

ANÁLISIS WAVELET DE ARMÓNICOS EN LA CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES

Quero José; Mocchiutti Martín; Azor Rubén
Facultad de Ingeniería. Universidad de Mendoza (UM)

INTRODUCCIÓN

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis frecuencial-temporal del transitorio de conexión de un transformador de distribución, medido entre una de sus fases y neutro, en sus bornes de baja tensión. Es decir, un estudio que permita observar, no sólo la existencia de armónicos y el análisis de su espectro de frecuencias, sino también poder determinar la ubicación temporal de dichas frecuencias.

Las mediciones fueron realizadas el día 17 de octubre de 2003 en la Estación Transformadora Godoy Cruz de La Cooperativa, Empresa Eléctrica de Godoy Cruz situada en calle Sarmiento y Cervantes de Godoy Cruz, Provincia de Mendoza. El instrumento utilizado fue un osciloscopio de fósforo digital (DPO) Tektronix TDS3012 con un ancho de banda de 100MHz y una frecuencia de muestreo de 1.25 GS/s. Este instrumento fue facilitado por el Ente Provincial Regulador Eléctrico (EPRE). También se utilizó una punta de prueba de 15KV, con atenuación 1000:1 para protección del personal y del instrumento de medición. Los datos fueron almacenados en archivos de texto con extensión CSV (Comma Separated Values). Los archivos fueron grabados en diskettes de 3.5" utilizando la unidad de disco del osciloscopio.

Para el análisis informático se utilizó el programa de matemática matricial Matlab 6.1 para Windows ya que es una herramienta poderosa y versátil. Además es necesario instalar el Wavelet Toolbox para Matlab que posee las funciones requeridas para el procesamiento matemático.

ANTECEDENTES TEÓRICOS

Si se quiere analizar el espectro de una señal periódica y continua se puede aplicar la Serie de Fourier. Esta serie infinita representa una función en términos de senos y cosenos de distintas frecuencias. Sin embargo, la mayoría de las señales en la naturaleza, o creadas por el hombre, no son periódicas. Por eso fue necesario extender el alcance de la Serie de Fourier mediante la Transformada de Fourier.

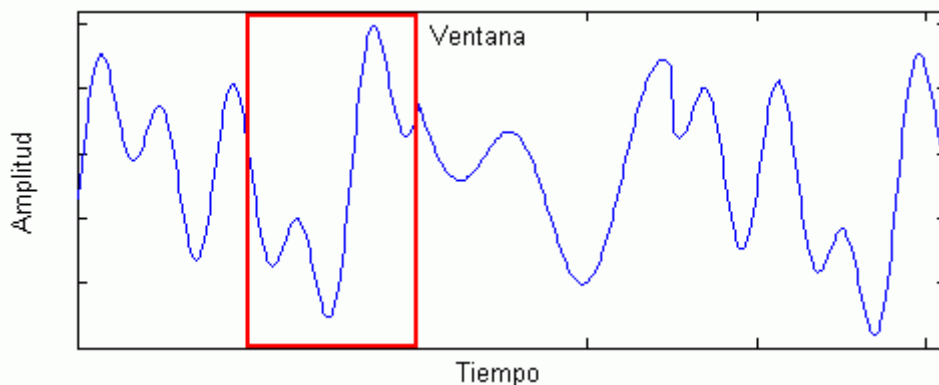
Pero la Transformada de Fourier también se aplica únicamente a funciones continuas en el tiempo. Además, implica el cálculo de una integración con extremos infinitos que no en todos los casos resulta fácil de resolver. A través de las computadoras digitales, que abundan como herramientas de proceso en todos los ámbitos, se pudo utilizar una variante que es la Transformada Discreta de Fourier (DFT, Discrete Fourier Transform). Posteriormente se desarrolló un nuevo algoritmo de cálculo llamado Transformada

Rápida de Fourier (FFT, Fast Fourier Transform) que permite obtener la información del espectro de frecuencia de una señal en forma muy rápida ya que disminuye drásticamente la cantidad de cálculos necesarios.

En la Transformada de Fourier, ya sea continua o discreta, se produce una promediación de la información frecuencial en el tiempo. Esto quiere decir que no puede proveer información de cuándo aparece una componente espectral, porque afectará del mismo modo el resultado de la integración. En otras palabras, si una componente de frecuencia f_1 aparece en los instantes t_1 o t_2 , tendrá el mismo efecto sobre la integración y se pierde la información temporal. Este fenómeno ocurre porque la Transformada de Fourier no es adecuada para una señal que posee frecuencia variable en el tiempo. En ese caso se dice que la señal es no estacionaria ya que posee un espectro de frecuencias que no se mantiene constante en el tiempo.

La primera solución que surgió fue la Transformada de Fourier de Corto Tiempo (STFT, Short Time Fourier Transform) desarrollada por Dennis Gabor en 1946. Consiste en dividir la señal en segmentos suficientemente pequeños para que puedan suponerse estacionarios. Para este propósito se elige una función ventana w . El ancho de esta ventana debe ser igual al segmento de la señal donde su estacionariedad es válida.

Primeramente, esta función ventana se localiza al comienzo de la señal bajo estudio. Supóngase que el ancho de la ventana es T segundos. Así, en el instante $t = 0$, la función ventana sobrelapará con los primeros $T/2$ segundos, entonces la función ventana y la señal son multiplicadas. Haciendo esto, solamente los primeros $T/2$ segundos de la señal son elegidos, con la apropiada ponderación de la ventana. Si la ventana es un rectángulo con amplitud unitaria, entonces el producto será de igual magnitud que la señal original. Luego este producto se supone que es otra señal y su Transformada de Fourier será calculada. El resultado de este proceso es la Transformada de Fourier de los primeros $T/2$ segundos de la señal. Si esta porción de la señal es estacionaria, como se supuso, no habrá problemas y el resultado obtenido será una verdadera representación en frecuencia de esa parte de señal.



El próximo paso sería desplazar esta ventana, por ejemplo un tiempo t_1 , a una nueva ubicación, multiplicarla por la señal y tomar la Transformada de Fourier del producto.

Este procedimiento es seguido hasta alcanzar el final de la señal desplazando la ventana con intervalos de t_1 segundos. La explicación anterior puede resumirse en la siguiente definición de la STFT:

$$\text{STFT}_x(t',f) = \int (x(t) \cdot w^*(t-t')) \cdot e^{-j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot t} dt$$

Donde:

$x(t)$: es la señal bajo estudio

$w^*(t)$: es el complejo conjugado de la función ventana

En esta expresión se pueden observar varias características. La STFT de la señal $x(t)$ no es otra cosa que la Transformada de Fourier del producto de la señal multiplicada por una función ventana. Para cada instante t' y frecuencia f se computa un nuevo coeficiente STFT, esto quiere decir que es una función tanto del tiempo como de la frecuencia, en contraposición a la Transformada de Fourier que es función únicamente de la frecuencia. Como resultado se obtiene una expresión bidimensional, función del tiempo y de la frecuencia, cuya representación gráfica será una figura tridimensional.

ANÁLISIS WAVELET

La Transformada Wavelet es el lógico paso siguiente: una técnica de ventaneo de tamaño variable. Fue desarrollada como una solución alternativa a la STFT para superar el problema de resolución. El primer registro histórico de lo que hoy se denomina “Wavelet” se remonta a 1909 en un trabajo realizado por Alfred Haar. El concepto de wavelets como lo conocemos fue propuesto por Jean Morlet y el equipo del Centro de Física Teórica de Marsella, Francia. Los métodos del análisis wavelet fueron desarrollados principalmente por Yves Meyer y sus colegas. Pero recién en 1988 apareció el primer algoritmo de cálculo y su autor fue Stephane Mallat. Desde entonces la investigación acerca de los wavelets captaron el interés internacional donde se destacan científicos como Ingrid Daubechies, Ronald Coifman, y Victor Wickerhauser. Su aplicación se extiende a campos tan diversos como:

- > Biología: estudiando las membranas celulares con wavelets, se reconoce una célula sana de una patológica.
- > Metalurgia: utilizando wavelets se puede caracterizar una superficie áspera.
- > Mecánica: se emplean en la supervisión de partes rodantes.
- > Aeronáutica: se usan wavelets para el procesamiento digital de señales en radares y para la compresión de imágenes.

El análisis wavelet se hace en una forma similar a la STFT. La señal es multiplicada por una función, en este caso el wavelet, y la transformada se calcula separadamente para diferentes segmentos de la señal en el dominio del tiempo. Sin embargo hay dos diferencias apreciables entre la STFT y la Transformada Wavelet:

- No se toman las Transformadas de Fourier de las señales ventaneadas, lo que significa que las frecuencias negativas no existen. Una senoide se corresponderá con un único pico en la Transformada Wavelet.
- El ancho de la ventana cambia a medida que la transformada es computada. Esta es probablemente la característica más importante de la Transformada Wavelet y se denomina “escalamiento”.

La Transformada Wavelet Continua (CWT, Continuous Wavelet Transform) se define como:

$$CWT_x(s, \tau) = \gamma(s, \tau) = \int x(t) \cdot \psi_{s, \tau}^*(t) dt$$

La ecuación anterior muestra cómo una función $x(t)$ es descompuesta en un conjunto de funciones base $\psi_{s, \tau}(t)$ llamadas wavelets. El resultado de esta integración en el dominio del tiempo es una serie de coeficientes dependientes de dos variables. Las variables s y τ son las nuevas dimensiones escala y traslación. Nuevamente se obtiene una función bidimensional de una función unidimensional. Para conformar el proceso inverso y poder reconstruir una señal $x(t)$, se da a continuación la Transformada Wavelet Inversa:

$$x(t) = \iint \gamma(s, \tau) \cdot \psi_{s, \tau}(t) dt ds$$

Los wavelets son generados desde un único wavelet básico $\psi(t)$ que se denomina wavelet madre. Estas funciones madre pueden ser definidas respetando ciertas propiedades. Esto define un marco dentro del cual se pueden diseñar wavelets nuevos para investigación personal. Las más importantes propiedades, o requerimientos, de los wavelets son las condiciones de admisibilidad y regularidad que son las propiedades que le dan su nombre. La condición de admisibilidad da la característica de onda (wave) y su acotamiento en el espectro de la frecuencia; la regularidad da la rapidez de caída en el tiempo y define su longitud finita o su “pequeñez”. Juntas dan el nombre de Wavelet, que significa pequeña onda. Considerando el escalamiento y la traslación, su expresión es la siguiente:

Donde s es el factor de escala, τ es el factor de traslación y el factor $1/\sqrt{s}$ es para la normalización de la energía a través de las diferentes escalas.

El término traslación está relacionado con la ubicación de la ventana y obviamente corresponde a la información temporal en el dominio transformado. Matemáticamente, la traslación de una función $f(t)$, un tiempo k , es igual a $f(t-k)$.

El concepto del parámetro escala en el análisis wavelet es similar al usado en mapas. Las altas escalas corresponden a vistas globales, no detalladas, de la señal y bajas escalas corresponden a vistas en detalle. En términos de frecuencia, bajas frecuencias (altas escalas) corresponden a información global de la señal, mientras que altas frecuencias (bajas escalas) corresponden a información detallada de un patrón oculto de la señal. Usualmente la información global de una señal se extiende a toda la señal, en cambio la información detallada dura relativamente corto tiempo. Podemos decir que la escala es una operación matemática que dilata o comprime la señal. Las escalas más grandes corresponden a señales dilatadas, o estiradas, y las pequeñas escalas corresponden a señales comprimidas. Entonces, en términos de funciones matemáticas, dada la función $f(t)$, $f(t/s)$ corresponde a una versión contraída (comprimida) de $f(t)$ si $s < 1$ y expandida (dilatada) si $s > 1$. La escala es inversamente proporcional a la frecuencia.

Para analizar las señales de este trabajo se utilizó el Wavelet Sombrero Mejicano. Su nombre (en inglés: Mexican Hat) proviene de su forma, posee un canal central llamado “through” y las alas del sombrero se denominan “bumps”. Es uno de los wavelets más simples, es simétrico, lineal en fase y únicamente se utiliza para la Transformada Wavelet Continua. Su función es proporcional a la segunda derivada de la densidad de probabilidad de Gauss:

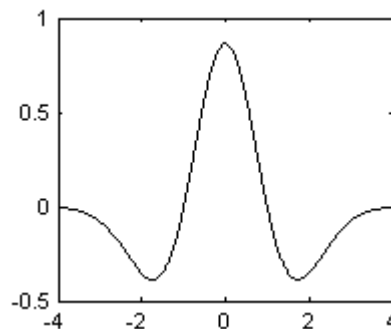


Figura 2: Wavelet Sombrero Mejicano

MEDICIÓN DE LAS SEÑALES

El esquema del circuito utilizado fue el siguiente:

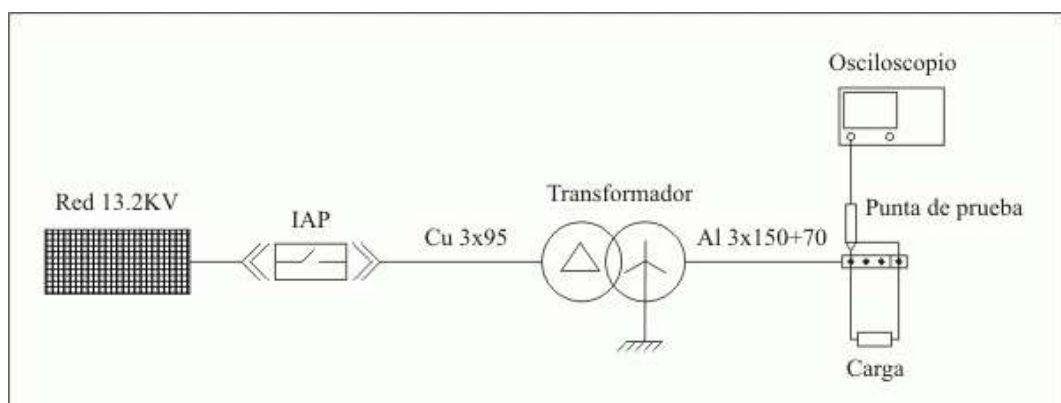


Figura 3: Circuito utilizado en las mediciones

- > Interruptor Automático de Potencia (IAP) en vacío, marca Cutler – Hammer tipo 150CP-WR500, perteneciente a la celda de media tensión N°10 de servicios auxiliares de la Estación Transformadora Godoy Cruz.
- > Cable Armado Subterráneo Cu 3 x 95mm² 15 KV Categoría II (15m).
- > Transformador 13200 / 380V DY11 de 100KVA, marca Miron.
- > Cable Subterráneo Al 3 x 150mm² + 1 x 70mm² 1 KV (15m).
- > Punta de prueba HV15 HF de 15KVpp. Ancho de banda 5MHz. Resistencia de entrada: 500MΩ. Capacidad de entrada: 3pF. Tiempo de subida: 70ns. Atenuación: 1000:1
- > Osciloscopio Digital Tektronix TDS3012 DPO. Ancho de banda: 100MHz. Frecuencia de muestreo: 1.25GS/s. Resistencia de entrada: 1MΩ.

Se registraron 7 mediciones y los datos fueron almacenados en archivos *.CSV y grabados en diskettes para su posterior carga en una PC.

APLICACIÓN DEL ANÁLISIS

Para cargar los archivos de datos provenientes del osciloscopio, acondicionar estos valores crudos y almacenarlos en una variable, se utilizan los siguientes comandos de Matlab:

```
>> C = load('tek00002.csv');  
>> c = C(4001:10000,2);  
>> save 00 c;
```

A continuación se detallará el proceso de análisis de la segunda mediciones registrada. Los datos de este segundo ensayo, realizado con el transformador en vacío, fueron los siguientes:

Ensayo	Variable	Constante de tiempo	Ts	fs
02	c	100μs/div	1·10 ⁻⁷ s	10MHz

Sabiendo que el osciloscopio tiene 10 divisiones horizontales, y teniendo en cuenta que la constante de tiempo fue configurada en 100μs/div, el tiempo medido para esta experiencia fue 1ms. Como sabemos que la cantidad de muestras es de 10000, entonces el período de muestreo será: $T_s = 1ms / 10000$; $T_s = 1 \cdot 10^{-7}s$ Este valor representa el tiempo entre muestras, entonces la frecuencia de muestreo es: $f_s = 1 / T_s = 10MHz$. Teniendo en cuenta el teorema de Shannon que dice que la frecuencia de muestreo debe ser igual o mayor que el doble de la mayor componente de frecuencia de la señal original, se deben ignorar las frecuencias mayores a 5MHz.

Para poder visualizar la señal se ingresa la siguiente instrucción:

```
>> load 02, plot(c)
```

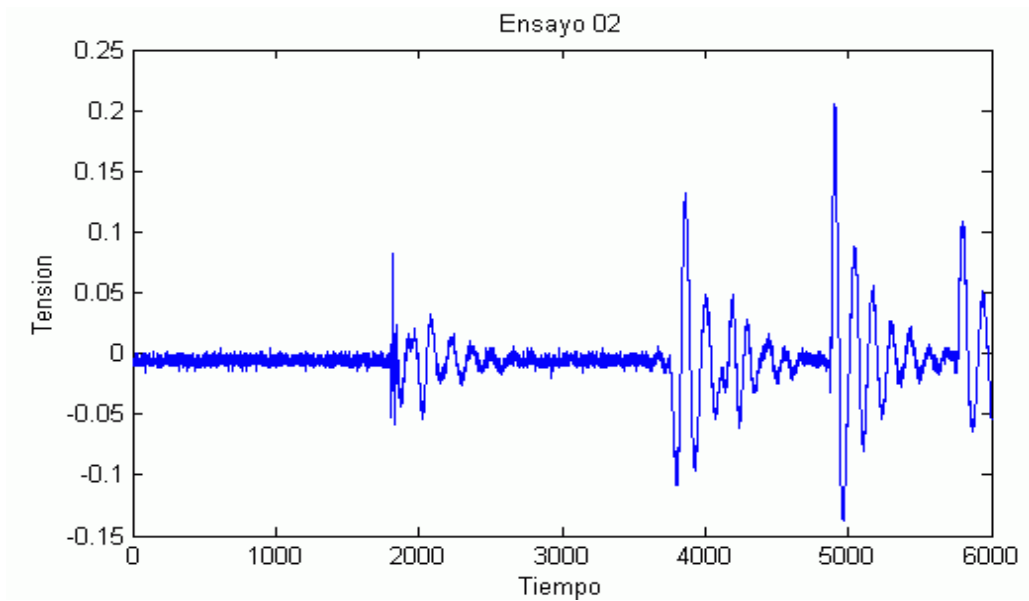


Figura 4: Visualización de la señal

Su Transformada Wavelet representada en 3 dimensiones se calcula:

```
>> Cc = cwt(c,1:200,'mexh');
```

```
>> Ccz = abs(Cc(:,1001:6000)); u = 1001:6000; v = 1:200;
```

```
>> surf(u,v,Ccz); shading interp;
```

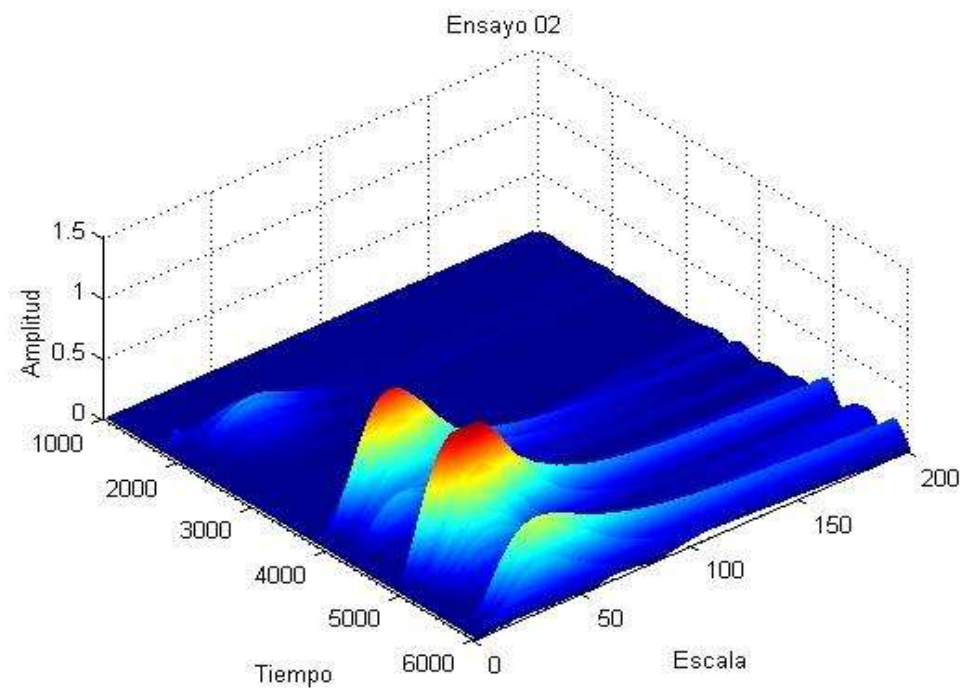


Figura 5: Transformada Wavelet de la señal

Hay cuatro grupos separados de oscilaciones. Las escalas de los picos van de $s = 30$ a $s = 45$ pero los más altos poseen una escala central de $s = 35$. Para transformar estos valores de escala en valores de frecuencias se utiliza el siguiente comando:

```
>> scal2frq([30 35 45], 'mexh', 1e-7)
```

```
ans =
```

```
1.0e+004 *  
8.3333 7.1429 5.5556
```

Las frecuencias de estas oscilaciones están situadas en una banda de frecuencias alrededor de $f_c = 71.4\text{KHz}$.

Si realizamos un zoom en el primer grupo de oscilaciones se puede observar un pico de mayor frecuencia en el instante de disparo, alrededor de la muestra $t = 1820$.

```
>> v = 1:75; u = 1601:2600; Cc1 = abs(Cc(v,u));
```

```
>> surf(u,v,Cc1); shading interp;
```

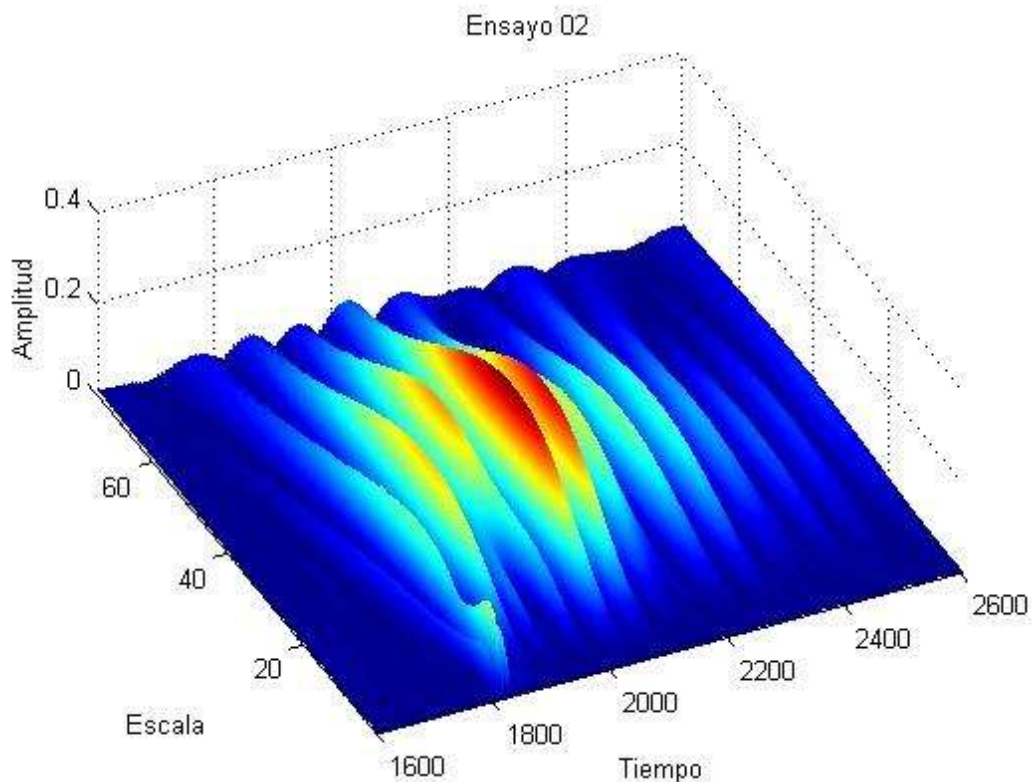


Figura 6: Transformada Wavelet del momento de disparo

Este pico en el dominio de la Transformada Wavelet se encuentra en la escala $s = 5$ y corresponde a una frecuencia de 500KHz:

```
>> scal2frq(5,'mexh',1e-7)
ans =
    500000
```

CONCLUSIONES

Utilizando la Transformada Wavelet Continua se analizaron los datos de las siete mediciones realizadas con distintos estados de carga del transformador: en vacío, con carga inductiva y con carga resistiva. Las conclusiones fueron las siguientes.

En cuanto a la amplitud de las perturbaciones analizadas, los ensayos muestran que no siempre existe una sobretensión, es decir, no siempre se supera el valor nominal de pico de la onda de $V_{ef} = 220V$ eficaces. Este valor pico teóricamente es $\sqrt{2}$ veces el valor eficaz: $V_{pt} = 220V * \sqrt{2} = 311.1V$. Tomando un promedio de los valores pico de los ensayos se obtiene el valor práctico para este caso que fue de $V_p = 316V$. Tomando este valor como referencia, el valor máximo instantáneo de sobretensión alcanzado fue 1.6 veces V_p .

Analizando la duración del régimen transitorio y cuándo desaparecen las componentes de alta frecuencia, éstas se extinguen en el primer milisegundo luego de haber cerrado el interruptor automático de potencia utilizado para conectar el transformador. Si consideramos que es un sistema lineal, todas las conclusiones podrían aplicarse también a la desconexión del transformador, en la apertura del interruptor automático de potencia.

Podría realizarse una división a grandes rasgos en cuatro bandas de frecuencias que aparecen en el transitorio de conexión. Aunque la medición de las escalas que representan los valores de frecuencia se pueden medir con mucha precisión, se realiza esta clasificación porque solamente se pueden cuantificar las componentes que se reflejan en la Transformada Wavelet con una suficiente amplitud. Analizando los tres tipos de carga utilizados en las mediciones, no existe una gran diferencia en las componentes espectrales involucradas.

La primera banda en consideración es entre 3KHz y 9KHz. Aunque esta banda de frecuencias se midió en los ensayos donde la frecuencia de muestreo no superaba los 50KHz y podría pensarse que se trata de un fenómeno de aliasing, también se detectó en el ensayo 08 donde la frecuencia de muestreo llegaba a 100MHz.

La segunda banda de frecuencias encontrada se ubica entre 52KHz y 84KHz con una gran concentración en 72KHz. Estos valores coinciden en parte con mediciones anteriores realizadas sobre el mismo transformador en el año 2001 por el Instituto de Energía y el Instituto para el Estudio del Medio Ambiente de la Facultad de Ingeniería

de la Universidad de Mendoza, donde se midieron frecuencias de 75KHz pero que tenían una duración mayor a partir de la conexión del transformador.

La siguiente banda de frecuencias medida en los ensayos se encuentra entre los 467KHz y los 713KHz con una mayor concentración alrededor de los 500KHz. Al contrario de las otras tres bandas, ésta sólo fue encontrada en los ensayos realizados en vacío.

Por último, la banda de frecuencias más alta se encontró entre 1MHz y 3.12MHz, si bien es muy cercana a la anterior, esta última tiene su mayor concentración en 2.7MHz.

Este trabajo no pretende ser un análisis cuantitativo y exhaustivo del fenómeno de armónicos. Simplemente es la aplicación de una herramienta nueva de análisis que permite obtener una representación espectral y temporal de las perturbaciones en la conexión de transformadores.

BIBLIOGRAFÍA

- Quero José ,Campoy Roberto (2002), “Estudio De Armónicos en el Fenómeno de Conexión de Transformadores a las redes de distribución domiciliaria”, Instituto de Estudios para el Medio Ambiente (IEMA). Universidad de Mendoza (UM)
- Azor, Rubén (2003) “Apuntes de Cátedra de Complementos de Matemática Superior I” Universidad de Mendoza, Argentina.
- Azor, Rubén (1998) “Wavelets con Mathcad” Universidad de Mendoza, Argentina.
- García de Jalón, J.; Rodríguez, J.; Brazález, A. (1999) “Matlab 5.3 como si Estuviera en Primero” Universidad de Navarra, España.
- Kreyszig, Erwin (1970) “Matemáticas Avanzadas para Ingeniería” Editorial Limusa Wiley, México.
- Misiti, M.; Misiti, Y; Oppenheim, G.; Poggi, J. (2002) “Wavelet Toolbox for use with Matlab” The MathWorks, EE.UU.
- Mocchiutti, D. Martín (2004) “Análisis de Armónicos en la Conexión de Transformadores de 13200/380V” Universidad de Mendoza, Argentina.
- Tektronix (1999) “Manual del Usuario. Osciloscopio de Fósforo Digital de la Serie TDS3000” Tektronix, EE.UU.

Sitios Web:

- Facultad de Ingeniería - Universidad de Mendoza
<http://www.um.edu.ar/math/comple.htm>
- El Rincón de MatLab
<http://personal.telefonica.terra.es/web/anarchyco/matlab/>
- The MathWorks España - Wavelet Toolbox
<http://www.mathworks.es/products/wavelet/>
- Software for Time-Frequency Analysis
<http://www-dsp.rice.edu/software/tfa.shtml>