciones efectuadas con el software ATP son concordantes y validadas por el software ETAP Power.

#### RECOMENDACIONES

Para la energización de líneas de transmisión en los ramales del sistema, se debe hacer en lo posible con carga conectada al extremo lejano de la línea, esto hace que los sobrevoltajes disminuyan considerablemente, ya que con la impedancia de la carga, no va a haber reflexión de la onda, que es la causante de los sobrevoltajes.

Al momento de energizar un banco de capacitores se debe realizar previamente la energización de reactores cercanos al banco para poder contrarrestar los efectos transitorios del banco de capacitores, que pueden dañar a equipos cercanos a ellos.

Para el caso de simulación de transformadores en el programa ATP DRAW, si se quiere representar la saturación del núcleo junto con las corrientes de magnetización, se debe emplear el modelo de transformador de dos devanados, ya que el modelo de tres devanados no está incluida la opción de saturación del núcleo.

#### REFERENCIAS

- [1] D. Guillen “Transitorios Electromagnéticos”, Cantabria 2015.
- [2] R. Ccampos “Wavelets and electromagnetic Power System Transients”.
- [3] M. Lord, K. Kuong, and T. Singer, “Electromagnetic Transients”
- [4] J. Calderon “ Electromechanical Transients in Industrial Power System”.
- [5] M. Rusell and B. Hulman, “Transactions on Power Delivery”, IEEE 2006..
- [6] J. Piñeros “ATP Draw guia basica”.
- [7] J. Xuan, G. Lau, “Electromagnetic Power System”.
- [8] Transitorios Electromagneticos en Sistemas Electricos de Potencia, Comité Argentino de EMTP/ATP, 2015.
- [9] F. Gonzales, “Anormalidades en Sistemas Eléctricos de potencia”.