



APLICACIONES INDUSTRIALES

Análisis de gases disueltos para monitoreo y diagnóstico de transformadores de fuerza en servicio

Dissolved gas analysis for monitoring and power transformers in service diagnosis

Gustavo – Crespo Sánchez

Recibido: febrero de 2014

Aprobado: diciembre de 2014

Resumen/ Abstract

La primera señal de existencia de problemas en transformadores de fuerza es la detección de gases que se generan en el aceite como resultado de los fenómenos térmicos y eléctricos a que están permanentemente sometidos; que degradan el aislamiento y ocasionan fallas incipientes que, si no se detectan a tiempo, pueden devenir en defectos mayores y costosos. El artículo trata sobre el análisis de estos gases, como uno de los métodos más utilizados para el diagnóstico de fallas, en correspondencia con las concentraciones individuales y las relaciones entre esas concentraciones, permitiendo determinar el estado del transformador y reducir los índices de falla. Hace un recorrido completo de los gases generados y de los posibles diagnósticos asociados. Presenta resultados de la aplicación de esta técnica en la Empresa de Construcciones de la Industria Eléctrica (ECIE) Cienfuegos, a partir de las mediciones obtenidas con el medidor portátil *Transport X* (KELMANLTD).

Palabras clave: análisis de gases disueltos, diagnóstico de transformadores, fallas incipientes, monitoreo, métodos para el diagnóstico de fallas.

The first sign of the existence of problems in power transformers is the detection of gases generated in oil as a result of thermal and electrical stresses that are permanently subject, which degrade the insulation and cause incipient failures which if not detected in time can become costly and larger faults. The article deals with the analysis of these gases as one of the most used methods for the diagnosis of faults in correspondence with the individual concentrations and the relationships between those concentrations that allow determining the status of the transformer and reduce failure rates. A complete tour of the gases and the possible associated diagnoses with them is done. Presents results of the application of this technique in Building Company of Electrical Industry (BCEI) Cienfuegos, from the measurements obtained with the portable meter *Transport X* (KELMAN LTD).

Key Words: dissolved gas analysis, incipient failures, monitoring, transformer diagnosis, methods for the diagnosis of faults.

INTRODUCCIÓN

En el Sistema Electroenergético Nacional, los transformadores de fuerza son elementos vitales, por su significación y por sus costos. El aumento de las potencias, la elevación de las tensiones eléctricas y las necesidades de transmitir potencia a distancias cada vez mayores convierten a los transformadores en equipos eléctricos de la mayor importancia. En el mundo, las estadísticas de fallas en transformadores de fuerza indican que el 41 % de estas, están relacionadas con el cambiador de derivaciones; el 19 % con los devanados; el 3 % con el núcleo; el 12 % con los bushings; el 13 % con el tanque y los fluidos y el 12 % con los accesorios [1]. En Cuba, las estadísticas de fallas típicas para transformadores del Sistema Electroenergético Nacional muestra que los puntos principales de falla y,

por tanto, los que deben ser monitoreados con máxima prioridad son los devanados y los cambiadores de derivaciones, en los casos en que estos existen, siendo el punto débil, el aislamiento [2].

La Empresa de Construcciones de la Industria Eléctrica (ECIE) Cienfuegos tiene establecido un programa de diagnóstico y mantenimiento predictivo, para garantizar la operación confiable de los transformadores.

La detección de algunos tipos de fallas o eventos como por ejemplo arcos eléctricos en las guías; falsos contactos, descargas parciales, u otra y su localización constituían un problema anteriormente. Actualmente, la información obtenida de un sistema de adquisición de datos, con el monitoreo, permite detectar fallas tanto de rápido, como de lento desarrollo, lo que supera los métodos convencionales de las pruebas eléctricas realizadas sólo con el equipo fuera de servicio, que no pueden detectar las fallas de rápido desarrollo, por estar basados en mediciones espaciadas en el tiempo [3].

El objetivo que motivó la investigación consistió en realizar diagnósticos a partir de las concentraciones individuales de los gases disueltos en el aceite dieléctrico de los transformadores y las relaciones entre sus concentraciones, para evaluar el estado de los mismos en la ECIE Cienfuegos y poder reducir los índices de fallas con la detección y eliminación a tiempo de fallas incipientes y de lento desarrollo.

El desarrollo del artículo se estructura de la siguiente manera: Primeramente se describen los gases típicos que se generan durante las fallas en los transformadores de fuerza, y los diagnósticos asociados a ellos a partir de las concentraciones individuales y las relaciones entre ellos. Seguidamente se explica los análisis y los diagnósticos en la ECIE Cienfuegos, se muestran los resultados del estado de los transformadores y se formulan las conclusiones.

MATERIALES Y MÉTODOS

ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS

El propósito de este análisis es conocer exactamente las diferentes sustancias que componen los gases disueltos en el aceite extraído del transformador. Para ello se utiliza el medidor portátil de gases disueltos "Transport X". De acuerdo a la naturaleza de los gases disueltos en el aceite aislante, se puede determinar la causa de la anomalía y solucionarla antes que se convierta en una falla.

Cuando el transformador se somete a esfuerzos térmicos y eléctricos anormales, debido a la degradación del aceite y de los materiales aislantes, se generan ciertos gases combustibles. El tipo y las concentraciones de gases generados son importantes, por cuanto el proceso de envejecimiento normal produce cantidades extremadamente pequeñas de gases, mientras que condiciones incipientes o fallas declaradas generan cantidades grandes. Los gases típicos generados por algunas fallas incipientes en transformadores de fuerza son: Hidrógeno (H_2), Oxígeno (O_2), Nitrógeno (N_2), Metano (CH_4) Monóxido de carbono (CO), Etano (C_2H_6), Dióxido de carbono (CO_2), Etileno (C_2H_4) y Acetileno (C_2H_2) [4]. El Hidrógeno, Metano, Monóxido de carbono, Etano, Etileno y Acetileno son gases combustibles. Cuando se detectan gases en cantidad suficiente como para suponer la existencia de una falla, es necesario conocer la severidad de ella, lo cual se determina en base a la tasa de crecimiento por día de cada gas en particular, o del total de gases combustibles disueltos en el aceite.

Los mecanismos de falla más comunes son: Arcos eléctricos en el aceite y en el aislamiento sólido; Corona, Descargas eléctricas de baja energía en el aislamiento sólido y Sobrecalentamiento general o puntos calientes.

IDENTIFICACIÓN DE LA FALLA CON LA AYUDA DEL ANÁLISIS DE GASES DISUELTOS

La detección de una condición anormal requiere de una evaluación de la concentración del gas generado y de la tendencia de generación. La cantidad de cada gas, con respecto al volumen total de la muestra, indica el tipo de falla que está en proceso [5,6].

Existen dos maneras de representar los resultados de gases disueltos: A partir de las concentraciones individuales y por las relaciones entre gases.

Acetileno

La presencia del acetileno en los gases disueltos en el aceite siempre se debe a una falla eléctrica. Si el acetileno está acompañado solamente de CH_4 y de H_2 , se trata de arco eléctrico de duración limitada en el aceite. Si estos elementos son acompañados de CO y CO_2 , este arco eléctrico implica o compromete el aislamiento sólido. Si esos mismos elementos (C_2H_2 ; CH_4 y H_2) sin CO ni CO_2 son acompañados de C_2H_6 , C_3H_8 , C_2H_4 y C_3H_6 , significa que existen descargas parciales fuertes o arcos eléctricos en el aceite. Si, además se observa CO , significa que las descargas se producen en un aislamiento sólido.

Etileno

Si los productos de degradación contienen C_2H_4 (sin C_2H_2) se trata siempre de una degradación térmica. Si no hay CO_2 , en el punto caliente no interviene el aislamiento sólido. La temperatura de esta falla será superior o inferior a $500^\circ C$, según sea mayor la cantidad de C_2H_4 o de CH_4 respectivamente, entre los productos detectados. En general están acompañados de H_2 , C_2H_6 , C_3H_8 y C_3H_6 . Cuando, además de estos compuestos (H_2 , C_2H_6 , C_3H_8 y C_3H_6), se constata la presencia de CO_2 , y eventualmente de CO , la falla consiste en un punto caliente de temperatura igual o superior a $130^\circ C$. Mientras no se alcance $300^\circ C$ la relación CO/CO_2 permanece en el orden de 0,1.

Dióxido de Carbono

En ausencia de C_2H_2 y del C_2H_4 , el CO_2 , solo acompañado de un poco de CO o de CH_4 , es característico de un envejecimiento térmico normal del papel. Cuando predomina el H_2 y los hidrocarburos saturados, tales como C_2H_6 , C_3H_8 y C_3H_6 , con una relación CO/CO_2 superior a 0,1, se trata de la existencia de pequeñas descargas parciales en el aislamiento sólido.

Hidrógeno

La presencia de H_2 , solo acompañado eventualmente de una cantidad de CH_4 se debe a descargas parciales, ya sea en el aislamiento, en la superficie libre de aceite, o bien, es la primera manifestación de una falla eléctrica más grave.

Compuestos del aire (O_2 , N_2)

En el caso de fallas en el relé bucholz o de gas, puede ser que el gas extraído de este contenga o_2 y n_2 . Si la proporción o_2 , n_2 es similar a la del aire, se puede tratar de una entrada de aire. Si la proporción de o_2 es mucho menor que la del aire, esto puede deberse a un punto caliente de temperatura superior a $100^\circ c$.

Ambigüedad de ciertos diagnósticos

Es frecuente que un transformador en servicio presente dos fallas simultáneas o, simplemente, una falla superpuesta al envejecimiento térmico normal. Para discernir la incertidumbre pueden utilizarse algunos criterios: Una relación $CO/CO_2 > 0,1$ debe ser siempre considerado como índice de descarga eléctrica que compromete el aislamiento. Desgraciadamente, se trata de una codificación necesaria pero no suficiente. Una ambigüedad típica proviene de la superposición de una pequeña falla térmica con pequeñas descargas parciales en el aislamiento sólido; en este caso, aparece C_2H_4 sin C_2H_2 y el diagnóstico que se da es "*punto caliente en el aislamiento sólido*", lo que es cierto, pero se ignora la existencia de descargas parciales en el aislamiento sólido. Si en este caso la relación $CO/CO_2 > 0,1$, debe suponerse la superposición de estos dos efectos; igualmente una relación $C_2H_6/C_2H_4 > 1$ indica siempre descargas parciales. En la tabla 1, se resumen los posibles diagnósticos a partir de los gases de degradación.

La tabla 2, muestra los límites de las concentraciones de gases disueltos en el aceite consideradas seguras [5] y las que facilita el equipo medidor portátil Transport X en sus prestaciones, las cuales incluyen dos rangos: Precaución y Peligro.

El medidor portátil de gases disueltos Transport X muestra las concentraciones calculadas y brinda la posibilidad de ver los límites preestablecidos según el criterio utilizado por el fabricante; además, da acceso a las técnicas adicionales para el diagnóstico (figura 1, figura 2).

Tabla 1. Posibles diagnósticos a partir de los gases disueltos como resultado de la degradación.	
Productos de la degradación	Diagnóstico posible
Presencia del acetileno.	Falla eléctrica
C ₂ H ₂ acompañado solamente de CH ₄ y de H ₂ .	Arco eléctrico de duración limitada en el aceite.
C ₂ H ₂ , CH ₄ e H ₂ , acompañados de CO y CO ₂	Este arco eléctrico compromete el aislamiento sólido.
C ₂ H ₂ , CH ₄ e H ₂ , sin CO ni CO ₂ pero acompañados de C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , C ₂ H ₄ y C ₃ H ₆	Descargas parciales fuertes o arcos eléctricos en el aceite.
C ₂ H ₂ , CH ₄ e H ₂ , sin CO ₂ acompañados de C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , C ₂ H ₄ y C ₃ H ₆ y, además, se observa CO.	Las descargas parciales se producen en un aislamiento sólido. (Si las descargas parciales son realmente de gran magnitud, los hidrocarburos no saturados, predominan sobre los saturados) En el caso de pequeñas descargas parciales, estas son más erosionantes para el aislamiento sólido cuanto más grande es la relación CO/CO ₂ .
C ₂ H ₄ + CH ₄ + H ₂ + Hidrocarburos saturados (C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , C ₃ H ₆).	Puntos Calientes en el aceite. <500°C predomina el CH ₄ . >500°C predomina el C ₂ H ₄ (a veces pequeñas cantidades de C ₂ H ₂)
C ₂ H ₄ + CH ₄ + H ₂ + Hidrocarburos saturados (C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ , C ₃ H ₆).+ CO + CO ₂ .	>130°C predomina el CO ₂ .
Dióxido de carbono CO ₂ ; CO ₂ + CH ₄ ; CO ₂ + CO	Envejecimiento térmico normal del papel.
Predominio del H ₂ + Hidrocarburos saturados (C ₂ H ₆ , C ₃ H ₈ y C ₃ H ₆); CO + CO ₂ (CO/CO ₂ >0,1)	Pequeñas descargas parciales que erosionan por largo tiempo el aislamiento sólido (Papel impregnado)
H ₂	Pequeñas descargas parciales (Gasificación del aceite).
H ₂ + CH ₄	Primera manifestación de una falla eléctrica más grave.
N ₂ + O ₂	Introducción de aire (Si la proporción de O ₂ , N ₂ es similar a la del aire)

Tabla 2. Concentraciones límites seguras en ppm de gases disueltos en aceite.			
Gases	Fórmula	ppm límite	ppm límite en el Transport X (precaución/peligro)
Hidrógeno	H ₂	20 x N + 50	100/700
Metano	CH ₄	20 x N + 50	120/400
Etano	C ₂ H ₆	20 x N + 50	65/100
Etileno	C ₂ H ₄	20 x N + 50	50/100
Acetileno	C ₂ H ₂	5 x N + 10	2/5
Monóxido de carbono	CO	25 x N + 500	350/570
Anhídrido carbónico	CO ₂	100 x N + 1500	2500/4000
Total de Gases Combustibles	TGC	110 x N + 710	700/1900
N: Número de años en servicio.			

Resultados			KELMAN
Gas	Abrev.	Concentrac (ppm)	
Hidrógeno	H2	<5	Condiciones de los gases
Dióxido de Carbono	CO2	871	
Monóxido de Carbono	CO	<1	
Etileno	C2H4	10	Normal
Etano	C2H6	5	Precaución
Metano	CH4	6	Advertencia
Acetileno	C2H2	<0.5	Condición del Transformador
TGCD		25	
Las condiciones de los gases se basan en los límites establecidos por el usuario			Normal
			Ver Límites
			Diagnóst.

Fig. 1. Ejemplo de los resultados mostrados por el medidor de gases portátil Transport X(KELMAN).

Límites de Concentraciones de Gases				KELMAN
Gas	Abrev.	Precaución	Advertencia	
Hidrógeno	H2	100	700	
Dióxido de Carbono	CO2	2500	4000	
Monóxido de Carbono	CO	350	570	
Etileno	C2H4	50	100	
Etano	C2H6	65	100	
Metano	CH4	120	400	
Acetileno	C2H2	2	5	
TGCD		700	1900	

Fig. 2. Límites de las concentraciones de gases prefijados por el Transport X.

Una vez realizado el análisis con el Transport X se utilizan varias técnicas adicionales para diagnosticar la condición del transformador: Triángulo de Duval [7] y Patrones de Diagnóstico, que utilizan las concentraciones individuales, el Método de Dörnenburg [8] y el de Rogers [9], que utilizan las relaciones entre gases [(C₂H₂/C₂H₄); (CH₄/H₂); (C₂H₂/C₂H₆) y CO₂/CO].

El equipo brinda cuatro posibilidades de diagnósticos adicionales (figura 3): Key Gas, que según la norma IEEE C-57-104-1991 selecciona el gas principal y muestra -según su contenido- el diagnóstico; Relaciones de Rogers, también basado en la norma IEEE C-57-104-1991, que brinda las relaciones entre gases [CH₄/CH₂ (R₁); C₂H₂/C₂H₄ (R₂); C₂H₄/C₂H₆ (R₅); C₂H₆/CH₄ y CO₂/CO] e indica el caso Rogers seleccionado con su correspondiente diagnóstico; Triángulo de Michel Duval, que muestra sus zonas predeterminadas, ubicando en el diagnóstico del transformador y ETRA (Asociación de Investigaciones Tecnológicas de Japón), que a través de dos algoritmos facilita el patrón de gas [compara el patrón medido con uno similar de la herramienta y brinda entonces el diagnóstico] y muestra dos diagramas de diagnóstico [A: (C₂H₂/C₂H₄ contra C₂H₄/C₂H₆) y B: (C₂H₂/C₂H₆ contra C₂H₄/C₂H₆)], ubicando en ellos la condición del transformador.

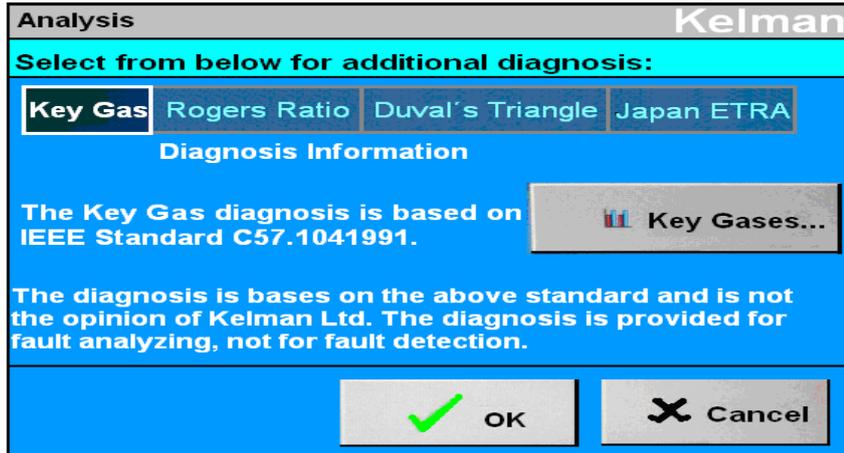


Fig. 3. Herramientas de análisis del Transport X para el diagnóstico del transformador.

El medidor portátil de gases disueltos Transport X brinda cuatro posibilidades de diagnósticos adicionales: Gases Claves; Relaciones de Rogers; Triángulo de Duval y ETRA. La tabla 3, muestra un ejemplo de cómo imprime los resultados el equipo de medición.

Tabla 3. Posibles diagnósticos a partir de los gases disueltos como resultado de la degradación.		
Kelman 		
Kelman Ltd. TRANSPORT X		
DGA Results.		
Type: Transformer		
Equipment ID: 094 1856		
Location: T – 12 SE C.M. C. Cfgos.		
Manufacturer: Skoda. Checoslovaquia.		
Sampling Pt: Fondo del Tanque.		
Sample source: Oil Sample.		
Date: 08 Feb 11 10:58 A.M.		
Hydrogen	H ₂	296
Water.	H ₂ O	52
Carbon Dioxide	CO ₂	2531
Carbon Monoxide	CO	335
Ethylene	C ₂ H ₄	204
Ethane	C ₂ H ₆	651
Methane	CH ₄	127
Acetylene	C ₂ H ₂	<0.5
TDCG	1613	
Comment: Segunda Prueba 08/02/2011		
Diagnosis tools:		
Key Gas: Noneslected.		

Tabla 3 continuación.
<p>Rogers 3: No Fault. Duval's Triangle: Thermal Fault (>700°C) Japan ETRA Diagram: Not Diagnosis available. Transformer condition: Warning. Caution gases: Hydrogen: > 1000 Carbon Dioxide: > 2500. Methane: > 120. TDCG: > 700. Warning Gases: Ethylene: > 100. Ethane: > 100.</p>

Finalmente, el equipo trae un software asociado: "Perception", al que se le pueden introducir los datos desde el equipo de medición, a través de una interfaz con puerto USB. Este programa realiza un análisis completo, a partir de las concentraciones de gases encontradas y da seguimiento a los incrementos de gases disueltos en las diferentes pruebas realizadas en determinados períodos de tiempo. Entonces, con las consideraciones anteriores, brinda el diagnóstico y ofrece recomendaciones de cómo proceder. La tabla 4, muestra un ejemplo del informe que emite el software.

Tabla 4. Ejemplo del informe de diagnóstico brindado por el software "Perception".
Informe de diagnóstico
10/02/2011
Informe sobre el análisis del equipo T-12 SE C.M.C. Cfgos/094 1856 TRN, Aceite. Transformador sellado, Tensión Primaria 11000V, BIL (kV) notspecified)
ANÁLISIS DE LOS GASES COMBUSTIBLES
Gases combustibles con registros históricos.
<Verificación de las concentraciones de gases>
** Hidrógeno H ₂ (296.00) Desviación elevada. ** Metano CH ₄ (127.00) Desviación elevada. ** Etileno C ₂ H ₄ . Desviación elevada. ** Etano C ₂ H ₆ . Desviación elevada. ** CTGC (16213) Desviación elevada.. < Análisis según el método de DUVAL>.
** Punto de calentamiento entre 200 y 400 grados Celsius. < Análisis según el método de ROGERS>.
** Defecto térmico a una temperatura moderada entre 100 y 200 grados Celsius. <Análisis de la degradación térmica del papel según la relación CO ₂ /CO>.
**Posibilidad de degradación térmica del papel. <Verificación de la concentración de agua disuelta y de la humedad.....>.
** Agua elevada (52.0 ppm)
->Tratamiento posible: Drenar el agua, enjuagar y filtrar o reemplazar el aceite.
El período cubierto es del 08/02/2011 10:58 al 26/01/2011 13:46:05

RESULTADOS

Luego de realizadas las mediciones de las concentraciones de gases disueltos a diecisiete transformadores, utilizando el medidor portátil Transport X, aprovechando todas sus prestaciones y considerando los criterios y métodos para realizar los diagnósticos, se llegaron a los resultados que muestran las tablas 5 y 6

Indicadores	Cantidad
Cantidad de análisis realizados.	17
Diagnósticos obtenidos.	15
Diagnósticos no obtenidos.	2
Diagnósticos correctos.	14
Diagnósticos incorrectos.	1
Porcentaje de diagnósticos logrados.	88,28%
Porcentaje de diagnósticos acertados.	93,33%

Tipo de Falla	Diagnóstico	Transformadores diagnosticados.
No hay Falla (F1)	Envejecimiento normal.	8
Falla Eléctrica (F2)	Descargas parciales de baja energía.	1
Falla Eléctrica (F2)	Descargas parciales de Baja energía con arcos eléctricos continuos.	
Falla Térmica (F3)	Sobrecalentamientos a temperaturas inferiores a 150°C	2
Falla Térmica (F3)	Sobrecalentamientos en el rango de temperatura de entre 150°C y 300°C	1
Falla Térmica (F4)	Sobrecalentamientos en el rango de temperatura de entre 300°C y 700°C	2
Falla Térmica (F4)	Sobrecalentamientos a temperaturas superiores a 700°C	
Falla Eléctrica (F5)	Descargas parciales de alta energía.	
Falla Eléctrica (F5)	Descargas parciales de alta energía repetitivas. Ruptura del aceite por arcos eléctricos entre devanados o bobinas o entre bobinas y tierra.	1
	Diagnóstico no disponible.	2
	Sin diagnóstico.	

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Luego de la obtención de los datos de los gases disueltos, los análisis posteriores requieren la presencia de expertos en el tema para determinar con exactitud la condición del transformador. Por otra parte, la interpretación de los datos obtenidos depende en gran medida de las habilidades de interpretación de los especialistas. De tal manera, se mantiene vigente la aspiración de encontrar un método más confiable para diagnosticar las fallas en transformadores, en el que no haya diagnósticos incorrectos, en el que se pueda discernir la existencia de múltiples fallas y en el que se eliminen los casos en que sea imposible hacer un diagnóstico.

De los 17 transformadores analizados se lograron 15 diagnósticos, para un 88,28 %. En todos los casos diagnosticados, se pudo discernir entre el envejecimiento normal y la presencia de fallas incipientes o de lento desarrollo, que permitieron eliminarlas a tiempo y contribuir a la reducción de los índices de falla en transformadores de fuerza en la ECIE Cienfuegos.

Los métodos tradicionales de análisis de gases disueltos, han estado caracterizados por las limitaciones en la exactitud de la aplicación del diagnóstico. Los sistemas de Diagnóstico de Fallas en Transformadores utilizando Inteligencia Artificial son procedimientos que se amplían gradualmente. En la década del 2001-2010, hubo una extensa investigación sobre el empleo de la inteligencia artificial para apoyar los Análisis de Gases Disueltos (AGD). Estas investigaciones incluyen el acercamiento al Sistema de Expertos, el acercamiento al Sistema Difuso y el acercamiento a las Redes Neuronales Artificiales.

CONCLUSIONES

Se realizaron 17 análisis a partir de las concentraciones individuales de los gases disueltos en el aceite dieléctrico de los transformadores y las relaciones entre sus concentraciones que permitieron obtener 15 diagnósticos, y evaluar el estado de los mismos en la ECIE Cienfuegos. La eliminación a tiempo de las fallas incipientes diagnosticadas permitió reducir los índices de fallas de los transformadores en un 40 %, lo que significa que el número de fallas anual disminuyó de 5 a 2 y potenciar los mantenimientos predictivos, que garantizó una mejor planificación de las salidas de servicio para la eliminación de las fallas incipientes detectadas.

El análisis de gases disueltos es la técnica de mayor éxito en el diagnóstico de fallas incipientes en transformadores. La presencia y concentración de gases generados depende del tipo, localización y temperatura de la falla, solubilidad y grado de saturación de los diferentes gases en el aceite, de los diferentes materiales involucrados en el proceso de degradación y de los procedimientos de muestreo y medición [10,11]. Los procedimientos de análisis tienen una lógica difícil, por lo que se recomienda un segundo análisis para confirmar el diagnóstico. Su principal desventaja es la necesidad de que la falla esté activa durante algún tiempo. Esta técnica continúa manteniendo su actualidad y brinda la posibilidad de detectar a tiempo y eliminar fallas incipientes, generalmente de lento desarrollo, evitando que devengan en fallas mayores y más costosas.

La aplicación de sistemas de inteligencia artificial para la interpretación de los análisis de gases disueltos permite diagnosticar con exactitud, rapidez y confiabilidad la condición de los transformadores, elimina los diagnósticos incorrectos, discierne cuando coinciden más de una falla y elimina los casos o zonas de incertidumbre o umbrales, en que resulta sea imposible hacer un diagnóstico. Su utilización se amplía gradualmente y están permanentemente sujetos a constantes correcciones e inspecciones en la práctica.

REFERENCIAS

- [1]. Wang, M.; *et al.*, "Review of condition assessment of power transformers in service". IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, vol.18, n.6, p. 12–25, [consultado: 12 de junio de 2011], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=Review+of+condition+assessment+of+power+transformers+in+service>, doi: 10.1109/MEI.2002.1161455, ISSN 0883-7554.
- [2]. Montané, J.J.; *et al.*, "Estado actual del diagnóstico de transformadores de potencia en las centrales eléctricas cubanas". Revista Ingeniería Energética, 2011, vol.32, n.1, p. 53-61, Disponible en: <http://rie.cujae.edu.cu/index.php/RIE/article/view/289/286>, ISSN 1815–5901
- [3]. Mackenzie, E.A.; *et al.*, "On-line monitoring and diagnostics for power transformers". En: Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI), San Diego, CA: IEEE, 6-9 June 2010, [consultado: 19 de septiembre de 2011], p. 1–5, Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=Online+monitoring+and+diagnostic+s+for+power+transformers>, doi: dx.doi.org/10.1109/ELINSL.2010.5549734, Print ISBN: 978-1-4244-6298-8.
- [4]. Pandey, R.; Deshpande, M.T., "Dissolved Gas Analysis (DGA) of Mineral Oil Used in Transformer". International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management, 2012, vol.1, n.2, p. 1-5, [consultado: 2 de abril de 2013], Disponible en: <http://www.ijaiem.org/volume1Issue2/IJAIEM-2012-10-30-069.pdf>, ISSN 2319–4847.

- [5]. Lelekakis, N.; *et al.*, "Comparison of dissolved gas-in-oil methods using a dissolved gas-in-oil standard". IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, vol.27, n.5, p. 29-35, [consultado: 26 de mayo de 2012], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=Comparison+of+dissolved+gas-in-oil+methods+using+a+dissolved+gas-in-oil+standard>, ISSN 0883-7554.
- [6]. IEEE, IEEE Standard C57-104-2008, "IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers". 2009, [consultado: 2 de febrero de 2009], p. 1-36, Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=4776467>, doi: 10.1109/IEEESTD.2009.4776518, ISBN: 978-0-7381-5834-1.
- [7]. Duval, M., "The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers". IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, vol.24, n.6, p. 22-29, [consultado: 14 de diciembre de 2009], Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=The+Duval+Triangle+for+Load+Tap+Changers%2C+Non-Mineral+Oils+and+Low+Temperature+Faults+in+Transformers>, ISSN 0883-7554.
- [8]. Dörnenburg E.; Gerber O.E., "Analysis of dissolved and free gases for monitoring performance of oil-filled transformers", Brown Boveri review, 1967, vol.54, n. 2/3, p. 104-11, [consultado: 7 de marzo de 2009], Disponible en: http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/MNL/DATA/vol_1994/iss_2/310_1.xml, ISSN 0007-2486.
- [9]. Rogers, R.R., "IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers, using gas in oil analysis". IEEE transactions on electrical insulation, 1978, vol.13, n.5, p. 349-354, [consultado: 30 de noviembre de 2008], Disponible en: [http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=IEEE+and+IEC+codes+to+interpret+incipient+faults+in+transformers%2C+using+gas+in+oil+ana](http://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?newsearch=true&queryText=IEEE+and+IEC+codes+to+interpret+incipient+faults+in+transformers%2C+using+gas+in+oil+analysis)lysis, ISSN 0018-9367.
- [10]. Liñán, R.; *et al.*, "Monitoreo y diagnóstico en línea de transformadores de potencia". Boletín IIE, México: Instituto de Investigaciones Eléctricas, 1997, vol.21, n.4, p. 192-204, [consultado: 11 de diciembre de 2010], Disponible en: <http://www.iie.org.mx/publica/bolja97/tec3ja97.htm>, ISSN 0185-0059.
- [11]. Gomathy, V.; Sumathi, S., "Implementation of SVM using sequential minimal optimization for power transformer fault analysis using DGA". International Journal of Computers & Technology, 2013, vol.10, n.5, p. 1687-1699, [consultado: 18 de febrero de 2014], Disponible en: http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:rFd2Vtlqbt4J:cirworld.com/journals/index.php/ijct/article/download/2101/pdf_176+&cd=1&hl=es&ct=clnk&gl=cu&client=firefox-a, ISSN 2277-3061.

AUTOR

Gustavo Crespo Sánchez

Ingeniero Electricista. Máster en Ciencias, mención Sistemas Eléctricos de Potencia. Profesor Auxiliar. Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez", Cuba.

e-mail: gcsanchez@ucf.edu.cu