

Diagnóstico de transformadores de potencia a partir de compuestos furanos

Power Transformer Diagnosis from Furan Compounds

MSc. Gustavo Crespo-Sánchez, gcsanchez@ucf.edu.cu; Estudiante Yanay Fernández-Reina, Estudiante Neilys A. Sust-Cano, Estudiante Rafael A. Fundora-Díaz, Estudiante Alexis Reyes-Pérez

Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cuba

Resumen

La vida útil de los transformadores de potencia depende de las formas de explotación y mantenimiento. Durante su explotación, están sometidos a esfuerzos mecánicos, térmicos, eléctricos y ambientales que degradan el aceite y los materiales aislantes, provocando defectos internos, de lento desarrollo, que si se detectan a tiempo, puede evitarse que devenguen en costosas fallas mayores. Durante los últimos 30 años diferentes estudios han demostrado que la correlación entre los furanos y el grado de polimerización, tiene una relación directa con el nivel de degradación del papel, cuyo proceso de envejecimiento consiste esencialmente en una despolimerización provocada por las reacciones químicas: acido-hidrólisis, pirolisis y oxidación. El objetivo de la investigación es utilizar el análisis de los compuestos furanos contenidos en el aceite de los transformadores en explotación, para determinar su grado de polimerización, diagnosticar fallas iniciales y conocer el estado de envejecimiento del aislamiento en los mismos. Para ello se emplean métodos histórico-lógico; en el análisis de los antecedentes y evolución del tema; inducción-deducción y generalización, en el estudio de la bibliografía relacionada con la investigación; deductivo -para a partir de los resultados de los análisis de laboratorio- realizar el diagnóstico y matemáticos, en los cálculos y revisiones de los datos. Como resultado se hicieron diagnósticos de transformadores en explotación, que permiten concluir, que las concentraciones de furanos en el aceite dieléctrico pueden emplearse para la determinación del estado de los transformadores y para detectar de fallas pequeñas recién comenzadas y de lenta evolución.

Palabras clave: compuestos furanos, diagnóstico de transformadores, envejecimiento; degradación del aislamiento, grado de polimerización.

Abstract

The lifetime of power transformers depends on the exploitation and maintenance. During their operation, are subjected to mechanical, thermal, electrical and environmental stresses that degrade oil and insulating materials, causing internal defects, of slow development, that if detected early, can be avoided by becoming in costly major faults. During the last 30 years, various studies have shown that the correlation between the furans and the polymerization degree has a direct relationship with the level of paper degradation, which aging process consists essentially in a depolymerization caused by chemical reactions: acid-hydrolysis, pyrolysis and oxidation. The objective of the research is to use the furan compound

analysis in operating oil transformer to determine their degree of polymerization, diagnose faults and know the aging state of the insulation in them. The following methods are used: Historical - logical; in the analysis of the history and evolution of the topic; induction - inference and generalization in the study of literature related to research; deductive - for from the results of laboratory tests – make the diagnosis and mathematicians, in the calculations and data revisions. As a result, diagnoses were made in operating transformers, which allow us to conclude that furan concentrations in the dielectric oil can be used for determining the status of transformers and to detect newly started small faults and of slow evolution.

Keywords: *furan compounds, transformers diagnosis, aging, insulation degradation, polymerization degree.*

Introducción

Los transformadores de potencia son elementos vitales en el Sistema Electroenergético Nacional por su significación y costos y están permanentemente sometidos a esfuerzos eléctricos, mecánicos, térmicos y medio ambientales, que pueden provocar la degradación del aislamiento y ocasionar defectos internos incipientes que pueden conducir a fallas mayores.

A temperaturas superiores a 120 °C su aislamiento (Materiales de la celulosa) puede generar grandes cantidades de compuestos furánicos, cuyo análisis, una técnica de mediados de los años 90, se utiliza para medir del grado de polimerización del papel y determinar su grado de envejecimiento (calidad) cuya correlación ha sido demostrada por diferentes estudios en los últimos 30 años. Estos estudios igualmente han demostrado que uno de sus derivados, el 2-FAL, es el más estable en el aceite.

El objetivo del trabajo, -a partir de que la experiencia demuestra que la evolución de los compuestos furánicos depende de las condiciones de funcionamiento del transformador y que constituye el indicador más confiable de la degradación del aislamiento- es realizar diagnósticos para transformadores, a partir de las concentraciones de furanos, de manera que permitan detectar problemas de funcionamiento o la presencia de defectos internos, de lento desarrollo, que si se detectan y atienden a tiempo, permiten evitar la ocurrencia de fallas mayores y más costosas.

El grado de polimerización (DP), representa el número de anillos de glucosa en una cadena, parámetro que exprime el número medio de anillos

de glucosa que constituyen la molécula polimérica de la celulosa [1]. El stress térmico combinado con el stress mecánico y/o eléctrico, provoca la despolimerización de la celulosa y el papel aislante que es un material polimérico, sufre degradación, ocurriendo la ruptura de los enlaces covalentes y de Van der Waals, afectando las propiedades del material y produciendo entre otros compuestos, los furanos [2].

En el diagnóstico del envejecimiento del papel aislante se utilizan varias técnicas de diagnóstico: Contenido de Humedad [3]; Gases disueltos [4] y Compuestos furanos. Existen otros marcadores químicos de diagnóstico: Azúcares, Ácidos orgánicos; Compuestos volátiles y Degradación de resinas fenólicas.

Para establecer modelos de envejecimiento utilizando los compuestos furánicos, es crucial encontrar la partición de los compuestos furánicos entre el papel (mg/g de furanos en el papel) y el aceite (mg/g de furanos en el aceite) [3]. La zona del enrollamiento en la que se encuentra el punto más caliente del transformador es el área donde se produce una mayor generación de furanos debido a que al ser esta parte que soporta una temperatura más alta será donde se alcance una mayor tasa de degradación térmica. Conocer la carga típica del transformador y el perfil de carga puede arrojar nueva luz sobre la interpretación de la producción de dioxinas y furanos.

El proceso de envejecimientos del papel es esencialmente una despolimerización provocada por las reacciones acido-hidrólisis, pirolisis y la oxidación y en la que los principales factores que influyen son la temperatura, la humedad y el oxígeno [5].

La figura 1, muestra los mecanismos para la formación de compuestos furánicos, en función del mecanismo predominante en el envejecimiento de los papeles aislantes.

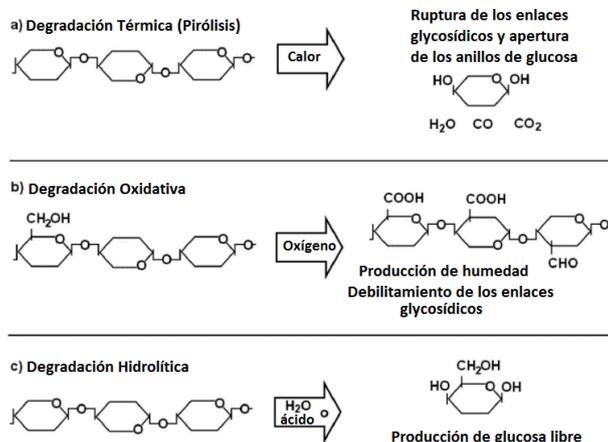


Figura 1. Mecanismos de degradación de celulosa

Los furanos son el indicador más fiable de la degradación del aislamiento de celulosa. Son sensibles a la degradación térmica y a la oxidación, pero existe poca información práctica sobre su estabilidad en el rango de temperaturas que pueden ser experimentadas en un transformador en servicio y sobre su afinidad relativa para el aceite o el papel, una vez generados dentro del transformador [6]. Pruebas de laboratorio muestran que por debajo de 100 °C, los cinco tipos de furanos son bastante estables sin pérdidas significativas. A temperaturas de funcionamiento, entre 90 y 110 °C, comienza la inestabilidad de algunos furanos en condiciones favorables de oxidación.

Un análisis de la tasa de producción de furanos es útil para determinar la velocidad de degradación del aislamiento de un transformador. La concentración de los furanos en el aceite de un transformador, depende del contenido de furanos en un momento anterior, de los producidos por el deterioro del aislamiento de celulosa durante un período de tiempo intermedio, del reparto de furanos entre el aceite y el papel y de la degradación de algunos compuestos furánicos (debido a los problemas de estabilidad) durante ese intervalo de tiempo. La tasa de producción de furanos depende también de la temperatura de operación del transformador y del grado de envejecimiento del papel [7]. Depende además de la variación en el diseño del transformador y la temperatura ambiente también debe ser tenida en cuenta.

Otros parámetros tales como el tipo de aislamiento, el contenido de humedad del aislamiento, la cantidad de oxígeno en el aislamiento, la presencia de ácidos u otros contaminantes, la partición de furanos entre el papel y el aceite y los tratamientos del aceite (tales como la desgasificación y el secado o la regeneración), pueden desempeñar un papel significativo en la velocidad de producción de furanos. Estos parámetros deben ser analizados y tenerse en cuenta en la futura evaluación del análisis de furanos [8].

No se ha establecido aún cuál de estos factores mencionados anteriormente influyen en la formación de unos furanos u otros.

Materiales y métodos

Durante el desarrollo de la investigación se utilizaron los métodos:

Histórico-lógico. El análisis de los antecedentes y evolución del tema, permitió seguir una secuencia lógica que condujo al criterio de que la degradación térmica de los materiales celulósicos presentes en los transformadores con aislamiento en aceite produce diferentes tipos de derivados furánicos, siendo el más común el 2-furfural (en ocasiones denotado como 2FAL) con un porcentaje del 98,2 %. Los demás derivados furánicos identificados son 5-hidroxi-metil-2-furfural (5H2F) en un 2,8 %, 2-acetyl furano (2-ACF) en un 1,2 %, 5-metil-2-furfural (5M2F) en un 8,3 % y 2-furfurol (2FOL) en un 1 %. Estos compuestos se producen en cantidades mucho más pequeñas cuando se degrada térmicamente el papel de los transformadores de potencia. Este método, al resaltar que los compuestos furánicos son productos específicos de la degradación del papel, puede además devenir en una buena técnica para conocer el envejecimiento del papel [3]. La figura 2, muestra los diferentes compuestos furánicos que se pueden formar.

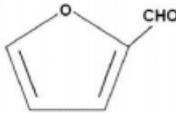
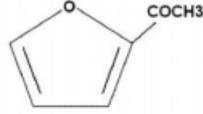
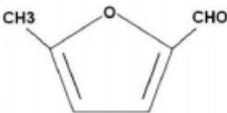
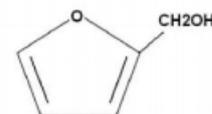
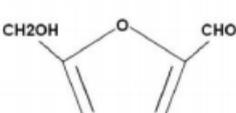
Nombre y Abreviatura	Estructura
2-FURALDEHIDO 2FAL	
2-ACETILFURANO 2ACF	
5-METIL-2-FURALDEHIDO 5M2F	
2-FURFUROL 2FOL	
5-HIDROXIMETIL- 2-FURALDEHIDO 5H2F	

Figura 2. Compuestos furanos que se pueden formar con la degradación térmica de los materiales celulósicos

Inducción–deducción y generalización. La bibliografía relacionada con la investigación, permitió establecer, que a partir de la década de 80, diversos estudios tuvieron como objetivo, establecer un coeficiente de correlación entre el Grado de Polimerización del aislamiento y el contenido de furanos en el aceite. Con la despolimerización de la celulosa del papel de aislamiento, el GP disminuye y se producen, entre otros compuestos, monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), etano (C₂H₆), acetileno (C₂H₂), agua (H₂O) y compuestos furánicos.

Deductivo. A partir de los niveles de compuestos furánicos detectados en el aceite se realiza el diagnóstico para determinar el estado de los transformadores.

Matemáticos. En los cálculos y revisiones de los datos.

Se realizaron análisis químicos a diecisiete transformadores en servicio (17), en el laboratorio de INEL, en el Centro de Operaciones Luis Felipe Almeida (COLFA), en Capdevila, Ciudad de la Habana, para determinar el contenido de compuestos furánicos contenidos en el aceite de los mismos. Dichos transformadores habían sido objeto de estudio para el diagnóstico utilizando el

método del análisis de gases disueltos (AGD), de manera que siguiendo las recomendaciones de las investigaciones anteriores, se combinaron los métodos de análisis para poder determinar y conocer mejor el estado de los transformadores.

Para la realización de los diagnósticos existen varios criterios posibles a seguir: La Norma ASTM D5837-99 (1999); las concentraciones de Furfural como indicador de envejecimiento [9], de Zhang C. H. (2006) y el porcentaje de contenido de furanos en relación al contenido de furanos de una población analizada para determinar el tiempo restante de vida de un transformador, del Instituto de Investigaciones de Centrales Eléctricas, en Bangalore, India, publicado por CIGRÉ (2008) [10]. Por facilidad de acceso, se escogió el criterio de las concentraciones de Furfural, de Zhang [9].

Resultados y discusión

Los criterios para el diagnóstico de transformadores a partir del análisis de compuestos furánicos en líquidos de aislamiento eléctrico establecen que altas concentraciones o incrementos inusuales en las concentraciones de compuestos furánicos en el aceite indican degradación de la celulosa como resultado de envejecimiento del aislamiento o la existencia de fallas incipientes.

Para la obtención de los resultados alcanzados, se consideraron las mediciones de campo de las concentraciones de furanos (mg/l) en el aceite de los transformadores como indicador del envejecimiento del aislamiento [9], que establecen que:

- Para un Transformador en buen estado de envejecimiento, las concentraciones de furanos deben ser < 1 mg/L de aceite.
- Para un transformador con envejecimiento intermedio deben ser entre 1mg/l y 2 mg/L de aceite.
- Para un transformador con un alto nivel de envejecimiento debe ser $>$ que 2 mg/L de aceite.

A partir de este criterio escogido, la tabla1 muestra los resultados de los diagnósticos realizados a partir de los niveles de compuestos furánicos detectados en el aceite.

Tabla 1
Diagnósticos realizados a partir de los compuestos furánicos detectados en el aceite

Niveles de compuestos furánicos			Cantidad de Transformadores diagnosticados
< 1 mg/L (Buen estado de envejecimiento)	1<CF<2 mg/L (Envejecimiento intermedio)	>2 mg/L (Alto nivel de envejecimiento)	
12	4	1	17

El análisis de los compuestos furánicos puede utilizarse como complemento a los diagnósticos por análisis de gases disueltos (D3612), por lo tanto la tabla 2, muestra la correspondencia de los diagnósticos obtenidos a partir del Análisis de los Gases Disueltos (AGD), con los obtenidos de los análisis de los compuestos furánicos.

Tabla 2
Comparación entre los diagnósticos obtenidos por Análisis de Gases Disueltos y Compuestos furánicos detectados en el aceite

Utilizando Análisis de Gases Disueltos (AGD)		Utilizando los niveles de compuestos furánicos		
Diagnóstico	Cantidad	< 1 mg/L (Bueno)	1<CF<2 mg/L (Intermedio)	>2 mg/L (Alto)
Envejecimiento normal. No hay Falla (F1)	8	8		
Descargas de baja energía. Falla Eléctrica (F2)	1	1		
Descargas de Baja energía con arcos continuos. Falla Eléctrica (F2)				
Sobrecalentamientos inferiores a 150°C. Falla Térmica (F3)	2	1	1	
Sobrecalentamientos en el rango de entre 150°C y 300°C. Falla Térmica (F3)	1		1	
Sobrecalentamientos en el rango de entre 300°C y 700°C. Falla Térmica (F4)	2		2	
Sobrecalentamientos superiores a 700°C. Falla Térmica (F4)				
Descargas parciales de alta energía. Falla Eléctrica (F5)				
Descargas de alta energía repetitivas. Ruptura del aceite por arcos entre devanados o entre estos y tierra. Falla Eléctrica (F5)	1			1
Diagnóstico no disponible.	2	2		

Ninguno de los transformadores analizados era nuevo. Los niveles de furanos altos en ellos, pueden indicar probabilidad de existencia de alguna falla incipiente [11]. Tampoco se encontraron furanos secundarios, que indican la existencia de alguna falla o que el papel se degrada más rápido de lo normal por algún problema de funcionamiento.

No se analizó la tasa de producción de furanos, que puede proporcionar una valiosa información sobre el efecto de un sobrecalentamiento continuo o repentino (como por ejemplo, fallas en el sistema de enfriamiento) [9].

En el análisis de los resultados, se consideró la producción de 2-FOL, pues la literatura lo vincula con fallos incipientes.

La base de datos de los Análisis de Gases disueltos es mucho más antigua y por lo tanto mucho más amplia que la de los compuestos furanos, por lo que la clasificación del tipo de falla es más exacta. No obstante, puede apreciarse que los resultados del estado del aislamiento diagnosticado a partir de las concentraciones de compuestos furanos encontrados se corresponden con los diagnósticos realizados a partir de las concentraciones de gases disueltos.

Conclusiones

- 1. Los diagnósticos en transformadores con altas concentraciones de furanos o presencia de furanos secundarios, indican problemas de funcionamiento o presencia de defectos internos, de lento desarrollo, que detectados y atendidos a tiempo, evitan la ocurrencia de fallas mayores y más costosas.***
- 2. Los datos obtenidos en transformadores en explotación muestran una gran variabilidad debido a que la producción de furanos depende de la temperatura de operación del transformador, de la variación en el diseño del transformador y de la temperatura ambiente, de otros parámetros tales como el tipo de aislamiento, contenido de humedad y cantidad de oxígeno en este, presencia de ácidos u otros contaminantes, la partición de furanos entre el papel y el aceite y de los tratamientos del aceite.***
- 3. Para lograr mejores diagnósticos se recomienda la comparación de resultados de las pruebas en transformadores que tienen un diseño similar, el análisis de los históricos de furanos en cada transformador y la tasa de generación en cierto periodo de tiempo.***

- 4. Los furanos son muy estables en el aceite del transformador debido a que la temperatura de funcionamiento raramente sobrepasa los 100 °C, consecuentemente, el análisis de compuestos furánicos en el aceite constituye una herramienta muy prometedora y un indicador muy confiable de la degradación del aislamiento, que puede utilizarse como complemento a otros tipos de técnicas de diagnóstico.**

Bibliografía

1. GRIFFIN P. J., LEWAND L. R., "A Practical Guide for Evaluating the Condition of Cellulosic Insulation in Transformers". *Minutes of Sixty-Second International Conference of Doble Clients*, Section 5-6. Boston, Massachusetts USA, 1995.
2. P. VERMA, *et.al*, "Generation of Furanic Compounds in Transformer Oil under Accelerated Thermal and Electrical Stress". Thapar Institute of Engineering & Technology, Patiala, India. *IEEE in Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*. October 26. ISBN 0-7803-9145-4, 2005, pp. 112-116.
3. Folleto 323 de CIGRÉ (CIGRÉ BROCHURE 323) (2007) "Ageing of cellulose in mineral-oil insulated transformers". Task Force D1.01.10. *Conseil International Des Grand Réseaux Électriques [Consejo Internacional en Sistemas Eléctricos Grandes (CIGRE)]*. ISBN: 978-2-85873-018-6P48. pp. 80-87. París, France.
4. IEC Standard 60599. (1999) *Mineral oil-impregnated electrical equipment in service- Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis*. Norma del Comité Electrotécnico Internacional (CIE 60599:1999). Equipos eléctricos impregnados en aceite en servicio. Guía para la interpretación de los análisis de gases disueltos y libres.
5. SAHA T. K. (2003) "Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers". *IEEE Transaction on Dielectric and Electric Insulation*. ISSN: 1070-9878. Vol. 10, no. 5, pp. 903–916. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). USA.
6. QIANG FU, ZHI LI, YONGPING LIN. (2010) "Recent advances on analysis and explanation of aged insulation in operating power transformers". Guangdong Power Grid Electric Power Science & Research Institute, Guangzhou 510600, China. *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*. ISBN: 978-1-4244-4813-5. pp. 1-4. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). USA.
7. EMSLEY A. M., XIAO X., HEYWOOD, R. J; ALI M. (2000) "Degradation of Cellulosic Insulation in Power Transformer. Part 2. Formation of Furan Products in Insulating Oil". *IEE Proceedings Science, Measurement and Technology*. ISSN 1350-2344. Vol. 147, No. 3. pp. 110-114. The Institution of Engineering and Technology (ITE). USA

8. CHEIM LUIZ, PLATTS DONALD, PREVOST THOMAS, SHUZHEN XU. (2012). "Furan Analysis for Liquid Power Transformers". *IEEE Electrical Insulation Magazine*. ISSN: 0883-7554. Vol. 28. No. 2. pp. 8-21. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). USA.
9. CHANG C. H., MAC ALPINE J.M.K (2006) "Furfural Concentration in Transformer Oil as an Indicator of Paper Ageing: Field Measurements". *Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC '06. IEEE/PES*. ISBN: 1-4244-0288-3. pp. 1-6. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). USA.
10. KUMARI S. VIJAYA., VISWANATH G. R., G. R. DHEEPALAKSHMI, DWARAKANATH K., TRIPATHY A.K. (2008) "Remaining life assessment of power transformers". *Water and Energy International*. ISSN: 0974-4711. Vol. 65, No. 3. pp. 30-33. Central Power Research Institute. Bangalore, India.
11. SANS JOHN R., BILGIN K.M., KELLY J.J. (1998) "Large-scale survey of furanic compounds in operating transformers and implications for estimating service life". *Conference Record of the 1998. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1998*. ISSN: 1089-084X. Vol. 2. pp. 543-553. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). USA.