

Inf. tecnol. v.15 n.1 La Serena 2004

 Como citar
este artículo

Información Tecnológica - Vol. 15 N° 1 - 2004 : 67-73

ELECTROTÉCNICA

Modelo de Transformador de Distribución Trifásico para Estudios de Máximos de Tensión (Peaks) Ocasionados por Descargas Atmosféricas

Model of a Three-Phase Transformer for Studies of Voltage Surges (Peaks) due to Lighting Discharges

A.G. Kanashiro, A. Piantini y G.F. Burani

Univ. de Sao Paulo, Inst. de Electrotécnica y Energía, Av. Prof. Luciano Gualberto N°1289,
05508-010 Sao Paulo, SP-Brasil (e-mail: arnaldo@iee.usp.br)

Resumen

Este trabajo se presenta una metodología para modelar transformadores de distribución trifásico para el estudio de los máximos (peaks) de tensión transferidos al secundario, en el caso de descargas atmosféricas directas o indirectas. La validación del modelo fue realizada a través de comparaciones entre simulaciones computacionales y resultados de ensayos obtenidos en el laboratorio. Los resultados mostraron que las tensiones transferidas presentadas por el modelo y por el transformador son mucho más próximas cuando

se consideran los impulsos de tensión con formas de onda normalizada (1.2/40m s) y típicas de tensiones inducidas. El modelo es simple y representa razonablemente bien el transformador, permitiendo el análisis de las tensiones transferidas en las redes secundarias.

Abstract

This paper presents a methodology for modeling three-phase distribution transformers for the analysis of the voltage surges transferred to the secondary networks when direct or indirect lightning discharges occur. The validation of the model was reached through comparisons between computer simulations and results of tests performed in the laboratory. The results showed that the voltages transferred presented by the model and by the transformer are quite similar when the voltage impulses with both standard (1.2/50m s) and typical waveforms of induced voltages are considered. The model is simple and represents the transformer reasonably well, permitting the analysis of the voltages transferred in the secondary networks.

Keywords: *distribution transformer, transferred voltages, lightning surges, transformer modeling*

INTRODUCCIÓN

Las sobretensiones debido a descargas atmosféricas están entre las principales causas de las desconexiones en líneas de distribución. Por tanto, es fundamental que el fenómeno sea estudiado, para que las soluciones técnicas más adecuadas, sean adoptadas buscando evitar interrupciones en el suministro de energía eléctrica. En los estudios de los fenómenos transitorios son utilizados modelos y, en el caso del transformador de potencia su representación, generalmente no es adecuada para análisis de las tensiones transferidas cuando ocurre la incidencia de picos de alta frecuencia. Además, raro vez los efectos de la carga son considerados. A pesar de que algunos modelos han sido propuestos ([Vaessen, 1988](#); [Morched et al., 1993](#); [Bacheqa et al., 2003](#)), estos no entregan resultados confiables, pues no consideran todas las variables. Es necesario el desarrollo de un modelo de transformador que considere los efectos de la carga en el análisis de las tensiones transferidas al secundario. Además, este modelo debe ser simple y con resultados confiables, el cual sin duda representaría

una importante contribución.

El estudio de las tensiones transferidas, depende del conocimiento de las características de las tensiones inducidas en el primario y del comportamiento del transformador en altas frecuencias. [Piantini \(1991\)](#) presentó un modelo teórico para el cálculo de tensiones inducidas en líneas sin protección, siendo validado a través de comparaciones con resultados experimentales obtenidos con un modelo en escala reducida, desarrollado a lo largo de la investigación donde fueron simuladas líneas de distribución y el efecto de la descarga atmosférica. Para la validación del modelo teórico fueron también utilizados datos referentes a líneas reales. Como parte de la investigación, fue estudiado el comportamiento de los transformadores de distribución, teniendo en cuenta la utilización del modelo de transformador para simulaciones y el análisis de las tensiones inducidas en la red primaria.

De acuerdo con [Piantini \(1991\)](#), se realizó el estudio del transformador, realizando ensayos en un amplio rango de frecuencias, con el objetivo de conocer las características del transformador con relación a las tensiones transferidas. Fueron determinadas las respuestas en frecuencia y su impedancia de entrada. Basado en las simulaciones, se obtuvo un circuito simple RLC que representó un avance significativo en relación al circuito PI capacitivo. [Piantini y Malagodi \(1999\)](#), mostraron comparaciones entre las características de algunos transformadores considerándose diferentes fabricantes y potencias nominales. El comportamiento de esos transformadores fue analizado con el objetivo de evaluar la generalidad del modelo propuesto anteriormente. Basada en las curvas de respuesta en frecuencia y de impedancia de entrada de los transformadores ensayados, el circuito RLC sufrió algunas alteraciones para mejorar representación de los transformadores. Considerándose los resultados obtenidos, el modelo se mostró adecuado para la representación de todos los transformadores de distribución trifásicos analizados en la condición sin carga.

El modelo de transformador, en la condición sobre carga, fue investigado por [Piantini et al. \(1999\)](#) con el objetivo de analizar los picos de tensión transferidos al secundario. Fueron utilizadas las curvas de respuesta en frecuencia y de impedancia del transformador. El modelo fue desarrollado para un transformador de distribución específico y las simulaciones mostraron que el modelo representa razonablemente bien el transformador.

El objetivo de este trabajo es desarrollar un modelo de transformador de distribución trifásico para el estudio de los picos de tensión transferidos al secundario cuando se producen descargas

atmosféricas directas o indirectas, considerando los efectos de la carga. Los estudios fueron realizados a partir del conocimiento adquirido en los desarrollos anteriores, estableciendo una metodología diferente.

La validación del modelo fue realizada a través de comparaciones entre simulaciones computacionales y resultados de ensayos de laboratorio, siendo consideradas diferentes condiciones de carga y aplicación de impulsos con formas de onda normalizada (1,2/50m s) y típicas de tensiones inducidas por descargas atmosféricas.

Lo que se persigue es obtener un modelo que represente en forma razonable el transformador considerado, inclusive en la condición bajo carga, permitiendo el análisis de las tensiones transferidas en las redes secundarias. El modelo respeta el compromiso asumido al inicio del desarrollo relacionado a la simplicidad y exactitud de los resultados.

METODOLOGÍA

En el estudio se consideró que las tensiones inducidas en las líneas de distribución tienen aproximadamente la misma amplitud y forma de onda en las tres fases, pues el espaciamiento entre las fases de las líneas de distribución es generalmente mucho menor que la distancia hasta el lugar de la descarga. Además, los transformadores de distribución son normalmente protegidos por pararrayos resultando valores de tensión de las mismas características sobre los terminales primarios del transformador. El transformador de distribución fue considerado como un cuadripolo, siendo determinadas las impedancias en función de la frecuencia. Considerándose el cuadripolo lineal e invariante en el tiempo, y siendo V_1 , I_1 e V_2 , I_2 las tensiones e corrientes de entrada y salida del cuadripolo, respectivamente, la relación (1) puede ser obtenida.

$$V_1 = Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2$$

$$V_2 = Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 \quad (1)$$

donde:

Z_{11} = impedancia de entrada del cuadripolo;

Z_{22} = impedancia de salida del cuadripolo;

Z_{12} e Z_{21} = impedancias de transferencia del cuadripolo.

Basada en esa relación, el circuito equivalente fue establecido ([Figura](#)

1), donde:

Z_1 = impedancia entre el primario y tierra;

Z_2 = impedancia entre el secundario y tierra;

Z_3 = impedancia entre el primario y secundario.

Considerando la expresión (1) y el circuito equivalente de la [Figura 1](#), se puede determinar las expresiones relacionando Z_{11} , Z_{22} y Z_{21} a Z_1 , Z_2 y Z_3 . Piantini et al. (1999), mostraron las características del transformador, representadas por las impedancias Z_{11} , Z_{21} y Z_{22} , determinadas a través de la utilización de un generador de señales, donde fueron aplicados valores de voltaje, en forma de onda sinusoidal, en la banda de frecuencia de 10 kHz a 1 MHz. En ese trabajo se utilizó como excitación una forma de onda de impulso (1,2/50 m s), siendo registrados los valores de voltaje y de corriente para obtención de las impedancias Z_{11} , Z_{21} y Z_{22} del transformador. Para la determinación de las impedancias y de la función de transferencia, las señales registradas en el dominio del tiempo fueron descompuestas por medio de series de Fourier, obteniéndose el espectro de frecuencias de cada señal. A partir de esos datos fueron determinados los módulos y las fases de las impedancias y, también, de la función de transferencia en función de la frecuencia. Este procedimiento fue inicialmente investigado para analizar su viabilidad, siendo adoptado, ya que la caracterización de los transformadores en laboratorio es obtenido de forma más rápida.

El paso siguiente fue la determinación de las impedancias Z_1 , Z_2 y Z_3 en función de la frecuencia utilizándose los valores de las impedancias Z_{11} , Z_{22} y Z_{21} . A partir de las características de Z_1 , Z_2 y Z_3 , fue investigada la representación de cada una de esas impedancias, separadamente, a través de elementos resistivos (R), inductivos (L) y capacitivos (C). En una segunda etapa fueron realizadas simulaciones con el circuito equivalente, siendo las impedancias Z_1 , Z_2 y Z_3 representadas por los parámetros RLC determinados anteriormente. A través de simulaciones computacionales fueron comparadas las curvas de la función de transferencia y de las impedancias de entrada, de transferencia y de salida, con relación a los módulos y fases, presentadas por el circuito equivalente y por el transformador representado por el cuadripolo. En función de los resultados, los parámetros RLC del circuito equivalente fueron ajustados. La validación del modelo de transformador fue realizada comparando los resultados obtenidos en las simulaciones y en los ensayos de laboratorio.

La carga fue colocada directamente en los terminales secundarios del transformador. Fueron comparadas las respuestas del modelo y del

transformador para una excitación a través de la tensión de impulso con forma de onda normalizada y con formas de onda típicas de tensiones inducidas por descargas atmosféricas.

El efecto de la carga en el secundario del transformador fue entonces analizado, manteniendo la validación del modelo de transformador en las condiciones citadas.

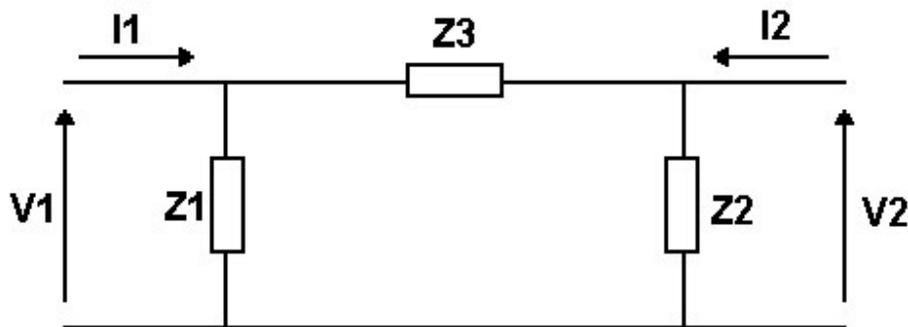


Fig. 1: Circuito equivalente del cuadripolo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Pruebas

Considerando que las tensiones inciden con la misma amplitud y forma de onda en las tres fases, las configuraciones para la determinación de la función de transferencia y de las impedancias de entrada, de transferencia y de salida corresponden, en el caso de la excitación aplicada en la bobina del primario, a los terminales primarios cortocircuitados y secundarios abiertos, y, en el caso de excitación por la bobina del secundario, a los terminales secundarios cortocircuitados y primarios abiertos. El neutro permanece puesto a tierra en ambas configuraciones.

Para el desarrollo del modelo fue utilizado un transformador de distribución trifásico de 30 kVA, 13,8 kV / 220-127 V, conectado en alta tensión en triángulo y en baja tensión en estrella. El transformador fue sometido a la excitación impulsiva, con forma de onda normalizada, para la determinación de las impedancias Z_{11} , Z_{22} y Z_{12} . Los valores de tensión fueron medidos utilizándose un divisor resistivo y los valores de corriente fueron obtenidos a través de un derivador ("shunt"). Fue utilizado un osciloscopio digital marca HP, 250 MHz, para adquisición de las señales. La [Figura 2](#) muestra el circuito utilizado para la determinación de Z_{11} . El impulso de tensión (V'_1) fue aplicado en los

terminales H_1 , H_2 , H_3 , simultáneamente, y a través de un "shunt" fue obtenido el valor de corriente (I_1). El terminal X_0 y el tanque del transformador fueron puestos a tierra a través del "shunt". Basado en los valores de V_1 y I_1 fueron determinados V_1 y I_1 , siendo consideradas las constantes del sistema de medición, o sea, la relación del divisor (172:1), el valor del "shunt" (5 W) y la impedancia característica del cable coaxial (75 W).

Los valores de tensión V_1 y de corriente I_1 fueron registrados en el dominio del tiempo. Para la determinación del módulo y fase de la impedancia Z_{11} las señales fueron descompuestas utilizando la serie de Fourier. Lo anterior permitió obtener las componentes en frecuencia de cada señal. La impedancia Z_{11} fue obtenida a través de la relación V_1/I_1 .

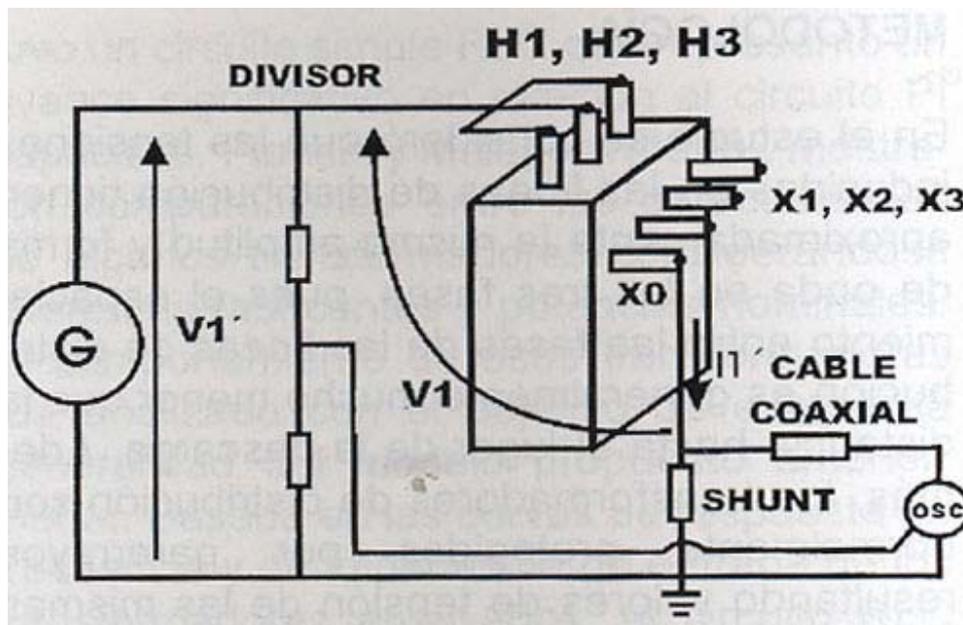


Fig. 2: Circuito para determinación de Z_{11} .

Para la determinación de la impedancia de salida Z_{22} fue utilizado un procedimiento análogo al descrito en la determinación de la impedancia Z_{11} , siendo el impulso de tensión V_2 aplicado simultáneamente en los terminales X_1 , X_2 , X_3 . La corriente I_2 en el secundario fue obtenida a través del "shunt". El módulo y fase de la impedancia Z_{22} fueron determinados a través de la relación V_2/I_2 . Para la determinación de la impedancia Z_{21} fue aplicado impulso de tensión en los terminales primarios, siendo obtenida la tensión transferida V_2 en el terminal X_3 de la bobina del secundario y la corriente I_1 que circula por el "shunt". El módulo y fase de la impedancia Z_{21} fueron

determinados a través de la relación V_2/I_1 .

La impedancia de entrada Z_{11} presentó un comportamiento capacitivo pues la excitación fue aplicada en los terminales primarios simultáneamente y las bobinas están conectados en triángulo. Para la impedancia de salida Z_{22} el comportamiento se presentó inductivo para las frecuencias más bajas y capacitivo para las frecuencias más elevadas. Para las frecuencias más bajas prevalece el efecto inductivo de la bobina del secundario pues las bobinas referentes a cada fase son conectadas en paralelo durante la aplicación del impulso de tensión en los terminales secundarios del transformador. Para frecuencias más elevadas prevalece el efecto capacitivo donde el módulo de la impedancia Z_{22} disminuye con la frecuencia, teniendo el mismo comportamiento observado para la impedancia de transferencia Z_{21} .

El modelo

La representación de la impedancia Z_1 fue obtenida a través de un capacitor, siendo su valor establecido en función del comportamiento de Z_1 en función de la frecuencia. Se debe considerar que las impedancias Z_1 , Z_2 y Z_3 representan valores medidos, pues fueron determinadas utilizándose los módulos y fases de las impedancias Z_{11} , Z_{22} y Z_{21} , obtenidas a través de mediciones en el transformador.

La impedancia Z_2 presentó un comportamiento inductivo hasta la frecuencia de aproximadamente 800 kHz, y entonces se volvió predominantemente capacitivo. Para la representación de ese comportamiento fue utilizado un circuito resonante paralelo constituido por elementos RLC. Basado en el comportamiento de Z_2 fueron determinados para el circuito RLC, la frecuencia de resonancia ω_0 , los valores de la resistencia R y del producto LC referente a la inductancia y capacitancia. A continuación fueron determinados los valores de la inductancia L y de la capacitancia C . Utilizando el circuito y los parámetros determinados de acuerdo con el procedimiento descrito, fueron realizadas simulaciones buscando una mejor representación con relación al comportamiento de Z_2 .

Con relación a la impedancia Z_3 , el espectro de frecuencias fue dividido en tres intervalos donde, se procuró caracterizar su comportamiento en cada intervalo. Un circuito RLC en serie fue considerado adecuado para representar la impedancia Z_3 entre 200 kHz y 950 kHz. La resonancia fue fijada en 800 kHz, siendo ajustados los parámetros del circuito. Para frecuencias menores que 200 kHz el procedimiento fue similar y los parámetros del circuito RLC en serie fueron ajustados considerando la frecuencia de resonancia en 130

kHz. Para frecuencias mayores a 950 kHz el comportamiento fue representado a través de un capacitor. Los parámetros de cada circuito RLC serie fueron determinados para la frecuencia de resonancia ω_0 , donde fueron obtenidos los valores de la resistencia R y del producto LC del circuito resonante. A continuación fueron determinados los valores de la capacitancia C y de la inductancia L. La impedancia Z_3 fue representada considerando la superposición de los circuitos resonantes serie y del capacitor. Los dos circuitos resonantes y el capacitor fueron asociados en paralelo. Un resistor R fue colocado en serie con ese circuito paralelo de modo de ajustar los valores del módulo de Z_3 . Después de la determinación de los elementos R, L, C fueron realizadas simulaciones buscando obtener una mejor representación del comportamiento de Z_3 .

El circuito equivalente y el cuadripolo del transformador fueron comparados, basados en el comportamiento de la función de transferencia (relación entre V_2 y V_1 - tensión en el secundario y en el primario en función de la frecuencia) y de las impedancias de entrada, de salida y de transferencia. En una comparación inicial fue constatada la necesidad de ajustar los valores de los parámetros del circuito equivalente para mejorar la aproximación de la relación de ganancia, siendo alterados los valores de los parámetros correspondientes a los circuitos que representan las impedancias Z_2 y Z_3 .

Se muestra en la [Figura 3](#) el circuito equivalente donde pueden ser identificados los parámetros resistivos, inductivos y capacitivos referentes a las impedancias Z_1 , Z_2 y Z_3 . El capacitor C_1 representa la impedancia Z_1 . El circuito resonante paralelo $R_3L_1C_3$ representa la impedancia Z_2 . La impedancia Z_3 es representada por el resistor R_6 en serie con el circuito paralelo compuesto de los circuitos resonantes $R_2L_2C_2$, $R_5L_5C_4$ y del capacitor C_7 . Fueron comparados el comportamiento de las impedancias de entrada, de salida y de transferencia del cuadripolo y del circuito equivalente. Para obtención de las impedancias del circuito equivalente fue utilizado el programa PSpice. Fue utilizado un generador de señales para la excitación sinusoidal a la entrada del circuito equivalente.

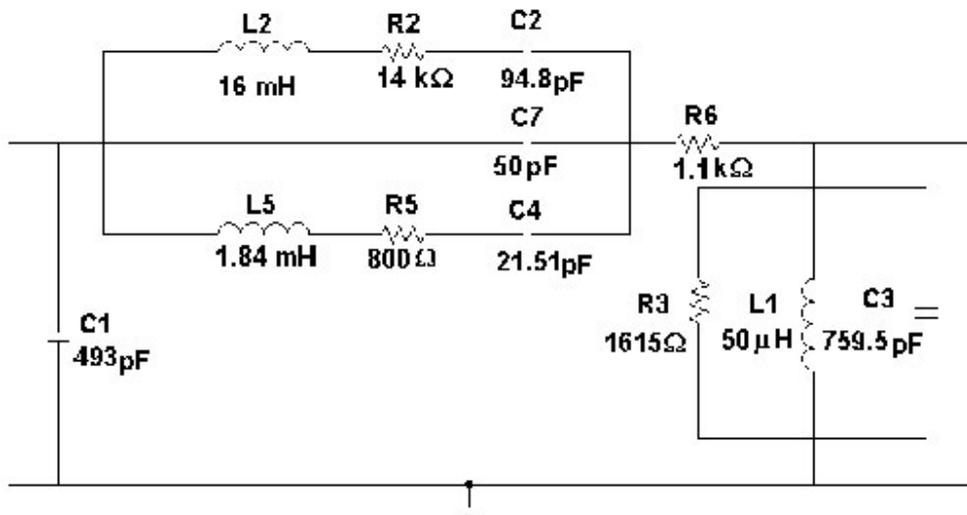


Fig. 3: Circuito equivalente.

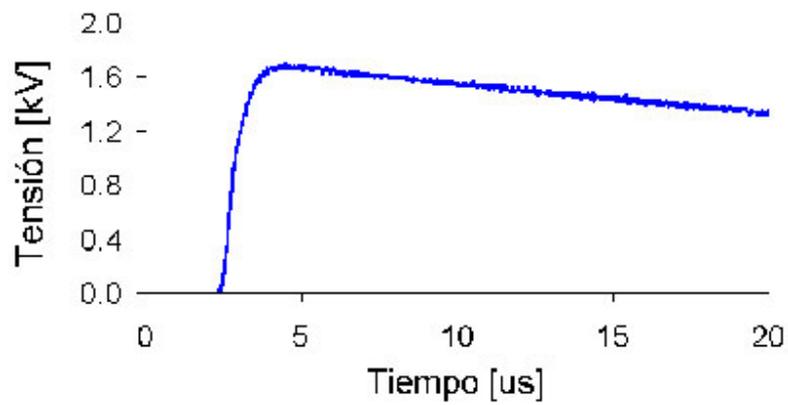
Validación del modelo

Los impulsos de tensión fueron aplicados simultáneamente en los terminales primarios del transformador con el secundario en varias condiciones de carga. Fueron consideradas formas de onda de impulso normalizada y formas de onda típicas de tensiones inducidas.

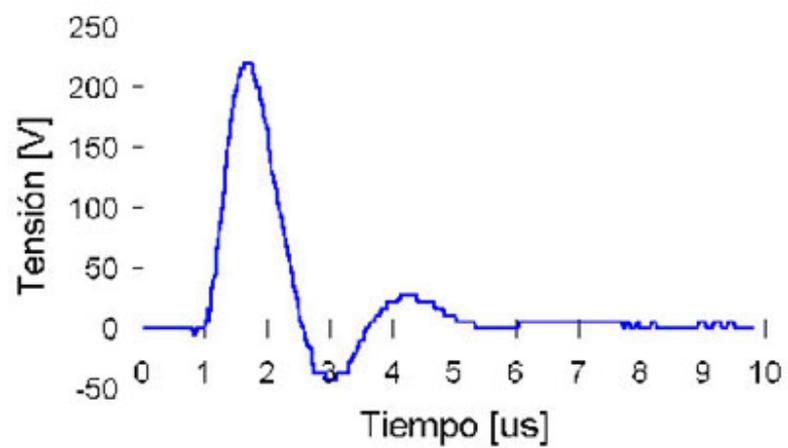
Para cada forma de onda fue obtenida inicialmente la tensión transferida a los terminales secundarios estando el transformador en vacío. En secuencia, cargas equilibradas resistivas y capacitivas fueron colocadas en el secundario del transformador y las tensiones transferidas fueron registradas.

Como ejemplo, la [Figura 4](#) muestra dos formas de onda de las tensiones aplicadas a los terminales de alta tensión del transformador de 30 kVA. Las [Figuras 5](#) y [6](#) muestran algunas comparaciones entre las tensiones transferidas presentadas por el modelo y por el transformador, sobre diferentes condiciones de carga.

Los resultados mostraron que las tensiones transferidas presentadas por el modelo y por el transformador son mucho más próximas considerándose los impulsos de tensión con formas de onda normalizada y típicas de tensiones inducidas, en las diversas condiciones de carga.

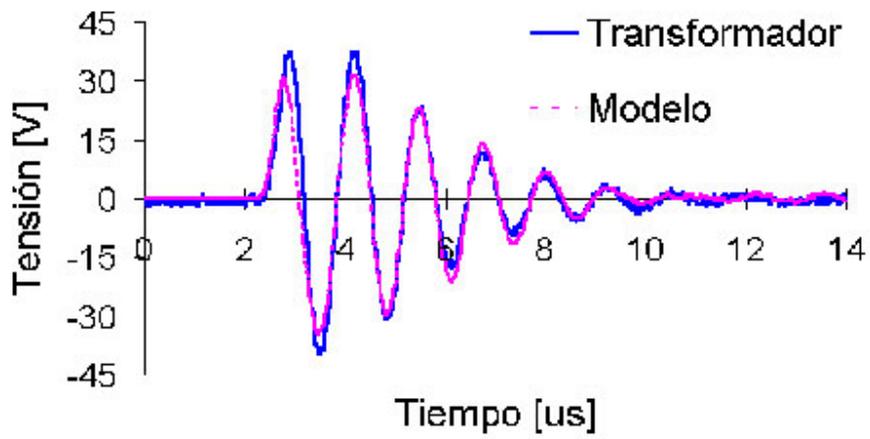


(a)

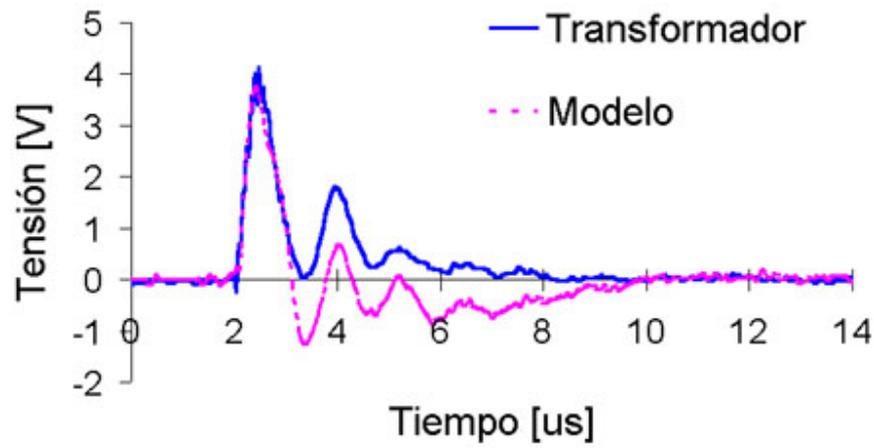


(b)

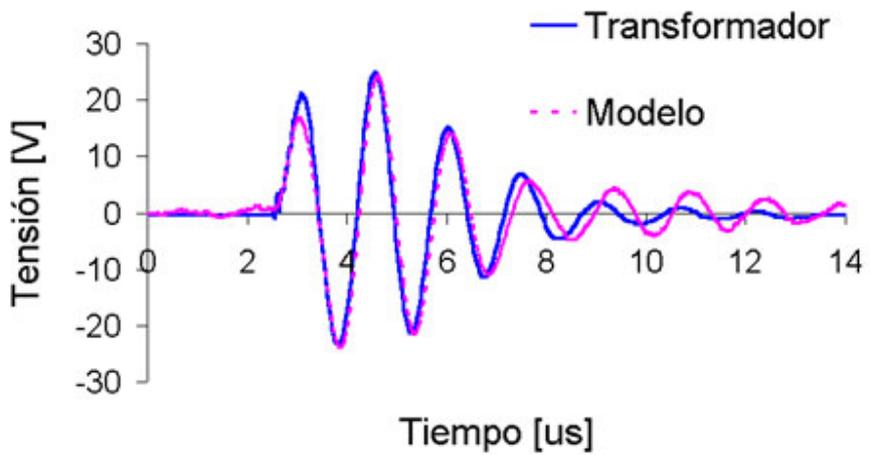
Fig. 4: Ejemplos de las tensiones aplicadas a los terminales de alta tensión del transformador: a) impulso normalizado (1,2/50 μ s) y b) forma de onda típica de tensión inducida.



(a)

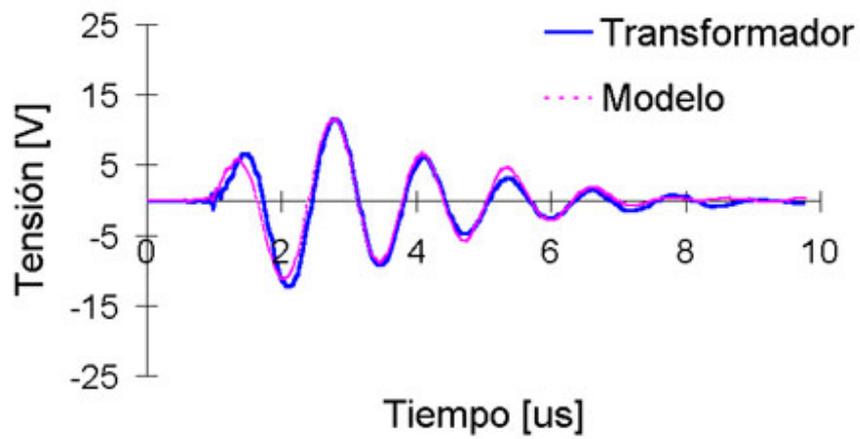


(b)

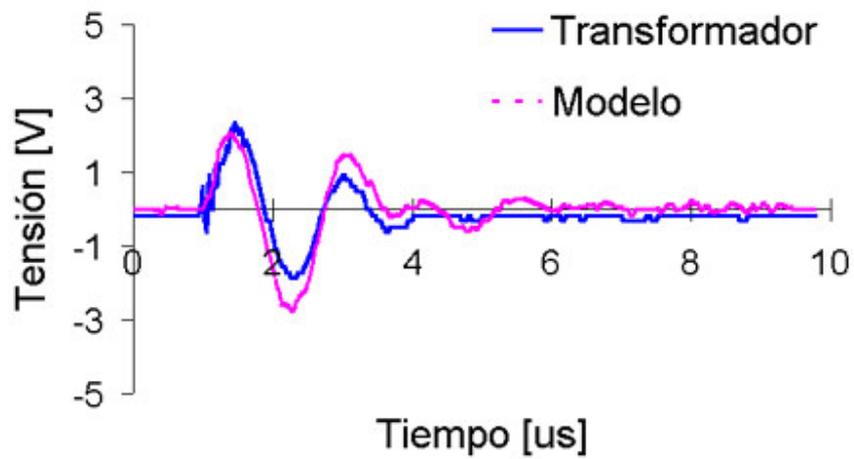


(c)

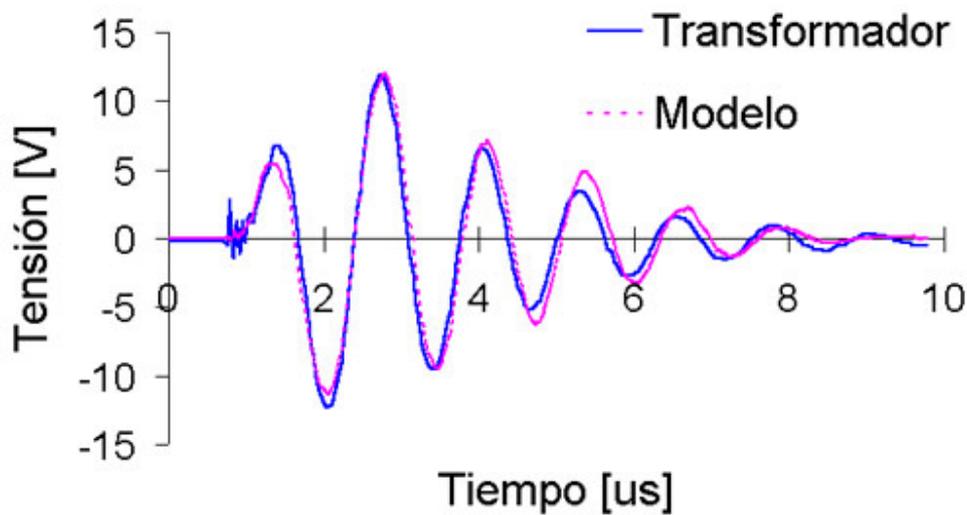
Fig. 5: Comparaciones entre las tensiones transferidas medidas y calculadas cuando la tensión de impulso mostrada en la [Fig. 4a](#) fue aplicada a los terminales de alta tensión del transformador: a) sin carga, b) carga = 50 W y c) carga = 390 pF.



(a)



(b)



(c)

Fig. 6: Comparaciones entre las tensiones transferidas medidas y calculadas cuando la tensión de impulso mostrada en la [Fig. 4b](#) fue aplicada a los terminales de alta tensión del transformador: a) sin carga, b) carga = 100 W y c) carga = 10 pF.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, es posible concluir que:

La metodología, basada en el comportamiento, en función de la frecuencia, de un transformador de distribución, se mostró bastante adecuada para el desarrollo del modelo;

Las tensiones transferidas presentadas por el modelo y por el transformador se muestran próximas, pudiendo afirmar que el modelo representa razonablemente bien el transformador de distribución típico, inclusive en la condición bajo carga, permitiendo el análisis de las tensiones transferidas en las redes secundarias;

Considerando el compromiso de simplicidad y exactitud para el modelo del transformador, se puede considerar que los objetivos establecidos en este trabajo fueron plenamente conseguidos.

AGRADECIMENTOS

Los autores agradecen a la ingeniera Thaís Ohara y a los ingenieros Acácio Silva Neto y Paulo F. Obase por la participación en varias fases

del desarrollo de los trabajos.

REFERENCIAS

Bachega, R.J., J.K.A. Pivatto y M.L.B. Martinez, "Transformer modelling based on standard testing results", *Proceedings of the XIII International Symposium on High Voltage Engineering (XIII ISH)*, 01-04, Delft, Aug. (2003).

Morched, A., L. Martí y J. Ottevangers, "A high frequency transformer model for EMTP", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3, 1615-1626, Jul. (1993).

Piantini, A., "Contribution to the study of lightning induced voltages on distribution lines" (in Portuguese), MSc Thesis, Dept. of Electrical Engineering, University of São Paulo, São Paulo, 205p. (1991).

Piantini, A. y C.V.S. Malagodi, "Modelling of three-phase distribution transformers for calculating lightning induced voltages transferred to the secondary", *Proceedings of the 5th International Symposium on Lightning Protection (5th SIPDA)*, 59-64, São Paulo, May. (1999).

Piantini, A., W. Bassi, J.M. Janiszewski y N. Matsuo, "A simple transformer model for analysis of transferred lightning surges from MV to LV lines", *Proceedings of the 15th International Conference on Electricity Distribution (15th CIRED)*, Nice. (1999).

Vaessen, P.T.M., "Transformer model for high frequency", *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4, 1761-1768, Oct. (1988).

© 2004 **Centro de Información Tecnológica**

Casilla de Correos 724

La Serena

Fax: 56-51-210496



citchile@entelchile.net