

SISTEMA Y MÉTODO PARA LA DETECCIÓN DE AGUA EN TRANSFORMADORES ELÉCTRICOS

Campo técnico de la invención.

5

La presente invención está relacionada con un sistema y un método para la detección de agua en transformadores eléctricos inmersos en aceite.

Descripción del estado de la técnica.

10

En el estado de la técnica existen diferentes tipos de sistemas y métodos para la detección de agua y/o humedad en transformadores eléctricos inmersos con fluidos dieléctricos, como los divulgados en los documentos patente CA2370174, US5343045y US2760368.

15

El documento CA2370174 se refiere a un aparato de detección de estado para equipos eléctricos que incluye una pluralidad de sensores multiparamétricos distribuidos en el recipiente u otra región llena de fluido. El documento CA2370174 tiene sensores que son capaces de proporcionar datos relacionados con varios parámetros del fluido simultáneamente en diferentes posiciones del fluido. El aparato comprende un equipo

20

eléctrico que puede ser un transformador eléctrico y un dispositivo de adquisición de datos, el equipo eléctrico tiene componentes eléctricos que incluyen un núcleo y bobinas/devanados, un recipiente que rodea los componentes, un radiador en comunicación con el recipiente de contención, un puerto de drenaje y una válvula de sellamiento. El recipiente contiene un fluido F, preferiblemente aceite para enfriar los componentes, los sensores multiparamétricos están en contacto con el fluido F y estos pueden disponerse de forma remota o no remota al fluido F. En el caso donde los sensores se colocan de forma remota, los sensores pueden tener medios de comunicación ópticos o similares. Los sensores son sensores electrónicos y están dispuestos dentro de la región de campo electromagnético. Asimismo, el aparato comprende un dispositivo de adquisición

25

de datos que comprende un bus de datos, un procesador, una entrada y una pantalla. Los sensores están conectados al bus de datos a través de medios de conductores apropiados, por ejemplo, los sensores son electrónicos y producen señales electrónicas, estos conductores pueden extenderse desde los sensores hasta el exterior del equipo. En funcionamiento, los sensores permiten medir la temperatura del fluido y el contenido de

30

varios gases, tales como hidrógeno, acetileno, carbono, monóxido de carbono y etileno, también, permite medir presión, viscosidad del fluido y el ruido generado por el equipo. Así mismo, cualquier parámetro que sea útil para determinar el estado operativo del equipo puede ser detectado por los sensores. El dispositivo de adquisición puede ser local o situado cerca del equipo eléctrico con el objetivo de no tener que parar o apagar el equipo.

35

Por otro lado, el documento patente US5343045 divulga un dispositivo y método para medir el contenido de humedad de un material absorbente en un transformador eléctrico. El dispositivo utiliza una técnica de radiación retrodispersada para determinar la absorción de la luz en longitudes de onda específicas. El documento patente US5343045, divulga un transformador que consiste en una bobina sumergida en aceite en un tanque hermético que tiene en su parte superior un aislante, el transformador está envuelto en un panel aislante. Adicionalmente, una guía de ondas óptica que comprende una sonda acoplado a un extremo de fuente como a un extremo de detección. El extremo está conectado a una fuente de radiación infrarroja y el extremo está conectado ópticamente a un cortador óptico que intercepta la radiación que cae sobre un detector de infrarrojos. El detector está conectado eléctricamente a un dispositivo de visualización que muestra una medición del flujo de radiación emitida desde el extremo de la guía de ondas. El método de uso del dispositivo del documento patente US5343045 funciona inicialmente, sumergiendo el extremo en el tanque, el espaciador se pone en contacto con el papel aislante del transformador, la fuente de luz se activa transmitiendo luz al extremo de la fuente. La luz viaja a través de la fibra óptica hasta el extremo de la sonda donde se emite y golpea el papel aislante, la luz reflejada vuelve a pasar por la sonda propagándose por la fibra óptica. El detector detecta intervalos establecidos por la velocidad de un motor de corte, el flujo de luz retro difundida en las longitudes de onda filtradas que muestra una medición de los respectivos valores de flujo en un osciloscopio, esta información se transmite a un ordenador.

Finalmente, el documento patente US2760368 divulga un dispositivo para medir el contenido de agua y compuestos similares en líquidos aislantes. El dispositivo mide la cantidad de agua, alcoholes, ácido y similares mediante cualquier medidor de humedad relativa o indicador de bulbo húmedo y seco. El dispositivo se basa en el concepto de que la humedad o contenido de ácido de un aceite de hidrocarburo u otro líquido aislante puede expresarse como humedad relativa o como se conoce, impureza relativa. El dispositivo comprende un medidor que incorpora un material celulósico que, entrando en contacto con algún líquido aislante (preferiblemente aceite), no se deforma o cambia sus características. El material se hincha por contacto con el agua o el vapor de agua mantenido en el líquido aislante. Asimismo, el dispositivo comprende un tanque con un transformador eléctrico, un líquido aislante y un calibrador celulósico. El calibrador comprende una espiral metálica que tiene un material absorbente celulósico, la espiral sirve como miembro de soporte para el material. Un extremo de la espiral está conectado a un poste que está unido a un miembro de soporte. El extremo opuesto de la espiral está rígidamente unido a un eje el cual es libre de rotar. Adicionalmente, sobre el eje se dispone de un puntero el cual gira debido a la rotación que sufre el eje a medida que el material celulósico comienza a

hincharse, dando así una lectura de humedad relativa en una escala calibrada. Conociendo la humedad relativa y la temperatura, el contenido de agua real del líquido aislante se puede calcular utilizando tablas que dan el contenido de agua del líquido saturado a la temperatura en la que se toma la lectura.

5

De esta forma, la determinación de agua en los fluidos dieléctricos requiere en general la implementación de sensores o dispositivos dentro del transformador, lo que implica una manipulación de los transformadores ya existentes en la red de distribución. Existe entonces todavía la necesidad de desarrollar sistemas para la detección de agua en transformadores eléctricos tal como están ya instalados en la red, sin requerir ningún dispositivo adicional o modificación dentro del transformador.

Breve descripción de la invención

15 La presente invención busca resolver los problemas de la técnica al proporcionar un sistema y un método para la detección de agua en transformadores eléctricos tal como están instalados en la red de distribución. El sistema comprende una o más antenas para capturar señales de ondas electromagnéticas producidas por el colapso de una burbuja o cúmulo de agua difundida en el interior del fluido del transformador y uno o más radios receptores para filtrar y amplificar las señales capturadas por la antena. El sistema cuenta también con una o más unidades de procesamiento para procesar analizar las señales emitidas por el radio receptor y una o más pantallas de visualización conectadas a las unidades de procesamiento donde la unidad de procesamiento estima y calcula la humedad en el interior del transformador basado en el análisis de las señales capturadas por la antena.

25

En otra modalidad de la invención, se revela aquí un método para detectar agua en transformadores eléctricos implementando en una unidad de procesamiento las etapas que comprenden: a) capturar señales electromagnéticas producidas por el colapso de una burbuja o cúmulo de agua difundida en el interior del fluido del transformador por medio de una antena, b) analizar el espectro de las señales de la etapa a), c) calcular coeficientes de Fourier de las señales analizadas en la etapa b), d) calcular la tasa de radiación de la muestra a partir de los coeficientes de Fourier de la etapa c), e) caracterizar la curva de humedad a partir de la tasa de radiación de la muestra de la etapa d) obteniendo una humedad relativa equivalente y en la f) determinar la cantidad de humedad dentro del transformador como la tasa de humedad equivalente del transformador medido dividido por la humedad equivalente de un transformador seco.

35

Breve descripción de las figuras

- La FIG. 1 corresponde a una realización preferida del sistema de acuerdo a la invención.

Descripción detallada de la invención

5

La presente invención proporciona un sistema y método que permite monitorear la cantidad de agua en un transformador eléctrico que tiene en su interior un fluido dieléctrico, sin tener que modificar el transformador ya instalado dentro de la red de distribución.

10

En una primera realización el sistema de la invención incluye una antena (100) de recepción para recibir la emisión de una ráfaga de microonda electromagnética radiada en una banda de frecuencia proveniente de la oscilación natural de la película de una burbuja de agua al reventar, la cual se encuentra localizada inmersa en líquido dieléctrico. Un radio receptor localiza (110) la banda de frecuencia del oscilador natural cuando la corriente eléctrica pasa a través de la cavidad formada por la burbuja de agua y emite la ráfaga de oscilación de microondas ante la presencia de agua según se determina en el ancho oscilante. La detección de la banda de frecuencia emitida por la cavidad resonante suma proporcionalmente en la medida y cantidad de elementos resonantes, es decir la cantidad de agua medida.

20

En relación con una realización preferida del sistema de la invención y haciendo referencia a la FIG. 1, el sistema comprende:

25

- una o más antenas (100) para capturar señales de ondas electromagnéticas producidas por el colapso de una burbuja o cumulo de agua difundida en el interior del fluido del transformador;
- uno o más radios receptores (110) para filtrar y amplificar las señales capturadas por la antena;
- una o más unidades de procesamiento (120) para analizar las señales emitidas por el radio receptor;
- una o más pantallas de visualización (130) conectadas a las unidades de procesamiento;

30

donde la unidad de procesamiento estima y calcula la humedad en el interior del transformador basado en el análisis de las señales capturadas por la antena.

35

De forma ventajosa el sistema y el método para la detección de agua aquí revelado permitir predecir de manera remota y no invasiva la cantidad de agua localizada en el interior de un transformador eléctrico inmerso en un fluido dieléctrico. De esta manera, es posible

realizar las predicciones sin tener que detener el funcionamiento del transformador eléctrico.

Se entenderá en la presente invención que el sistema y método aquí revelados son un tipo de mantenimiento predictivo los cuales permiten predecir de manera oportuna el tipo de daño que puede tener un transformador eléctrico y predecir la cantidad de componentes en partes por millón que pueda tener el fluido dieléctrico, tales como, agua, carbono, hidrógeno y monóxido de carbono entre otros producidos por las reacciones químicas y termodinámicas entre el devanado de la bobina y el fluido dieléctrico.

El sistema captura las señales de ondas electromagnéticas radiadas por el colapso de una burbuja difundida en el fluido del transformador por medio de una antena (100).

Haciendo referencia a la burbuja que está al interior del transformador, la burbuja colapsa debido a la aceleración del gradiente de temperatura del transformador, es decir, el cambio de presión debido a la dinámica de aceleración (La burbuja intenta por el calor subir hacia la superficie y el cambio de presión la hace colapsar) hace que la burbuja se reviente con ello. Además, en la tensión superficial de la burbuja, hay una aceleración de un haz de electrones con la velocidad de modulación de la molécula del agua en sus tres sentidos de vibración (3 átomos implican 3 grados de libertad) esto modula en tres frecuencias la onda electromagnética radiada.

Del haz de electrones se llega a una segunda fase que muestra la acción acumulativa de muchos conglomerados, de estos cúmulos cada uno de ellos oscila a una nueva frecuencia, entre girando en una ventana capilar a través de una mayor burbuja, las placas capilares dentro del aceite del transformador van girando a una velocidad angular y alimentado por las corrientes parasitas del núcleo (electrones acelerados) hasta reventar la burbuja (por el cambio de presión nuevamente) y genera la condición de microonda acelerada modulada en otro rango de frecuencia, esta, por el efecto magnetrón de las placas del núcleo hacen una demarcación en aquellas que se encuentran concentrada en forma de emulsión dentro del papel aislante.

En conclusión, se desarrollan cinco picos de frecuencia. Al entrar a los devanados estas ráfagas de microondas, producto de las burbujas y las corrientes parasitas del núcleo o de descargas parciales en el aislante del devanado o del aceite, se encuentran con el campo eléctrico del primario del transformador, que acelerará el movimiento en la misma dirección del campo, entregando así su energía a la guía de onda que se presenta a través del buje, mostrándose éste (el buje) en combinación con el conductor que va a la conexión con el sistema de transporte de energía, como un antena $\lambda/4$. Así se produce la onda

electromagnética radiada, la cual tiene una frecuencia de radiación de microonda del orden de los 2.5 GHz. Con ello, se requiere de una antena que genere radios de alcance. Esta antena presenta una estructura de polos, de tal forma que maneje los dos planos tanto para el campo magnético como para el eléctrico, la antena en su conjunto produce una ganancia de 40db (decibeles), es decir, se tiene una antena directiva de media onda.

En una modalidad de la invención, la antena (100) se selecciona entre antenas dipolo, antenas dipolo multi-elemento, antenas Yagi, antenas de panel plano, antenas parabólicas y cualquier antena que permita recibir señales electromagnéticas conocidas por una persona medianamente versada en la materia. Preferiblemente, la antena (100) es una antena directiva tipo Yagi, que capta la señal emitida por el buje del transformador sintonizada a 2.5 GHz y con polo de media onda y ganancia de entre 10 dB a 40 dB.

Las señales capturadas por la antena (100) son dirigidas a un receptor de radio (110) que filtra y amplifica las señales de la antena por medio de un amplificador de microondas con ganancia de entre 10dB a 50dB.

En una modalidad de la invención, el radio receptor (110) se selecciona entre antena receptora, amplificador de radiofrecuencia, receptor de canal o sección de frecuencia intermedia o cualquier radio receptor que permita filtrar y amplificar señales electromagnéticas provenientes de una antena. Preferiblemente, el radio receptor (110) comprende una conexión coaxial conectada a la antena (100) que se enlaza con la unidad de procesamiento (120). Preferiblemente, el radio receptor (110) procesa las señales electromagnéticas por medio de amplificadores con transistores de arseniuro de galio para registrarla de modo digital en el puerto de una unidad de procesamiento (se detallará más adelante).

Las señales filtradas y amplificadas del radio receptor (110) son procesadas por una o más unidades de procesamiento (120) para analizar las señales emitidas por el radio receptor.

En una modalidad de la invención, la unidad de procesamiento (120) es un dispositivo que procesa datos, por ejemplo, microcontroladores, micro procesadores, DSCs (Digital Signal Controller por sus siglas en inglés), FPGAs (Field Programmable Gate Array por sus siglas en inglés), CPLDs (Complex Programmable Logic Device por sus siglas en inglés), ASICs (Application Specific Integrated Circuit por sus siglas en inglés), SoCs (System on Chip por sus siglas en inglés), PSoCs (Programmable System on Chip por sus siglas en inglés), computadores, servidores, tabletas, celulares, celulares inteligentes, generadores de señales y unidades de control conocidas por una persona medianamente versada en la materia y combinaciones de estas

La unidad de procesamiento (120) posterior a que el radio receptor haya procesado las señales y las haya filtrado, son mostradas en una pantalla de visualización (130).

- 5 En una modalidad de la invención, la pantalla de visualización (130) se selecciona entre monitor CRT (por las siglas en inglés de Cathode Ray Tube), pantalla plana, pantalla de cristal líquido LCD (por las siglas en inglés de Liquid Crystal Display), pantalla LCD de matriz activa, pantalla LCD de matriz pasiva, pantallas LED, proyectores de pantallas, TV (4KTV, HDTV, TV de plasma, Smart TV), pantallas OLED (por las siglas en inglés de Organic Light Emitting Diode), pantallas AMOLED (por las siglas en inglés de Active Matrix Organic Light Emitting Diode), Pantallas de puntos cuánticos QD (por las siglas en inglés de Quantic Display), pantallas de segmentos, entre otros dispositivos capaces de mostrar datos a un usuario, conocidos por los expertos en la técnica, y combinaciones de estos.
- 10
- 15 En una realización de la invención, la pantalla de visualización (130) es un dispositivo de Interfaz Humana (HID, por las siglas en inglés de Human Interface Device), puede ser o incluir una unidad de computación de propósito especial programada para ejecutar el método de esta invención que más adelante se detallará.
- 20 La unidad de procesamiento (120) al instante de recibir las señales filtradas y amplificadas y previo a mostrar dichos resultados en una pantalla de visualización (130), la unidad de procesamiento (120) estima y calcula la humedad en el interior del transformador basado en el análisis de las señales capturadas por la antena.
- 25 Así mismo, la unidad de procesamiento (120) interpreta las señales capturadas por la antena y filtradas por el radio receptor entregando un valor cuantitativo de la humedad dentro del transformador.

De igual manera, la unidad de procesamiento (120) comprende una unidad de procesamiento de datos que permite la interpretación de señales recibidas por la antena y el acondicionamiento de las señales electromagnéticas.

30

En una realización de la invención, la unidad de procesamiento (120) implementa un método para detectar agua en transformadores eléctricos que comprende las siguientes etapas:

35

- a) capturar señales electromagnéticas producidas por el colapso de una burbuja o cumulo de agua difundida en el interior del transformador por medio de una antena;

- b) analizar el espectro de las señales de la etapa a);
- c) calcular coeficientes de Fourier de las señales analizadas en la etapa b);
- d) calcular la tasa de radiación (densidad espectral) de la muestra a partir de los coeficientes de Fourier de la etapa c);
- 5 e) caracterizar la curva de humedad a partir de la tasa de radiación de la muestra de la etapa d) obteniendo una humedad relativa equivalente;
- f) determinar la cantidad de agua dentro del transformador como la tasa de la humedad equivalente del transformador medido dividido por la humedad equivalente de un transformador seco.

10

Haciendo referencia a la etapa a), el radio receptor filtra y amplifica las señales electromagnéticas capturadas por la antena en un intervalo de tiempo entre 10 segundos a 30 segundos, este tiempo asegura que las señales contienen suficientes muestras para realizar un análisis espectral. Además, la frecuencia de muestreo debe estar entre 20 kHz a 50 kHz, preferiblemente entre 30 kHz a 450 kHz. Esta etapa permite la extracción de las

15

Posteriormente, la selección es exportada y filtrada lo cual resulta en una serie de tiempo como lo sigue a continuación:

20

$$señal = \{x_1, x_2, x_3, \dots\} \tag{1}$$

Haciendo referencia a la etapa b), esta etapa corresponde al pre-procesamiento de las señales electromagnéticas, específicamente, las señales electromagnéticas capturadas se descomponen en su contenido espectral por medio de un filtro pasabandas de 900 Hz hasta 22 KHz y una ventana de Fourier con una ventana tipo Blackman.

25

Se entenderá en la presente invención que una ventana tipo Blackman es un tipo de filtro utilizado para evitar discontinuidades al analizar fracciones de las señales electromagnéticas capturadas por una antena. Este tipo de ventanas se usa previo a utilizar las transformadas de Fourier.

30

El espectro de la señal medido es obtenido a partir del promedio de los componentes de frecuencias de bloques de la señal, para esto, la señal es dividida en bloques con una cantidad de muestras de entre 10000 datos a 40000 datos, preferiblemente, 32768 datos.

35

La resolución de frecuencia (fr) está definida directamente por la frecuencia de muestreo (fs= 44.1 kHz) y el tamaño de los bloques utilizados en la transformada rápida de Fourier (n= 32768), tal como se describe en la ecuación 2.

$$fr = (fs/2)/(N/2) \quad (2)$$

La resolución en frecuencia es de 1.34 Hz, de esta manera y con esta resolución permite
5 analizar desde la frecuencia fundamental (60hz) hasta altas frecuencias.

Posteriormente en el paso c), para calcular los coeficientes de Fourier, se genera un
ventaneo a cada señal de la etapa b) para calcular su espectro. La ventana Blackman
permite la atenuación de discontinuidades en los límites de los bloques, lo cual permite que
10 el espectro no se vea afectado por ruido en la señal.

Para obtener los componentes de frecuencia de cada bloque, se utiliza el algoritmo de la
transformada rápida de Fourier (FFT). El resultado es el vector o serie de frecuencias que
sigue a continuación:

$$Componentes\ en\ frecuencia\ X = \{X_1, X_2, X_3, \dots, X_N\} \quad (3)$$

Se analiza un ancho de banda que revele los picos de resonancia, además, se analiza el
espectro entre 900 Hz y 22 kHz para un campo magnético dentro de la onda
20 electromagnética radiada. Para limitar el análisis a estas frecuencias, se aplica un filtro
pasabanda con estas frecuencias de corte.

Posterior en la etapa d), se calcula la tasa de radiación de la muestra a partir de los
coeficientes de Fourier. Para esto, es calculada la magnitud de las frecuencias del ancho de
25 banda de interés y el cálculo de la profundidad del lóbulo proporcional a la humedad se
realiza como se explica a continuación:

Dada una serie discreta $X = \{X_1, \dots, X_i, \dots, X_N\}$, el resultado del paso anterior, con N el número
natural que cuenta los elementos de la serie, se construyen nuevas series $y^{(\tau)}$ cuyos términos
30 son promedios de elementos consecutivos de la serie original, sin que haya solapamientos;
 τ corresponde a un factor de escala, que representan los lóbulos medidos.

$$y_j^\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} X_i, \quad 1 \leq j \leq \frac{N}{\tau} \quad (4)$$

35 En la etapa e) se caracteriza la curva de humedad a partir de la tasa de radiación de la
muestra de la etapa d) obteniendo una humedad relativa equivalente.

Luego de haber calculado la profundidad del lóbulo proporcional a la humedad, es necesario relacionar el resultado de la potencia radiada caracterizando el equivalente a 1μW/dB (un micro vatio por dB medido) al sumar todas las potencias se dividirá por la ganancia total equivalente a 50dB, esto muestra la humedad equivalente para una ecuación cuantitativa de la cantidad de agua acumulada en el aceite de los transformadores porque la suma de los módulos es proporcional, es decir, el modelos es completamente lineal. Teniendo en cuenta esto, se ha designado el parámetro “A”, equivalente a la condición de trasformador seco (condiciones óptimas). Así, se proporciona un estimativo de la cantidad de agua dentro del transformador a largo plazo, tal como es requerido, usualmente este parámetro tiene el valor de 0,73.

El presente invento emplea una ecuación (5) que relaciona la humedad ambiente equivalente con la amplitud de la frecuencia de resonancia de la señal de campo electromagnético.

$$H_k = \frac{P_k}{A} \tag{5}$$

Mediante la ecuación (5), para un valor de P_k de 40dB equivale a un valor de 8mW se obtiene una humedad equivalente del trasformador de 0,00109 ppm y para un P_k de 130dB, una humedad equivalente de 3ppm.

Finalmente, en la etapa f), se determina la cantidad de humedad dentro del transformador como la tasa de la humedad equivalente del transformador medido dividido por la humedad equivalente en un transformador seco.

Tomando como base la ecuación (5) con los valores de humedad equivalente, el siguiente paso muestra estos valores como la cantidad de agua, para lo cual, se utiliza una relación de suma proporcional que corresponde a una humedad equivalente total de las sumas de los lóbulos detectados divididos a la equivalente de un transformador seco. Mientras que, una humedad de 20 ppm corresponde a un transformador altamente humedecido y que está fuera de norma (IEC 60814). Utilizando los valores de H_T, la ecuación de la cantidad de agua se describe en la ecuación (6).

$$H_T = \sum_k \frac{P_k}{A} \quad (\text{en ppm ó mg / kg}) \tag{6}$$

De los resultados de las deducciones previas, se emplean las dos ecuaciones (5) y (6) que son implementadas en la unidad de procesamiento. Con esto, se proporciona una forma de

cuantificar la cantidad de agua en ppm (partes por millón) de los transformadores inmersos en fluidos dieléctricos a través del método ya descrito.

Se entenderá en la presente invención que la norma IEC 60814, corresponde a una norma relacionada a la determinación de agua mediante la valoración cuolométrica automática, es decir, describe métodos para la determinación de agua en líquidos aislantes y en asilamiento celulósico impregnado de aceite con reactivos generados cuolometricamente.

En una modalidad de la invención, el sistema de la presente invención muestra el resultado de la cantidad de humedad calculada para el transformador mediante la pantalla de visualización (130).

Ejemplo. Método para la detección de agua en un transformador eléctrico.

Se determinó la cantidad de agua en ppm (partes por millón o mg/kg) para un transformador de distribución.

Para esto, las características específicas del transformador empleado se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 1 Registro del Transformador bajo prueba

Características del transformador a ensayar							
Hora inicio:	12:09 pm	Monofásico Trifásico	Monofásico	Potencia nominal	10 kVA	Corriente nominal BT	62,5 A
Hora final:	05:00 pm	Código Transformador	17640TR1	Tensión nominal AT	13,2 kV		
Rural - Urbano		Rural	Tensión nominal BT		120/240 V	Método de carga	Simulada Espalda-Espalda
Temperatura mínima [°C]		68,00	Temperatura máxima [°C]	95,70	Temperatura promedio [°C]		88,50

El sistema se instaló cerca del transformador eléctrico con las anteriores características descritas, y se tomaron una cantidad de muestras de señales con las que se generaron relaciones según su tiempo de exposición. Los valores de la densidad espectral son las siguientes:

Valores	Decibelios (dB)	KHz
1	21.66 dB	3.9 kHz
2	34.60 dB	7.8 KHz
3	37.52 dB	11.7 kHz
4	44.36 dB	15.6 kHz
5	45.44 dB	19.5 kHz

Los anteriores valores, permitieron mostrar el comportamiento de la señal del campo magnético donde incrementa la magnitud del espectro en un grupo de frecuencia que muestra el nivel de los grados de libertad de las moléculas de agua involucradas.

5

Ahora bien, al haber identificado los parámetros que revelan la presencia de agua en el transformador, se describió el cálculo de la cantidad de agua específica a partir de la potencia electromagnética medida de las señales de campo magnético radiadas por el transformador.

10

El cálculo de la humedad de las señales de campo electromagnético medidas con el método, objeto de esta invención, se realizó a partir de cada uno de los pasos del método anteriormente descrito. Cada uno de los pasos del método tal como se describió en el detalle de la invención, arroja los siguientes resultados, retomando y ampliado los detalles

15

descritos:

Tasa de radiación de la muestra TRM: tomado del teorema de poynting, la potencia medida, despreciando las perdidas por efecto joule, sería expresada por la ecuación (1):

$$TRM = \frac{1}{V} \int_{muestra} \frac{\sigma(r)|A(r)|}{\lambda(r)} dr$$

donde :

20

A(r) es la irradiancia. (1)

σ(r) es la superficie.

λ(r) es la longitud de onda.

V es el volumen.

Ahora bien, considerando que esto fue lo que se midió como potencia de entrada.

Nótese que TMR puede ser representado de manera discreta por los componentes de las frecuencias de la irradiación y la longitud de onda así:

25

$$TMR = \frac{1}{L} \sum_i \frac{A_i}{\lambda_i}$$

$L = \text{Altura}$

$A_i = \text{irradiancia a la frecuencia } i$

$\lambda_i = \text{longitud de onda}$

(2)

Tenemos lo siguiente:

Densidad volumétrica del agua $\rho = 1 \text{ kg/cm}^3$

5

$$\rho = \frac{m}{AL}$$

(3)

Desde el punto de vista eléctrico

$$10 \quad |Z| = \sqrt{R^2 + X^2} = \rho_e \frac{L}{A} \quad (4)$$

Luego:

$$m = \frac{\rho_e L^2}{|Z|} \quad (5)$$

Donde:

15 L es la longitud del transformador

A es el área transversal del transformador

Z es la impedancia del transformador

ρ_e es la resistividad eléctrica

20 La potencia irradiada la podemos expresar como:

$$TRM = P = I^2 Z = \frac{V^2}{Z}$$

$$m = \rho_e \left(\frac{L^2}{Z} \right)$$

$\rho_e = \text{resistividad volumetrica del aceite} = kte. \quad (6)$

$L = \text{altura del transormador}$

Total de Agua en el transformador = TTW

Esto permite inferir que la potencia emitida por el transformador es proporcional a la

25 cantidad de agua.

$$TTW = Kg = \rho_e \left(\frac{L^2}{Z} \right) = \rho_e \left(\frac{PL^2}{V^2} \right) \quad (7)$$

De esta forma el cálculo numérico para el trasformador empleado es:

$$dB = 10 \log_{10} \left(\left| X(\omega) \right|^2 \right) \Rightarrow \left| X(\omega) \right|^2 = \text{Potencia de la señal} \tag{7}$$

$$\left| X(\omega) \right|^2 = 10^{(db/10)} \tag{8}$$

5 Por lo tanto, de las señales capturadas, los cálculos de la densidad espectral de potencia de las señales son:

1. -21.66 dB => 3.9 kHz => $\left| X(\omega) \right|^2 = 10^{(-21.66/10)} = 6.8234 \text{ mW}$
2. -34.60 dB => 7.8 kHz => $\left| X(\omega) \right|^2 = 10^{(-34.60/10)} = 0.3467 \text{ mW}$
- 10 3. -37.52 dB => 11.7 kHz => $\left| X(\omega) \right|^2 = 10^{(-37.52/10)} = 0.1770 \text{ mW}$
4. -44.36 dB => 15.6 kHz => $\left| X(\omega) \right|^2 = 10^{(-44.36/10)} = 0.0366 \text{ mW}$
5. -45.44 dB => 19.5 kHz => $\left| X(\omega) \right|^2 = 10^{(-45.44/10)} = 0.0286 \text{ mW}$

Para un total de:

15 $50dB = 20\log_{10} (\text{Ganancia}) \rightarrow 316.22$

$TRM = (6.8234 + 0.3467 + 0.1770 + 0.0366 + 0.0286) / 316.22 = 23.4mW$

20 Los 50 dB (magnitud de la señal) hablan de la ganancia del amplificador que es de 316.22.

El Transformador nuevo considerando tres grados de libertad de la molécula de agua y basados en la norma límite de 20ppm.

Figura 2.5. Modos normales de vibración de la molécula de H₂O. La molécula de agua tiene 9 grados de libertad, 3 de traslación, 3 de rotación y 3 de vibración. Al ser angular, tiene un modo más de rotación y uno menos de vibración que la molécula lineal de CO₂. Dos de los modos de vibración son de *tensión* y el otro de *flexión*. Todos son activos en IR y Raman.

Moléculas lineales, D _{∞h} (ejemplo: CO ₂ gas)				Moléculas angulares, C _{2v} (ejemplo: H ₂ O líquida)			
Vibración	Simetría	Actividad	ν(cm ⁻¹) (*)	Vibración	Simetría	Actividad	ν(cm ⁻¹) (*)
ν ₁ (tensión)	Σ ⁺ _g	Raman	1388, 1285 (**)	ν ₁ (tensión)	A ₁	IR y Raman	3450
ν _{2a} (flexión)	Π _u	IR	667	ν ₂ (flexión)	A ₁	IR y Raman	1640
ν _{2b} (flexión)				(***)			
ν ₃ (tensión)	Σ ⁺ _u	IR	2349	ν ₃ (tensión)	B ₂	IR y Raman	3615

* En espectroscopía vibracional, la posición de las bandas suele darse en números de onda por cm. El rango más habitual de registro es entre 4000 y 400 cm⁻¹ (IR medio), aunque también hay absorciones a frecuencias mayores (IR lejano) o menores (IR cercano).

** Posibilidad debida a la resonancia de Fermi

Tabla tomada del texto de espectroscopia vibracional – Universidad de Alcalá (Alcalá, 1995)¹

¹ <http://www3.uah.es/edejesus/copyright.htm>

$$TRM = \left(250lts \left(\frac{0.00005}{3450} \right) 370 / lts + 250lts \left(\frac{0.00003}{1650} \right) 370 / lts + \right. \\ \left. + 250lts \left(\frac{0.00001}{3615} \right) 370 / lts = 0.00134 + 0.00168 + 0.000255 \right) \\ = 3,27mW$$

Las relaciones obtenidas en estas ecuaciones muestran un comportamiento con un valor
5 máximo de radiación a evento de tener 20ppm de 3,27 milivatios

El Valor estimado por la correlación con el espectro de medida. Permite presentar la
siguiente expresión con marco comparativo a transformador nuevo.

$$10 \quad \text{Canditades a transformador ideal} = \frac{23.4mW \frac{\cancel{L^2}}{\cancel{V^2}}}{3.27mW \frac{\cancel{L^2}}{\cancel{V^2}}} = 7.155$$

Resistividad del agua es de $0.1\Omega m$ y la del aceite $10^{12} \Omega m$

Entonces:

$$TTW = mg / Kg = \rho_e \left(\frac{L^2}{Z} \right) = \rho_e \left(\frac{PL^2}{V^2} \right) = 10^9 \left(\frac{23.4mW(0,81)}{(13.2kV)^2} \right) = 1435.90$$

En consecuencia, la cantidad de agua en partes por millón para el transformador de 10kV
15 objeto de este experimento es de 1435.90 ppm. Se tomó como longitud la altura del tanque de 90cm.

Se debe entender que la presente invención no se halla limitada a las modalidades descritas
e ilustradas, ni limitadas a sistema y métodos para la detección de agua en transformadores
20 eléctricos inmersos en aceite, pues como será evidente para una persona versada en el arte,
existen variaciones y modificaciones posibles que no se apartan del espíritu de la invención,
el cual solo se encuentra definido por las siguientes reivindicaciones.

RESUMEN

La presente invención corresponde a un sistema y un método para la detección de agua en transformadores eléctricos tal como están instalados en la red de distribución. El sistema comprende una o más antenas para capturar señales de ondas electromagnéticas producidas por el colapso de una burbuja o cúmulo de agua difundida en el interior del fluido del transformador y uno o más radios receptores para filtrar y amplificar las señales capturadas por la antena. El sistema cuenta también, con una o más unidades de procesamiento para procesar las señales emitidas por el radio receptor y una o más pantallas de visualización conectadas a las unidades de procesamiento donde la unidad de procesamiento estima y calcula la humedad en el interior del transformador basado en el análisis de las señales capturadas por la antena.

En otra modalidad de la invención, se revela aquí a un método para detectar agua en transformadores eléctricos implementando en una unidad de procesamiento las etapas que comprenden: a) capturar señales electromagnéticas producidas por el colapso de una burbuja o cúmulo de agua difundida en el interior del fluido del transformador por medio de una antena, b) analizar el espectro de las señales de la etapa a), c) calcular coeficientes de Fourier de las señales analizadas en la etapa b), d) calcular la tasa de radiación de la muestra a partir de los coeficientes de Fourier de la etapa c), e) caracterizar la curva de humedad a partir de la tasa de radiación de la muestra de la etapa d) obteniendo una humedad relativa equivalente y en la f) determinar la cantidad de humedad dentro del transformador como la tasa de humedad equivalente del transformador medido dividido por la humedad equivalente de un transformador seco.