

La espectroscopía de impedancia electroquímica como herramienta de diagnóstico del aceite transformador

Alexander Cueli Corugedo

alexander@ceinpet.cupet.cu

Artículo Original

Beatriz Pérez Barcala

bperez@ceinpet.cupet.cu

Yosmari Adames Montero

yosmari@ceinpet.cupet.cu

Centro de Investigaciones del Petróleo, La Habana, Cuba

Resumen

La calidad del aceite transformador es esencial para asegurar el buen funcionamiento de interruptores y transformadores en los equipos eléctricos en los cuales tiene un papel como aislante. La necesidad de garantizar tal condición, la cual puede afectarse por diversas causas tales como: bajo grado de refinación, contaminación, humedad entre otras, conlleva una evaluación periódica del estado del aceite transformador, para evitar así las costosas fallas en el sistema de distribución y transmisión de la energía eléctrica. El trabajo aborda la utilización por primera vez de la espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS) como prueba diagnóstico de calidad para aceites transformadores nacionales nuevos y regenerados, lo que permite demostrar su comportamiento resistivo a procesos de corrosión y por ende, el mantenimiento de sus propiedades dieléctricas. Para el estudio se utiliza una celda electroquímica de vidrio, típica de tres electrodos, que permite controlar la temperatura del ensayo en un rango determinado (75° C y 95° C). Como electrodo de trabajo se empleó cobre electrolítico siendo los de referencia y auxiliar los establecidos normalmente para estos fines. Los espectros de impedancia obtenidos confirman las propiedades dieléctricas de los aceites ensayados. Se observa que con el aumento de la temperatura el efecto resistivo del aceite dieléctrico disminuye.

Palabras claves: aceite dieléctrico, transformadores, espectroscopia de impedancia electroquímica, comportamiento resistivo

Recibido: 14 de marzo del 2014

Aprobado: 28 de agosto del 2014

INTRODUCCIÓN

La disponibilidad de energía eléctrica segura y estable se encuentra entre los factores más críticos en la actividad tanto civil como industrial, y esto convierte su desarrollo tecnológico en una fuerza impulsora para las empresas de suministro hacia fines económicos.

Por poseer características naturales y una elevada constante dieléctrica, los aceites minerales derivados del petróleo han sido seleccionados como los medios aislantes más adecuados para ser usados en los transformadores eléctricos, lo cual se debe a que las redes de suministro de energía eléctrica utilizan transformadores que requieren a

estos para su funcionamiento. La función principal del aceite dieléctrico es la de aislar al transformador de la conductividad eléctrica del medio, lo que depende en su totalidad de la ausencia de impurezas producidas durante el proceso de producción, tales como suciedad, materias extrañas y agua, que aún en pequeñas cantidades pueden disminuir la rigidez dieléctrica [1]. Otra función no de menor importancia es la de disipar el calor producido durante su funcionamiento evitando un sobrecalentamiento que lo inutilizaría.

Los aceites para transformadores de buena calidad proporcionan un buen aislamiento, transferencia de

temperatura, fluidez y estabilidad de oxidación. Si los aceites son producidos de manera local, su costo de producción será bajo y los riesgos de perder su calidad por oxidación y absorción de humedad pueden ser evitados.

El control de la calidad del aceite es esencial para asegurar el buen funcionamiento de los equipos eléctricos, en los cuales el aceite trabaja como aislante y/o refrigerante. Un análisis del estado en que se encuentra el aceite puede revelar una variedad de propiedades del mismo como aislante. Sin embargo, es posible realizar ensayos normalizados del aceite y recomendar nuevos criterios de evaluación.

Recientemente un grupo de investigadores del Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), han enfocado esfuerzos en métodos capaces de medir parámetros de la respuesta dieléctrica, que caracterizan los fenómenos de polarización y conducción conocidos. Estos métodos no invasivos son de gran interés para evaluar el estado del aislamiento de un transformador, por lo que el objetivo del trabajo es demostrar, mediante el método de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), el comportamiento resistivo a los procesos de corrosión del aceite transformador nacional. En los últimos años se ha empleado dicha técnica en los estudios de diferentes fenómenos de polarización y conducción en aislantes líquidos con señales de respuesta dieléctrica en el dominio de la frecuencia en función de su permitividad relativa real y la conductividad en el circuito dieléctrico [1].

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la investigación se realizaron ensayos electroquímicos a un electrodo de cobre en un inicio con aceites transformador nuevos y luego, en presencia de aceites regenerados en un rango de temperatura de 75 °C y 95 °C. Se utilizó una celda electroquímica (recipiente de vidrio con una capacidad de 250 mL) típica de 3 electrodos, que permitió controlar la temperatura. Como electrodo de referencia se empleó calomel saturado y como auxiliar, platino. Se montó la celda electroquímica en un termostato, que permitió regular la temperatura del ensayo. Luego se conectó al equipo *Field Machine* mediante cables recubiertos, donde un terminal va a la celda y la otra al equipo, que se encarga de recibir las señales de los procesos de corrosión y expresarlas en valores gráficos y numéricos.

La técnica electroquímica empleada fue la espectroscopía de impedancia, la cual se llevó a cabo aplicando una señal de corriente alterna de 20 mV de amplitud, en un intervalo de frecuencias comprendido entre 10 000 Hz hasta 0,01 Hz, según la Norma ASTM G 106-89 [2].

Los electrodos fueron construidos para tener contacto únicamente entre la solución y el área del electrodo. Antes de realizar cada experimento, los electrodos de trabajo se sometieron a una limpieza mecánica, por medio de un pulido

con lija # 400 y agua, seguido de un acabado con lija de # 800 hasta obtener una superficie homogénea.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La técnica de impedancia electroquímica permite medir los procesos lentos de polarización mediante mediciones de corriente, aplicando excitaciones del tipo sinusoidal. En el estudio de aislamiento del aceite transformador se tiene en cuenta la forma geométrica de la curva, que permite determinar de forma cualitativa las propiedades dieléctricas de los aceites en el dominio de la frecuencia y cómo afecta la variable temperatura en la respuesta dieléctrica.

La impedancia incluye los efectos de acumulación y eliminación de carga (capacitancia) e inducción magnética (inductancia). Tiene especial importancia si la corriente varía en el tiempo, en cuyo caso, el voltaje y la propia impedancia se describen con números complejos o funciones del análisis armónico. La parte real de la impedancia es la resistencia y su parte imaginaria es la reactancia. El concepto de impedancia generaliza la *ley de Ohm* en el estudio de circuitos en corriente alterna (AC). Este efecto es apreciable al analizar la señal eléctrica implicada en el tiempo.

El resultado que se obtiene con la técnica de espectroscopía de impedancia para el cobre en aceite transformador terminado y en aceite transformador regenerado a las temperaturas de 75 y 95 °C se observan en las figuras 1 y 2 como diagramas de impedancia trazados con la resistencia real (Z') y la resistencia imaginaria (Z''). Una particularidad, de los diagramas de impedancia, conocidos también como diagramas de *Nyquist*, es que permite valorar la resistencia de polarización y la resistencia que ofrece el medio al proceso de corrosión en función del área bajo la curva.

En el espectro de impedancia del aceite transformador terminado, la figura 1 indica que la interfase cobre _ aceite terminado, describe un efecto resistivo que garantiza un alto grado de protección. De esta manera la curva de color rojo (gráfico inferior) representa el aceite terminado a 95 °C, que muestra valores de impedancia menores con relación a la curva azul (gráfico inferior) obtenida a 75 °C. En lo referente al espectro a 95 °C la disminución de la resistencia real (Z'), hace suponer que a esta temperatura se pierdan propiedades de pasividad en la película protectora formada sobre el metal.

La figura 2 muestra como aún en el aceite regenerado a la temperatura de 75 °C se conservan propiedades dieléctricas del mismo que dan protección al sistema. La conductividad es un parámetro de estos aceites que es afectada a la temperatura a 95 °C y se explica por la energía de activación. Los valores de energía de activación reportados se encuentran entre 0,4 y 0,7 eV [5], donde la conductividad en el dominio de la frecuencia no permite obtener un espectro de impedancia del sistema.

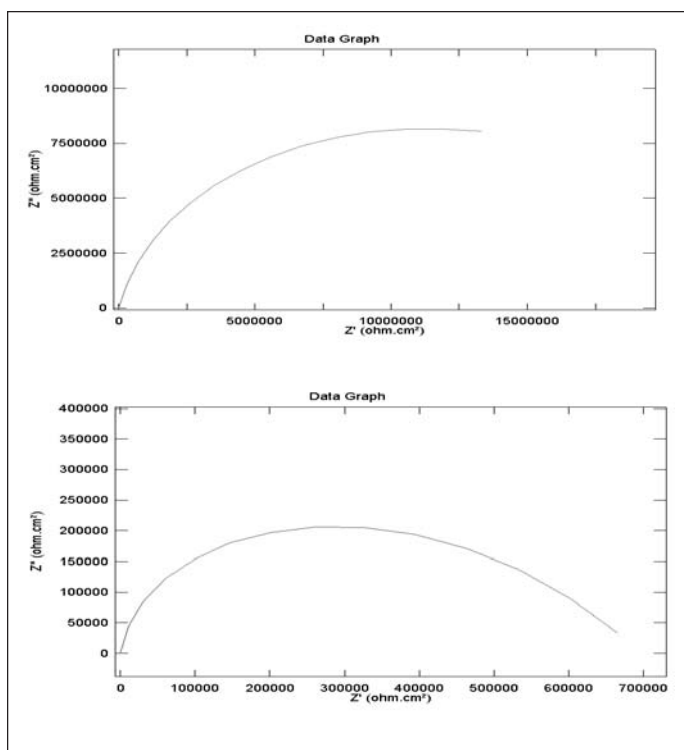


Fig. 1. Diagramas de impedancia electroquímica del aceite transformador terminado a 75 °C (superior-azul) y 95 °C (inferior-rojo)

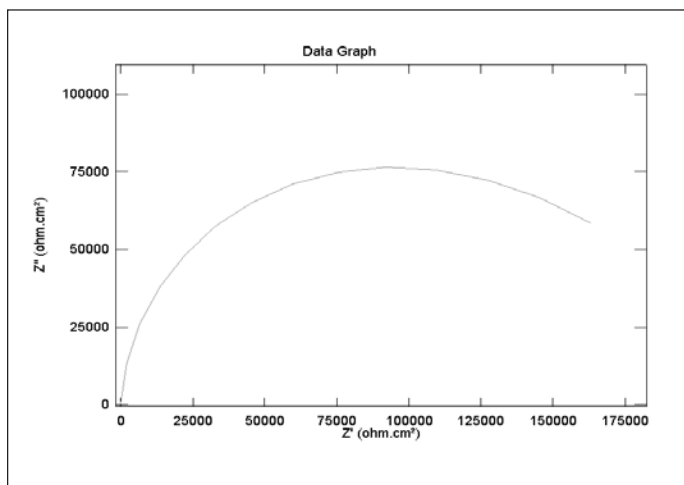


Fig. 2. Diagrama de impedancia del aceite nacional regenerado a 75 °C

CONCLUSIONES

1. El efecto resistivo que se obtuvo por la técnica de espectroscopía de impedancia electroquímica demuestra propiedades dieléctricas en los aceites transformadores nacionales permitiendo llegar a un diagnóstico más preciso del sistema de aislamiento.

2. Con el aumento de la temperatura a 95 °C, las propiedades dieléctricas del aceite regenerado estudiado en el dominio de la frecuencia no permite obtener un espectro de impedancia del sistema.

REFERENCIAS

1. **RODRÍGUEZ GÓMEZ, Alberto.** "Determinación del espesor de corrosión sobre cobre provocada por azufre corrosivo en aceites dieléctricos". Tutora: Patricia Aparicio Fernández. Tesis de maestría, Sevilla, noviembre 2011. Disponible en Web : http://investigacion.us.es/docs/web/files/cu_arodriguez.pdf [consultado noviembre 2013].
2. **CASTAÑO, Johana; RESTREPO, Iván, et. al.** "Evaluación de la influencia del cobre y el níquel en la cinética de corrosión de los aceros autoprotectores por espectroscopia de impedancia in situ y ex situ". *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, núm. 50, 2009. ISSN: 0120_6230 Disponible en Web : <http://www.scielo.org.co/> [consultado noviembre 2013].
3. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. "Standard practice for verification of algorithm and equipment for electrochemical impedance measurements". ASTM G 106-89: 2004, 8 pp .100 Bar Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, United States of America, 2004.
4. **GONZÁLEZ, F. J.** *Control de la corrosión. Estudio y medidas por técnicas electroquímicas*. Madrid, España: Editorial Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1989, 206 pp. ISBN 84_00_6990_0.
5. **CABRERA SIERRA, Román; MARÍN CRUZ, Jesús; GONZÁLEZ, Ignacio.** "La utilización de la espectroscopia electroquímica (EIS) para identificar diferentes estados superficiales en el proceso de corrosión del acero al carbono en medios amargos". *Boletín de la Sociedad Química de México*, 1 (1): 32_41, 2007. ISSN: 1870_1809. Disponible en Web: <http://www.coursehero.com/file/6299406/06behalowfre/> [consultado octubre 2013].
6. **SCHWEITZER, Philip A.** *Fundamentals of corrosion. Mechanism, causes, and preventative methods*: United States of America: Taylor and Francis Group, 2010. ISBN: 978_959_7107_33_9.
7. **SHAYEGANI, A. A.; BORSI, H.** "Dielectric behavior of insulating at very low frequency". *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, núm. 3, June 2006. Disponible en Web: <http://www.ieeeexplore.net/.../searchresult.jsp?...QT.Mohseni%2C+H> [consultado julio 2013].

AUTORES

Alexander Cueli Corugedo

Ingeniero Químico, Especialista III, Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba, Miembro de la SCQ

Beatriz Pérez Barcala

Ingeniera Química, Investigadora II, Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), La Habana, Cuba, Miembro de la SCQ y SCG

Yosmari Adames Montero

Ingeniera Química, Investigadora III, Máster en Corrosión, Profesor Ayudante, Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), Miembro de la SCQ y SCG

The Electrochemical Impedance Spectroscopy as a Diagnostic Tool of the Transformer Oil

Abstract

The quality of the transformer oil is essential to ensure its right performance in electrical appliances such as transformers and switches, in which oil works as insulating. The necessity to guarantee such condition can be affected due to the low level of pollution, refining, and humidity among others, reason why a systematic evaluation of the oil's condition must be carried out to avoid the expensive failures in the power's transmission and distribution. This work deals with the usage of the Electrochemical Impedance Spectroscopy for the first time as a diagnostic of the national new regenerated oils, which helps showing its resistive behavior to corrosive processes and so the preservation of its electrical properties. An electrochemical glass cell with three electrodes is used in this work in order to control the test temperature to a specific determined range (75° C y 95° C). Electrolytic copper was used as work electrode, taking as reference and auxiliary the ones specified for this purpose. The impedance spectrums obtained, confirmed the dielectric properties of the oil tested. With the increase of the temperature, the resistive effect of the oil decreases.

Key words: dielectric oil, transformers, Electrochemical Impedance Spectroscopy, resistive behavior