

Transformadores con ésteres naturales como líquido aislante dieléctrico

Autores: Manuel Castillero, Roberto Asano Junior, Stephane A. Page de Asea Brown Boveri, S.A. - manuel.castillero@es.abb.com

1. INTRODUCCIÓN

Durante más de cien años, el aceite mineral refinado derivado del petróleo se viene utilizando en los transformadores sumergidos en líquido. Hoy en día, se destinan anualmente en todo el mundo más de un millón de toneladas de aceite para transformadores. El éxito del aceite mineral para transformadores se ha basado principalmente en su disponibilidad y su bajo coste así como en su buen rendimiento dieléctrico y refrigerante.

El incremento en la demanda de energía y el envejecimiento de las redes podría llevar a un incremento de la tasa de fallos sin precedentes en los transformadores de gran potencia. En esta situación el aceite mineral tiene limitaciones técnicas con elevados costes. Los incendios de transformadores con aceite mineral causan daños colaterales importantes así como graves problemas de seguridad. También existen grandes preocupaciones sobre los efectos contaminantes causados por los derrames de aceite mineral al medio ambiente. Esto ha dado lugar a una nueva clase de fluidos dieléctricos aislantes alternativos que históricamente se han desarrollado para responder a estas preocupaciones específicas.

A finales de la década de 1990, se desarrollaron los ésteres naturales, una nueva clase de líquido aislante biodegradable, para su aplicación en transformadores. Estos líquidos basados en aceites vegetales satisfacen todos los requisitos de los líquidos aislantes de alta temperatura con el añadido de que se fabrican a partir de materias primas renovables.

Existen hoy en día una serie de normas y guías publicadas que cubren el

uso de los ésteres naturales en aplicaciones de transformadores, como por ejemplo la norma ASTM D 6871 y la guía IEEE C57.147 en América del Norte, la norma ABNT NBR 15422 en Brasil y más recientemente el Documento 436 de Cigré. La versión de la norma IEC asociada se prevé para el año 2013.

2. ESTERES NATURALES COMO FLUIDOS DIELECTRICOS

2.1. ACEITES VEGETALES PARA USO EN APARATOS ELÉCTRICOS

Los aceites vegetales fueron considerados como líquidos dieléctricos aislantes por primera vez en los condensadores (con aislamiento de celulosa). Aceites de ricino y algodón fueron mencionados para su uso en condensadores (con aislamiento de celulosa) ya en 1962 [1]. Más tarde, en la década de los 90, el aceite de colza se convirtió en otro centro de interés para su uso en condensadores [2].

En la misma década, los gastos millonarios de las principales empresas de servicios públicos en la limpieza de los derrames y fugas de aceite mineral de transformadores, impulsan la investigación y el desarrollo de líquidos aislantes totalmente biodegradables a base de aceites vegetales para su uso en transformadores [3].

Los trabajos de investigación pronto demostraron que los aceites vegetales necesitaban mejorar para poder utilizarse en los transformadores. Los aceites de los transformadores permanecen en los mismos entre 30 y 40 años, cambiándose o regenerándose de forma periódica únicamente en los

grandes transformadores. La estabilidad a largo plazo es de importancia crítica y algunos aceites vegetales contienen componentes que se degradan en un tiempo relativamente corto.

2.2. ESTABILIDAD A LARGO PLAZO, UN FACTOR CLAVE

Los aceites vegetales crudos extraídos de las semillas contienen componentes sólidos, tales como proteínas, fibras y líquidos (grasas y aceites). Tanto las grasas como los aceites son ésteres triglicéridos de ácidos grasos (Fig. 1), pero las grasas contienen un porcentaje relativamente alto de triglicéridos saturados que solidifican por debajo de la temperatura ambiente. El aceite generalmente permanece líquido por encima de 0 °C (aceites con insaturación alta pueden permanecer líquidos entre -15 y -30 °C).

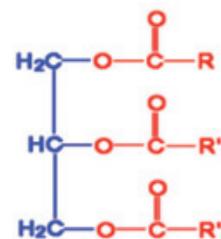


Fig. 1: Molécula de éster triglicérido

La Tabla 1 muestra la composición típica en ácidos grasos de algunos aceites vegetales [4]. El grado de insaturación de la molécula de éster triglicérido o de las cadenas de ácidos grasos son un indicador de la estabilidad al calor, a la oxidación y a la degradación a la luz del aceite (cuanto más alto es el grado de insaturación de mono- a tri-insaturado, más inestable es). La inestabilidad relativa a la oxidación es de aproximadamente 1:10:100:200 para triglicéridos saturados, mono-, di-, y

Colaboración

Aceites vegetales	Ácidos grasos saturados, %	Ácidos grasos insaturados, %		
		Mono-	Di-	Tri-
Aceite de colza*	7.9	55.9	22.1	11.1
Aceite de maíz	12.7	24.2	58.0	0.7
Aceite de algodón	25.8	17.8	51.8	0.2
Aceite de cacahuete	13.6	17.8	51.8	0.2
Aceite de oliva	13.2	73.3	7.9	0.6
Aceite de soja	14.2	22.5	51.0	6.8
Aceite de girasol	10.5	19.6	65.7	-
Aceite de girasol alto oleico	9.2	80.8	8.4	0.2

* Se ha desarrollado recientemente una variedad con bajo contenido en ácido erúico que contiene más del 75% de ácido graso mono-insaturado.

Tabla 1: Composición típica en ácidos grasos de algunos aceites vegetales

tri-insaturados C-18, respectivamente [5]. A este respecto, el aceite de girasol alto oleico proporciona la mejor estabilidad con un nivel mono-insaturado por encima del 80% (aunque muy estables, los ácidos grasos saturados solidifican fácilmente y por lo tanto no son deseables).

Se han llevado a cabo ensayos de estabilidad a la oxidación a 120 °C en diferentes ésteres naturales disponibles comercialmente utilizando el método de ensayo IEC 61125. Los tres ésteres naturales ensayados se diferencian principalmente en el contenido de ácidos grasos mono-insaturados u oleicos, es decir, por encima del 75% para un

aceite de girasol alto oleico, entre 50 y 75% para un aceite de colza medio oleico y por debajo de 30 % para un aceite de soja bajo oleico. Los tres ésteres naturales se compararon con un éster sintético, que es conocido por su mayor estabilidad. El cambio de viscosidad del fluido durante el ensayo es una buena indicación de su degradación. La Figura 2 muestra los resultados obtenidos durante un ensayo de 96 horas de duración.

Si bien el éster natural alto oleico no mostró degradación, tanto los ésteres naturales de mediano y bajo oleico ya mostraron signos de degradación notable en una etapa muy temprana,

con el producto de bajo oleico irreversiblemente polimerizado con el tiempo. Estos resultados se han corroborado por inspección visual, espectroscopia infrarroja y mediciones de tiempo de inducción oxidativa [6].

En los transformadores, la presencia de cobre aumenta la tendencia a la oxidación. Los inhibidores de oxidación, son por ello necesarios en los aceites para transformadores. Otro factor es la pureza del aceite, el aceite tiene que estar libre de impurezas iónicas hasta niveles aceptables y los aceites vegetales crudos no poseen este grado de pureza.

2.3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES

2.3.1. Preservación del medio ambiente

Los ésteres naturales son reconocidos por la industria como líquidos aislantes dieléctricos ecológicos alternativos. Por naturaleza, estos líquidos son no-tóxicos y fácilmente biodegradables (Fig. 3). Estas propiedades han sido verificadas y aprobadas por la Agencia de Protección al Medio Ambiente de los EE.UU. a través de su programa de Verificación de Tecnologías Medio Ambientales [7]. Los ésteres naturales también se clasifican como no-peligrosos para el agua por la Agencia Alemana del Medio Ambiente [8].

El respeto al medio ambiente de los ésteres naturales puede conducir a importantes beneficios para el usuario final del transformador. Por ejemplo, cuando se utilizan tales fluidos, la compañía de seguros FM Global, permite un volumen de aceite mucho mayor sin contención y una contención mucho más pequeña cuando esta sea necesaria [9]. Los derrames de ésteres naturales pueden eliminarse a través de medios normales, ya que no se consideran residuos peligrosos. Esto también podría dar lugar a un alivio potencial de las sanciones por contaminación del suelo.

Además, los productos derivados de la combustión de los ésteres naturales son mucho menos tóxicos que los de los hidrocarburos, minimizando su impacto global en el medio ambiente.

Ensayo de estabilidad a la oxidación a 120°C (IEC 61125)
Diferencia en viscosidad, (viscosidad final-inicial) (cSt)

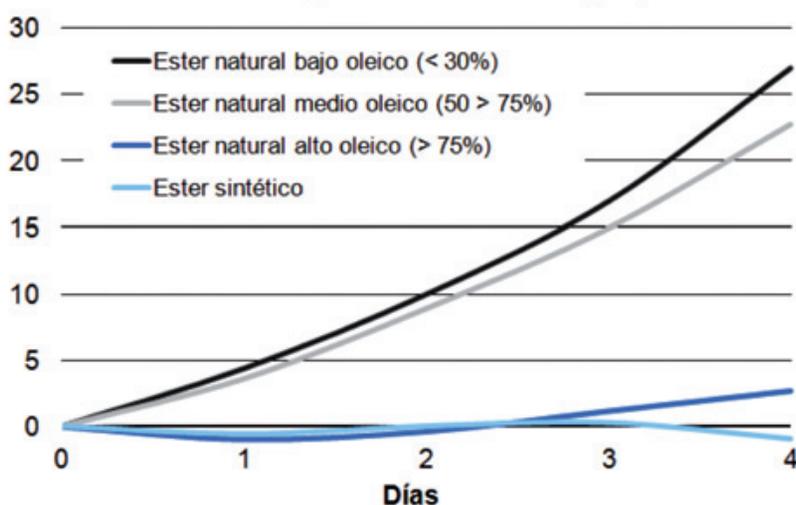


Fig. 2: Resultados de los ensayos de estabilidad a la oxidación IEC 61125 a 120 °C

Biodegradabilidad (Según ensayo CEC L-33-A-93 21-días)

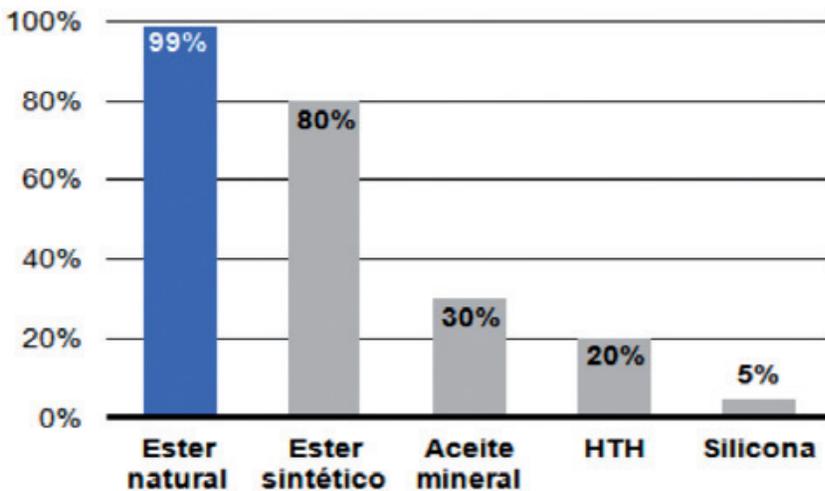


Fig. 3: Resultados del ensayo de biodegradabilidad anaerobia de 21 días de duración

2.3.2. Protección de la vida y de los activos

Los ésteres naturales tienen su punto de combustión por encima de 300 °C (160-180 °C el del aceite mineral). Son clasificados como fluidos dieléctricos “menos-inflamables” por la compañía de seguros FM Global y por UL, la organización independiente de certificación de seguridad de productos, también reciben una clasificación de peligro de incendio K2 según la norma IEC 61100. En consecuencia, los transformadores llenos con éster natural cumplen con los requisitos de seguridad contra incendios para aplicaciones en interiores y zonas al aire libre de mayor sensibilidad a la seguridad, sin necesidad de equipo de seguridad adicional. De acuerdo con FM Global por ejemplo, se pueden suprimir las medidas de seguridad activas anti in-

cendios cuando exista una separación mínima entre los diferentes equipos en transformadores de hasta 10 MVA de potencia [9].

En general, los ésteres naturales reducen en gran medida los riesgos de incendio y explosión del transformador, reduciendo así, tanto los daños colaterales como las primas de seguros. Esto se ilustra en la Figura 4 que muestra los resultados de simulación de fallo con arco de alta energía en tanques de transformadores de distribución, utilizando como electrodos varillas con forma cónica.

Por medio de un corto circuito se suministraron a través de los electrodos hasta 8.000 Amperios durante 3 ciclos. Al nivel más alto de energía, en la configuración con aceite mineral la tapa voló y el aceite caliente comenzó a arder al entrar en contacto con la at-



Fig. 4: Ensayos de fallos con arco de alta energía con a) Aceite mineral y b) Éster natural de girasol alto oleico

mósfera (Fig. 4a). En el ensayo correspondiente al éster natural alto oleico, simplemente hubo una fuga por la tapa expulsándose una pequeña cantidad de aceite carbonizado y vaporizado, pero no hubo fuego (Fig. 4b).

La mejora de la seguridad contra incendios puede ser un factor determinante para mantener en funcionamiento subestaciones antiguas que no cumplen con las regulaciones más modernas. Por lo tanto, el rellenado de transformadores con éster natural se convierte en una opción interesante en unidades existentes, al poderse realizar la sustitución en campo (Fig. 5).



Fig. 5: Transformador de 69-kV preparándose para el rellenado en campo con éster natural alto oleico.

2.3.3. Mejora del funcionamiento

Los ésteres naturales son hidrófilos por naturaleza y tienen un límite de saturación del agua entre 5 y 8 veces mayor que el del aceite mineral en condiciones de funcionamiento normales (Fig. 6). Sin embargo, los ensayos han demostrado que incluso con un contenido de humedad de 500 ppm, la rigidez dieléctrica de los ésteres naturales sigue estando dentro de los límites estándar. Como consecuencia del mayor límite de saturación del agua en los ésteres naturales, los aislamientos de celulosa mantienen una humedad menor (el agua se mueve entre la celulosa y el éster natural hasta alcanzar la misma saturación relativa en cada material). El resultado de esta menor humedad del papel aislante es una reducción de su velocidad de degradación a menos de la mitad comparada con la del papel aislante impregnado en aceite mineral [10]. La reacción química del agua generada durante el proceso de envejecimiento de la celu-

Colaboración

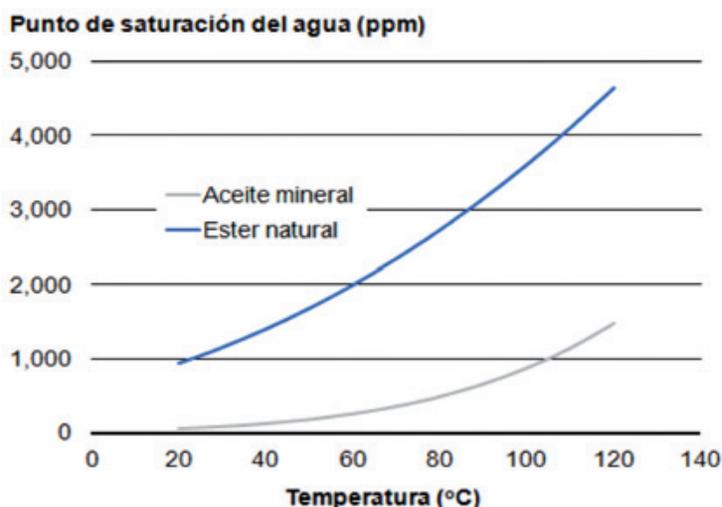


Fig. 6: Resultados del ensayo de solubilidad del agua en función de la temperatura

losa con los ésteres naturales (hidrólisis) produciendo ácidos grasos libres, así como el cambio que se produce en la estructura de la celulosa a través de otra reacción química con estos ácidos grasos libres (trans-esterificación) han demostrado que contribuyen también a prolongar la vida del aislamiento de celulosa cuando ésta envejece en ésteres naturales [11].

En [10], los autores presentaron un estudio de varios ensayos llevados a cabo por diferentes laboratorios de investigación en todo el mundo comparando el comportamiento del envejecimiento de la celulosa sumergida en aceite mineral y en éster natural. Este estudio muestra que se pueden permitir calentamientos más elevados en transformadores llenos con éster natural en comparación con transformadores similares llenos con aceite mineral.

Una alternativa aun más efectiva para construcción de transformadores compactos y reducir las dimensiones de las celdas de los transformadores de una subestación, es la combinación de aislamientos de alta temperatura y ésteres naturales. Los autores en [12] han resuelto los requisitos de limitación de espacio y de aumento de potencia de su instalación mediante el diseño de un transformador de 40/50 MVA (KNAN / KNAF) con las mismas dimensiones físicas que el transformador original de 20/30 MVA (ONAN / ONAF),

mientras que en [13], los autores consiguieron un aumento de potencia de 15 a 25 MVA con la misma cuba y núcleo del transformador original. Estos ejemplos ilustran el potencial real de reducción de tamaño de los transformadores.

En la misma línea, se pueden diseñar subestaciones móviles más compactas y transportarlas con menor riesgo llenas con un líquido de alto punto de combustión y biodegradable (Fig. 7).

2.3.4. Prolongación de la vida útil

Alternativamente, el mismo estudio [10] también muestra que se puede prolongar la vida del aislamiento de



Fig. 7: Subestación móvil de 138-kV llena de éster natural alto oleico

celulosa del transformador. El papel de celulosa utilizado para aislar los arrollamientos del transformador es el principal factor determinante de la vida útil del transformador. Mientras está en funcionamiento, el papel de celulosa está sometido a tensiones térmicas, eléctricas, y mecánicas. La conservación de su resistencia mecánica, la cual está relacionada con la capacidad del transformador para soportar faltas fuertes, es uno de los parámetros más utilizados para supervisar el estado de envejecimiento del transformador.

El envejecimiento del papel de celulosa se determina por varios factores relacionados con el mantenimiento y con las condiciones de funcionamiento del transformador. Si se siguen unas prácticas de mantenimiento adecuadas, el ciclo de carga del transformador y la curva de temperatura resultante son las variables más importantes que rigen el envejecimiento del papel de celulosa.

La relación de Arrhenius muestra, por ejemplo, que la vida de la celulosa

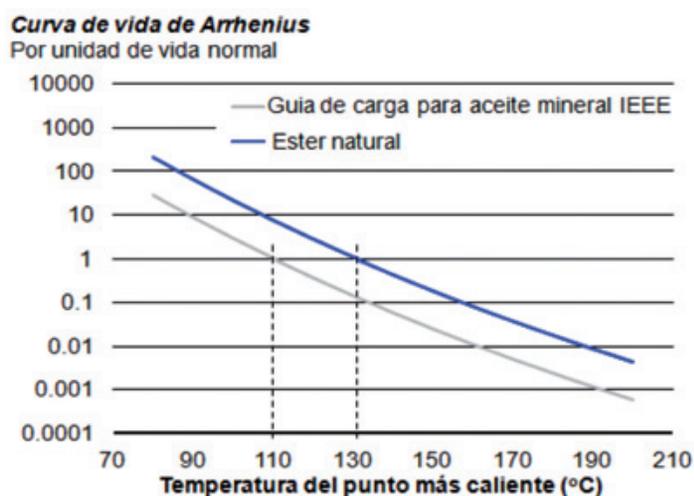


Fig. 8: Comparación de la curva de vida de Arrhenius para aceite mineral y éster natural

puede duplicarse por cada 6 ó 7 °C de disminución de la temperatura de punto caliente cuando está en un rango de operación del transformador de entre 80 y 100 °C [14]. La mayor capacidad térmica del papel de celulosa inmerso en éster natural dará como resultado una tasa de envejecimiento menor que cuando el mismo papel de celulosa está inmerso en aceite mineral. La fig. 8 muestra la relación de Arrhenius para la celulosa en aceite mineral según la guía de carga IEEE C57.91 y su comparación con su homóloga en éster natural.

Aunque en este capítulo las características únicas del éster natural de girasol alto oleico hayan sido presentadas por separado, en un transformador real están todas ellas presentes simultáneamente, tanto en un transformador nuevo como en uno existente relleno con éster natural. En [13], un usuario final de transformadores enfatiza cómo la solución con éster natural cumplió con su expectativa original de incrementar la capacidad de sobrecarga y la seguridad contra incendios, mientras que al mismo tiempo hizo frente a sus preocupaciones sobre contaminación del suelo y del agua.

3. IMPACTO EN EL DISEÑO DEL TRANSFORMADOR

Mientras que las características de biodegradabilidad de los ésteres naturales, su comportamiento al fuego y el envejecimiento del aislamiento de celulosa benefician en gran medida a los usuarios del transformador, los diseñadores y fabricantes tienen sin embargo que adaptar sus reglas de diseño y sus procesos a las diferencias entre las propiedades del aceite mineral y las de los ésteres naturales.

3.1. COMPORTAMIENTO DIELECTRICO

En ensayos de laboratorio con tensiones transitorias, la tensión de perforación de los ésteres naturales es comparable a la del aceite mineral en cortas distancias. Sin embargo, en distancias más largas, la tensión de perforación de los ésteres naturales es notablemen-

te menor que la del aceite mineral. Las diferencias se pueden encontrar también en la velocidad del 'streamer', la tensión de aceleración y la transición al evento rápido [15]. El principal factor que regula la velocidad de propagación del 'streamer' en los ésteres naturales y en el aceite mineral es la amplitud de la tensión aplicada. Con aumento de tensión, la propagación del 'streamer' puede cambiar de un modo lento, con una velocidad de menos de 5 km/s, a un modo rápido, con una velocidad superior a 10 km/s y hasta del orden de 100 km/s. La tensión de aceleración para la transición al evento rápido en ésteres naturales es notablemente menor que la de aceite mineral.

El fabricante del transformador debe conocer las similitudes y las diferencias en el comportamiento dieléctrico de los diferentes fluidos y debe abordarlos con las normas de diseño adecuadas. Despreciando estas diferencias se aumenta el riesgo de fallo dieléctrico durante los ensayos finales o durante el funcionamiento.

Aunque estas diferencias tienen su impacto en el diseño del transformador, una vez que el transformador está diseñado con las reglas correctas, el funcionamiento dieléctrico de un transformador lleno con ésteres naturales es tan bueno como el de un transformador convencional lleno de aceite mineral y no necesita protección adicional.

3.2. VISCOSIDAD

La viscosidad del éster natural es mayor que la del aceite mineral y requiere una cierta consideración en el diseño del transformador. Cuando se compara con el aceite mineral, la circulación del éster natural a través de los arrollamientos, del núcleo y del equipo de refrigeración del transformador es más lenta, dando lugar a un aumento relativo de las temperaturas del líquido superior, así como la de los arrollamientos y del núcleo. Al mismo tiempo, los ésteres naturales tienen una

mayor conductividad térmica y ligeramente mayor capacidad calorífica que el aceite mineral. Sin embargo, estas mejores propiedades térmicas sólo compensan ligeramente el impacto de la mayor viscosidad de los ésteres naturales [16].

La viscosidad también varía con la temperatura. Cuanto mayor sea la temperatura, más parecida será la viscosidad de los ésteres naturales a la del aceite mineral. A bajas temperaturas, la diferencia va en aumento hasta que los líquidos se solidifican. El punto de congelación del aceite mineral es típicamente inferior a -40 °C mientras que el de los ésteres naturales está en el intervalo desde -15 °C hasta -25 °C. Aunque el comportamiento dieléctrico de los ésteres naturales no se ve influenciado por el cambio de estado, puede requerirse un procedimiento especial de arranque en frío a muy bajas temperaturas.

También es importante mencionar que el aumento de la viscosidad observada en el proceso de oxidación de los ésteres naturales se puede utilizar para determinar el grado de deterioro del fluido con el tiempo. La composición de ácidos grasos de cada éster natural específico determinará su estabilidad a largo plazo. Dependiendo de la aplicación considerada, puede valer la pena evaluar el efecto del calor, del oxígeno y / o de la luz (ultravioleta e infrarrojo) en la viscosidad del fluido con el fin de seleccionar el éster más adecuado.

3.3. LIMITES DE CALENTAMIENTO

El beneficio en la prolongación de la vida del aislamiento de celulosa impregnado en ésteres naturales ha motivado a varios investigadores a cuantificar e investigar su origen. Mediciones recientes muestran una ventaja de hasta 20 °C en el calentamiento de transformadores con aislamiento de celulosa impregnados en éster natural. En base a estos datos, los límites máximos

Calentamiento del líquido superior (K)	90
Calentamiento medio de los arrollamientos (K)	80
Calentamiento del punto caliente de los arrollamientos (K)	95

Tabla 2: Propuesta de límites de calentamiento en transformadores según IEC impregnados en éster natural

de calentamiento de transformadores impregnados en éster natural, podrían incrementarse hasta los valores dados en la Tabla 2.

4. RELLENADO DE TRANSFORMADORES EXISTENTES

Por una serie de razones que van desde los beneficios al medio ambiente hasta el cumplimiento de las regulaciones de seguridad contra incendios, los ésteres naturales se han utilizado para el relleno de transformadores ya en funcionamiento. El relleno de transformadores de potencia requiere una evaluación de ingeniería cualificada, ya que se deben tener en cuenta consideraciones de diseño por las diferencias existentes entre el aceite mineral y tales líquidos alternativos [8].

Cuando se dispone de información detallada del diseño del transformador, se puede aplicar el conocimiento, las herramientas y las reglas desarrolladas para el diseño de transformadores con éster natural, para predecir con exactitud el funcionamiento del transformador relleno con el líquido alternativo. Sin embargo, la información de diseño suele ser confidencial y no siempre es fácil de conseguir. En tal caso, se deben hacer evaluaciones técnicas para estimar el rendimiento del transformador con éster natural. Una posibilidad, por ejemplo, es el uso de los protocolos de ensayos en fábrica para estimar la distribución del flujo de calor interno entre los arrollamientos y así predecir el impacto de las diferentes propiedades de los líquidos en las temperaturas de los arrollamientos y del aceite.

Antes del relleno, es también importante verificar el estado general del transformador, así como la fiabilidad de los componentes instalados. Es necesario a este respecto hacer análisis del aceite y ensayos en campo adicionales que proporcionen una nueva línea a seguir para la futura supervisión y mantenimiento del transformador. El proceso de intercambio de líquido necesita controlarse bien con el fin de minimizar el volumen de aceite mineral residual en el transformador. Aunque el aceite mineral y los ésteres natura-

les son completamente miscibles, una cantidad elevada de aceite mineral residual (normalmente más de 6-7%) puede reducir el punto de combustión del éster natural por debajo de 300 °C y por lo tanto perder su condición de "menos inflamable" y su clasificación K de peligro de incendio.

5. CONCLUSIONES

Los ésteres naturales originalmente fueron desarrollados como una alternativa ecológica y de alto punto de combustión, a los transformadores sumergidos en aceite mineral, pero también han demostrado poseer características adicionales para afrontar los retos actuales en la industria de la energía más allá de la seguridad y los aspectos verdes. Mayor vida útil de los equipos para retrasar la reinversión, mayor potencia para aumentar su rentabilidad o para cumplir sistemáticamente con la demanda creciente de energía, transformadores compactos para incrementar la capacidad sin aumento de las dimensiones de la subestación (especialmente útil para las plataformas -offshore-) y mejorar la seguridad de la subestación en general, son sólo algunos ejemplos de las mejoras proporcionadas por el uso de los ésteres naturales en los transformadores.

Las referencias actuales de aplicaciones con ésteres naturales abordan una variedad de preocupaciones y necesidades de los usuarios. También se ha discutido el impacto de estas características únicas en el funcionamiento del transformador y las consideraciones que se deben tener en cuenta al diseñar el transformador, así como en la selección del éster natural adecuado para una operación duradera del transformador. Esta discusión debe apoyar a los usuarios finales de transformadores en la evaluación de los ésteres naturales en comparación con otros líquidos alternativos, así como para comprender las diferencias existentes entre los diferentes ésteres naturales disponibles en el mercado para que puedan especificar y seleccionar el producto adecuado.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al grupo de expertos de todo el mundo así como a los autores referenciados, los cuales han investigado nuevas soluciones y han hecho posible la aplicación de los ésteres naturales en transformadores nuevos y en servicios de transformadores.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Clark FM. "Insulation Materials for Design and Engineering Practice", McGraw-Hill, New York, 1962
- [2] Mومmine I et al., "Vegetable Oil as an Impregnant in HV AC Capacitors", in Proceedings of the IEEE 5th International Conference on Breakdown in Solid Dielectrics, pp. 611-615, 1995
- [3] Oommen TV and Claiborne CC. "Biodegradable Insulating Fluid from High Oleic Vegetable Oils", Cigré General Session, Paris, France, 1998
- [4] Lucas EW and Rhee KC, "Animal and Vegetable Fats, Oils and Waxes", Riegel's Handbook of Industrial Chemistry, Van Nostrand-Reinhold, New York, 1992
- [5] Lin SS. "Introduction to Fats and Oils Technology", AOCS Publication, pp. 211-231, 1997
- [6] Viertel J, Ohlsson K, and Singha S. "Thermal Aging and Degradation of Thin Films of Natural Ester Dielectric Liquids", IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Trondheim, Norway, 2011
- [7] "Environmental Technology Verification Report on BIOTEMP®, Vegetable Oil-Based Insulating Dielectric Fluid", California Environmental Protection Agency, Department of Toxic Substances Control, Office of Pollution Prevention and Technology Development, (DTSC R-02-03/EPA 600/R-02/043), June 2002
- [8] "Experiences in Service with New Insulating Liquids", Cigré Brochure 436, Working Group A2.35, October 2010
- [9] FM Global Property Loss Prevention Data Sheets, Transformers, May 2010
- [10] Frimpong GK, Oommen TV, and Asano R. "A Survey of Aging Characteristic of Cellulose Insulation in Natural Ester and Mineral Oil", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 27, No. 5, pp. 36-48, 2011
- [11] Yang L, et al. "Influence of vegetable oil on the thermal aging rate of Kraft paper and its mechanism," International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), New Orleans, USA, October 2010
- [12] Hrkac M et al., "BIOTEMP® Transformer Technology for Innovative Compact Substation", 7th Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, Cyprus, 2010
- [13] Mendes JC et al., "Advanced Application of a Natural Ester Vegetable Oil in a HV Power Transformer", Cigré General Session, Paper A2-101, Paris, France, 2008
- [14] Oommen TV and Prevost T. "Cellulose insulation in oil-filled power transformers: Part II - Maintaining insulation integrity and life," Electrical Insulation Magazine, Vol. 22, No. 2, pp. 5-14, 2006
- [15] Liu R et al., "Fast Streamer Propagation in Transformer Oil and Ester Liquids", Nordic Insulation Symposium (Nord-IS), Gothenburg, Sweden, 2009
- [16] Girgis R, Bernesjo M, and Frimpong GK, "Detailed Performance of a 50 MVA Transformer filled with a Natural Ester Fluid versus Mineral Oil", Cigré General Session, Paper A2-107, Paris, France, 2010.