

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**EVOLUCIÓN Y DESEMPEÑO DE MATERIALES DIELECTRICOS
EN LA FABRICACIÓN DE CONDENSADORES**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

ROSA MILAGROS ALBA PINTO

**PROMOCIÓN
2001 - I**

**LIMA – PERÚ
2006**

**EVOLUCIÓN Y DESEMPEÑO DE MATERIALES DIELECTRICOS EN
LA FABRICACIÓN DE CONDENSADORES**

A mis primeros y constantes
maestros que tuve: mis padres.

A mis profesores y maestros
de todos los niveles docentes.

A mis compañeros de Universidad, quienes
con su inquietud, preguntas y trabajos en grupo,
formaron la base de los temas tratados en este informe.

SUMARIO

En la actualidad los costos de operación de las empresas se incrementan continuamente. La energía, un recurso fundamental para el progreso y la expansión industrial, no escapa a la tendencia del incremento de su costo, pues es el recurso energético mas usado, los hidrocarburos, presentan una situación de agotamiento gradual que lo hace día a día más costoso.

Una de las medidas al alcance de las empresas para conocer el grado de eficiencia con el cual está utilizando dicha energía es el llamado factor potencia y son los condensadores de potencia los elementos que corrigen este factor, lo que deriva en librar a un sistema de la corriente adicional innecesaria que circula por los transformadores y otros equipos importantes del mismo. Con un factor de potencia alto se utiliza más eficazmente la energía comprada. La economía se beneficia por las bajas tarifas aplicadas por algunas empresas de servicio eléctrico a los usuarios que operan con un alto factor de potencia. Se logra un ahorro considerable al no tener que pagar las penalidades o multas.

En este informe se describe la aplicación de los condensadores de potencia, evolución, características y ventajas de los materiales dieléctricos, tipos de condensadores, características y desempeño de los mismos, pruebas de diseño y para la puesta en servicio y/o verificación de funcionamiento.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I: GENERALIDADES	2
1.1 Consideraciones.	2
1.1.1 Descripción de Condensadores de Potencia.	2
1.1.2 Los tipos de condensadores de potencia.	2
1.1.3 Aplicación de condensadores de potencia.	3
1.1.4 El dieléctrico de condensador de potencia permisible.	3
1.2 Mantenimiento e Inspección	3
1.2.1 Asegurando la desenergización segura del condensador.	3
1.2.2 Programación de la inspección del condensador de potencia.	4
1.2.3 La ventilación de condensadores de potencia.	4
1.2.4 La influencia de temperatura en el condensador de potencia.	4
1.2.5 La influencia de la exposición en los condensadores de potencia.	5
1.2.6 La influencia de tensión en los condensadores de potencia.	5
1.2.7 Los fusibles para los condensadores de potencia.	5
CAPÍTULO II: EVOLUCIÓN DEL DIELECTRICO DE LOS CONDENSADORES DE POTENCIA	7
2.1 Abstracto	7
2.2 Historia	7
2.2.1 El desarrollo de Dieléctrico: Papel Aislante	7
2.2.2 El desarrollo del Dieléctrico: Aceite aislante	11
2.2.3 Papel/Aceite	13
2.2.4 Papel / PCB	14
2.2.5 Papel/Film/PCB	15
2.3 Materiales de hoy	16
2.3.1 Dieléctricos Líquidos	16
2.3.2 Dieléctricos sólidos	19

2.4	Futuro	21
2.4.1	Sólidos	21
2.4.2	Líquidos	24
2.4.3	Construcción	24
2.4.4	Diseño del doblado del borde de la lámina	25
2.4.5	La influencia de aditivos en los fluidos	25
CAPÍTULO III: EVOLUCIÓN DE LOS CONDENSADORES DE POTENCIA		26
3.1	Los condensadores OF	27
3.2	Los condensadores de papel dieléctrico	30
3.3	Los condensadores combinados papel/film	31
3.4	Los Condensadores de film	32
3.4.1	Avances en los condensadores	33
3.5	Condensadores con cubierta metálica	35
3.6	Los Condensadores all-film	36
3.7	Los condensadores de film auto regenerables	39
3.8	Banco de Condensadores	42
3.9	Banco de Condensadores Compactos	44
3.10	Influencias de la lámina del electrodo	46
3.11	Investigaciones en la resistencia dieléctrica	47
3.12	Protección contra ruptura de la Caja del condensador	48
3.13	Diagnóstico de los condensadores de potencia	49
3.14	Adelanto de la unidad del condensador	50
3.15	Desempeño en servicio de los condensadores de potencia (ejemplo de la red de Alta Tensión del Nuevo Sur de Gales)	51
CAPÍTULO IV: PRUEBAS DE LOS CONDENSADORES DE POTENCIA		54
4.1.	Pruebas de Diseño	54
4.1.1	Prueba de descargas parciales	54
4.1.2	La prueba de sobretensión momentánea	56
4.2.	Pruebas para verificación de funcionamiento de condensadores de potencia	58
4.2.1	Las pruebas del campo para los condensadores de potencia.	58
4.2.2	Las pruebas terminales de condensadores de potencia.	59
4.2.3	Las pruebas de la gotera de condensadores de potencia.	61

CONCLUSIONES

62

BIBLIOGRAFÍA

63

PRÓLOGO

Este informe sobre condensadores de potencia es una recopilación de notas y tiene por objeto servir como texto de consulta para el estudio de los condensadores de potencia.

En general, el informe ha tratado en forma didáctica el estudio de los condensadores. El informe está subdividido en los siguientes capítulos:

En Capítulo I; Generalidades, describe a los condensadores, tipos de conexiones de los mismos, aplicaciones, consideraciones para la desenergización, inspección, consideraciones ambientales para el montaje de los mismos.

En Capítulo II; Se revisa la evolución histórica de los dieléctricos, fluidos impregnantes y las características de los dieléctricos líquidos y sólidos del futuro.

En Capítulo III; Se revisa la evolución y desempeño de los condensadores, características de los mismos.

En Capítulo IV; Pruebas, se revisa las pruebas de diseño y pruebas de campo para la puesta en servicio de los condensadores.

Al final del informe existe una bibliografía, en la que se enlista las obras que se puede consultar si se desea ampliar los conceptos sobre algún tema.

CAPÍTULO I GENERALIDADES

1.1 Consideraciones.

1.1.1 Descripción de Condensadores de Potencia.

Los condensadores de potencia se utilizan en los sistemas eléctricos de distribución proporcionando una fuente estática de corriente reactiva en adelanto. Los condensadores de potencia normalmente consisten de elementos de láminas de aluminio, papel, o film-aislado sumergidas en un fluido aislante biodegradable y un recipiente metálico sellado. Dependiendo del tamaño y rango, están disponibles como monofásicos o trifásicos. Los condensadores de potencia son para una frecuencia fundamental, tensión y capacidad en kVAR (kilovoltamperes-reactivo). Pueden conectarse como unidades individuales o grupales para proporcionar bancos de varias capacidades y rangos de tensión.

1.1.2 Los tipos de condensadores de potencia.

Los términos "condensador en serie" y "condensador Shunt" son usados para identificar el tipo de conexión y no indican una diferencia en la construcción del condensador de potencia.

a. Condensadores de potencia en Serie. El condensador de potencia en serie se usa fundamentalmente para la regulación de tensión y su aplicación es muy limitada en sistemas eléctricos de distribución. En la aplicación usual para el servicio de potencia, el rango en kVAR del condensador en serie es demasiado bajo para mejorar el factor de potencia significativamente.

b. Condensador de potencia Shunt. El condensador de potencia shunt es un reactancia capacitiva en paralelo a una carga o sistema eléctrico y es fundamentalmente el que proporciona el mejoramiento del factor de potencia. Los beneficios de la mejora de los niveles de tensión, ampliación de la capacidad del

sistema, reducción de las pérdidas del sistema, y la reducción en la facturación de potencia, provienen de la mejora en el factor de potencia.

1.1.3 Aplicación de condensadores de potencia.

Los condensadores Shunt son usados en los circuitos de distribución para reducir la carga en kVA de un circuito de factor de potencia bajo. El condensador shunt fijo se usa para mejorar el nivel de tensión y el condensador shunt variable se usa para mejorar la regulación de tensión. Las instalaciones del condensador generalmente serán conectadas en estrella aterrada debido a los efectos indeseables de otras conexiones. Todos los bancos de condensadores deben equiparse con un instrumento para desconectarlos del sistema eléctrico. Algunos sistemas utilizan las conexiones no aterradas para minimizar la interferencia y porque esta conexión es considerada fácil de proteger con fusibles.

1.1.4 El dieléctrico de condensador de potencia permisible.

Los condensadores que contienen el bifenilo policlorado (PCB) deben de haber estado dispuestos bajo los procedimientos de la Agencia de la Protección del ambiente para llevar a cabo el Acto de Mando de Substancias Tóxicas de 1976. Si no fueron dispuestos, deben de haber sido marcados por contener PCB. ANSI/IEEE 18 requiere una identificación del impregnante visible desde tierra con un color adhesivo designado como líquido sin PCB.

1.2 Mantenimiento e Inspección

1.2.1 Asegurando la desenergización segura del condensador.

Los condensadores retienen carga después de que son desenergizados. Después de que los condensadores son desenergizados, requieren 5 minutos por lo menos de descarga y entonces ponen en cortocircuito los terminales del condensador a tierra y entre ellos. Estas provisiones deben permanecer hasta que el trabajo en la instalación esté completo. Aunque la mayoría de condensadores de potencia tiene una resistencia de descarga instaladas para descargarlos automáticamente después de que ellos están desconectados del circuito, no es aconsejable depender completamente de tales resistencias por seguridad.

1.2.2 Programación de la inspección del condensador de potencia.

La inspección inicial debe hacerse dentro de 24 horas después de haberse energizado una nueva instalación del condensador. Esta inspección debe hacerse en un momento de la tensión máxima del circuito, normalmente durante el primer período de baja carga. Además de las observaciones visuales, esta inspección debe incluir lecturas de tensión y corriente para asegurar que las tensiones y corrientes no excedan los límites de rango del condensador. Los kVAR de operación (la suma de kVAR de frecuencia fundamental y cualquier kVAR de frecuencia armónica) no deben exceder 135% del rango del condensador. Debe lograrse un mantenimiento e inspección rutinaria por lo menos cuatro veces por año.

1.2.3 La ventilación de condensadores de potencia.

Los condensadores de potencia son muy eficaces pero generan calor que debe ventilarse adecuadamente. Se debe asegurar que la corriente de aire alrededor de las unidades del condensador individuales no se obstruya. Tener sobre todo el cuidado de verificar el banco de condensadores verticalmente, donde el aire calienta alrededor de las unidades más bajas y sube a las unidades de encima. Las cajas inadecuadamente ventiladas en las instalaciones pueden producir temperaturas excesivas de operación.

1.2.4 La influencia de temperatura en el condensador de potencia.

Los condensadores de potencia modernos son diseñados para operar a una máxima temperatura ambiente dada en la Tabla N° 1.1 (la cual ocurre a tensión y frecuencia nominal y mientras esté sometido a los rayos directos del sol). Las condiciones que resultan en altas temperaturas de operación pueden dañar el aislamiento y deben de evitarse. Los condensadores son diseñados para operación continua a una máxima temperatura ambiente de 40°C. Los condensadores que son normalmente desenergizados u operados intermitentemente por debajo de una temperatura ambiente de -20°C, deben inspeccionarse cuidadosamente. A temperaturas sumamente bajas el aislamiento líquido puede cristalizarse lo cual decrece la resistencia del aislamiento y una falla

puede ocurrir cuando el condensador es reenergizado. Para instalaciones donde la temperatura baja es un problema, los condensadores deben de permanecer energizados.

1.2.5 La influencia de la exposición en los condensadores de potencia.

Debe tenerse cuidado para eliminar o minimizar la exposición de los condensadores a humos perjudiciales o vapores, la humedad, ambiente salino, la contaminación, o vibración. Si el condensador está corroído u oxidado se embala, se limpia las monturas y debe de pintarse. Los bushings del condensador y los soportes de barra, están sujetos a la acumulación de polvo o a materiales externos, deben de limpiarse periódicamente. Los intervalos dependerán de la severidad de las condiciones de trabajo.

1.2.6 La influencia de tensión en los condensadores de potencia.

Los condensadores shunt causan un aumento de tensión en el punto donde han sido instalados y son probables que operen con sobretensiones. Los condensadores son diseñados para operar continuamente hasta 110% de la tensión nominal eficaz; siempre que la tensión pico, incluyendo todo los armónicos, no exceda 1.2 veces la raíz cuadrada de 2 veces la tensión nominal eficaz; y siempre que el 135% de kVAR nominal máximo permisible no sea excedido. Desde que la operación del condensador sobrepasa los límites de tensión y temperatura puede acortar su vida, la tensión debe verificarse periódicamente para asegurar que está dentro de los límites de diseño.

1.2.7 Los fusibles para los condensadores de potencia.

Un fusible del condensador no se usa para protección de sobrecarga de la misma manera como un fusible se usa para protección de sobrecarga de otro aparato eléctrico. El rango de corriente tiene que permitir la corriente de entrada y la capacidad del fusible del condensador típicamente se encuentra entre el 165 a 250% de la capacidad actual del condensador. Los rangos de los fusibles siempre deben ser recomendados por el fabricante, desde que la característica tiempo-corriente del fusible debe coincidir característica tiempo-corriente de ruptura-tanque. La fusión de un fusible apropiadamente dimensionado puede indicar una

falla del condensador, así como una sobrecorriente del circuito en la condición de operación. Cuando una inspección revela la fusión, no se debe reemplazar los fusibles hasta que un chequeo determine que el condensador aún está servible. Cuando se reemplazan los fusibles, se debe estar seguro que son de la capacidad de tensión y corriente apropiadas y conformes con las recomendaciones del fabricante.

Tabla N° 1.1 Máxima temperatura ambiente para operación continua

Disposición de montaje	La temperatura aérea ambiente en °C	
	Promedio 24 horas	Normal Anual
Condensador aislado	46	35
Una sola fila de condensadores	40	25
Múltiples filas de condensadores	35	20
Caja de metal o alojamiento de equipos	35	20

CAPÍTULO II

EVOLUCIÓN DEL DIELECTRICO DE LOS CONDENSADORES DE POTENCIA

2.1 Abstracto

El desarrollo histórico de los materiales dieléctricos para los condensadores de potencia será visto. Los dieléctricos sólidos han evolucionado de papel celulosa derivado de la reciente vida vegetal a los polímeros sintéticos derivados de la antigua vida vegetal (depósitos de petróleo). Los líquidos dieléctricos también han sufrido cambios mayores a través de los años. La necesidad de encontrar alternativas al Bifenilo Policlorado a mediados de los años setenta llevó a los adelantos en la comprensión de principio y síntesis de fluidos con mejoramiento de las características. Los fabricantes continúan ofreciendo los condensadores de potencia fiables a bajo costo a través de sus esfuerzos cuidadosamente armados combinados apropiadamente con materiales dieléctricos en partículas cercanas libres del medio ambiente. Las tecnologías actuales se presentarán a lo largo de este capítulo junto con una discusión de direcciones futuras.

2.2 Historia

El primer uso de condensadores en los circuitos de potencia empezó aproximadamente en 1920. Estos condensadores se usaron en plantas industriales donde la mejora en el factor de potencia resultó en una reducción en la facturación. Estas primeras instalaciones no tuvieron mucho éxito por la baja calidad de materiales y procesos que dieron baja fiabilidad, entonces la búsqueda por mejores materiales comenzó.

2.2.1 El desarrollo de Dieléctrico: Papel Aislante

En cuanto al papel aislante usado como un dieléctrico del condensador, las propiedades como la resistencia tensora adecuada, grosor uniforme, alta resistencia dieléctrica, baja pérdida del dieléctrico, la alta constante dieléctrica y

pureza son requeridas para garantizar las características eléctricas excelentes cuando el papel se impregna con el aceite. El papel Kraft se desarrolló del papel de cable OF (oil-filled: relleno de aceite) casi satisfaciendo los requisitos arriba mencionados y fue usado en una etapa temprana de fabricación de los condensadores OF.

Para mejorar las propiedades del dieléctrico de papel impregnado con aceite, fueron analizadas teóricamente y experimentalmente las propiedades del dieléctrico. La constante dieléctrica de la fibra de papel y los efectos de la densidad del papel en la constante dieléctrica y la $\tan \delta$ del papel impregnado con aceite fueron aclaradas, como se muestra en las Figs. N° 2.1, 2.2, y 2.3 respectivamente. La Fig. N° 2.3, muestra que la pérdida del dieléctrico de papel impregnado con aceite puede mejorarse reduciendo la densidad del papel. La baja densidad, la alta impermeabilidad del papel aislante, el cual no sólo tiene una más baja pérdida dieléctrica causada por la más baja densidad pero también una más alta resistencia dieléctrica causada por más alta impermeabilidad, fue inventada en 1956.

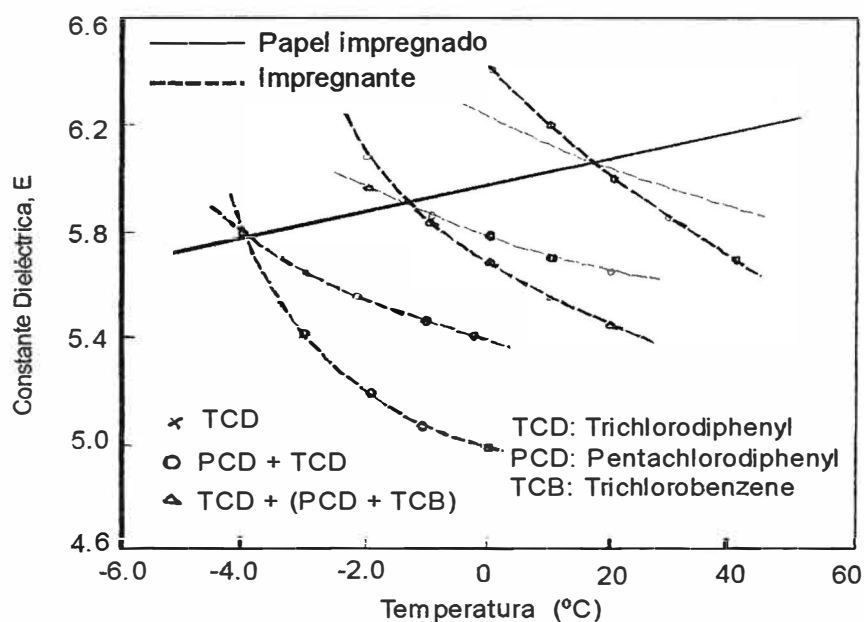


Fig. N° 2.1 Constante dieléctrica de fibra de papel (ϵ)

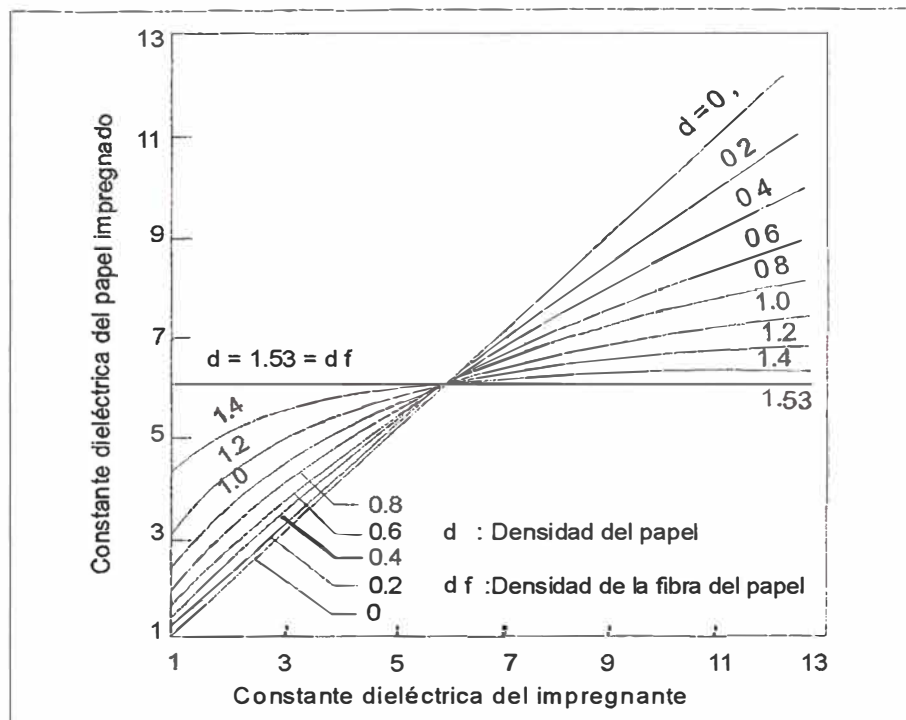
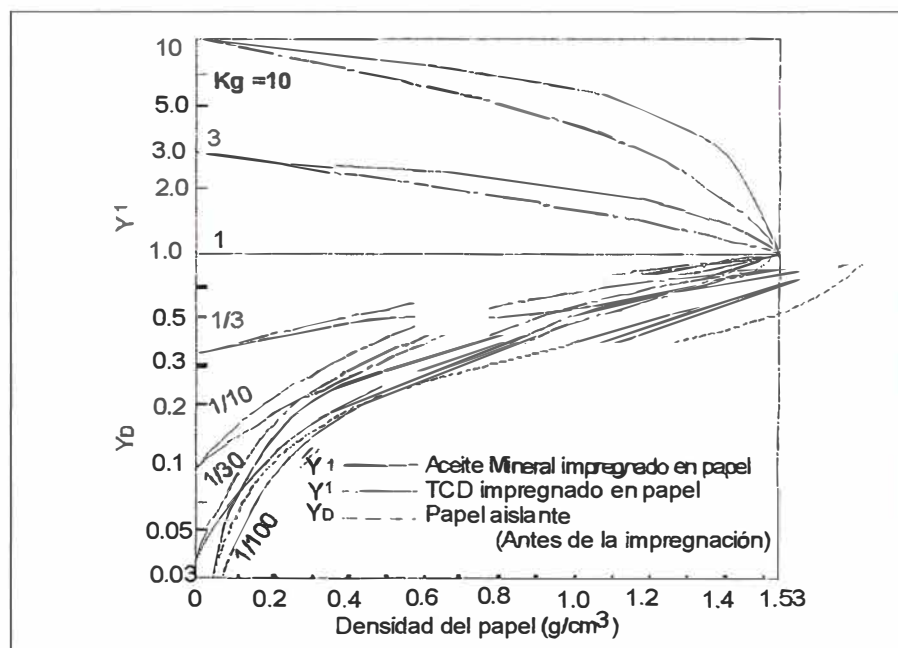


Fig. N° 2.2 Relación entre la constante dieléctrica del papel impregnado con aceite y el impregnante



$$\begin{aligned}
 Y_D \tan \delta_f &= \tan \delta_f: \tan \delta \text{ del papel aislante} \\
 Y_1 \tan \delta_f &= \tan \delta_i: \tan \delta \text{ del papel impregnado en aceite} \\
 K_5 \tan \delta_f &= \tan \delta_i: \tan \delta \text{ del aceite aislante} \\
 \tan \delta_f &= \tan \delta \text{ del fibra de papel}
 \end{aligned}$$

Fig. N° 2.3 Relación entre la pérdida del dieléctrico papel impregnado en aceite y la densidad del papel

Sin embargo, lo más esencial para mejorar las propiedades del dieléctrico de fibra de papel es obtener aun, un mejor papel aislante; muchas investigaciones se hicieron para aclarar los efectos de contenidos impuros en el papel, como el hemicelulosa, lignina, y los iones metálicos.

De los resultados de esta investigación, se puso en claro que la hemicelulosa y lignina afectaron la pérdida del dieléctrico del papel aislante diferentemente a altas y bajas temperaturas, y la extracción de estas impurezas significativamente mejora las pérdidas a bajas temperaturas.

La hemicelulosa es más eficazmente extraída por un método especial de cocción de la pulpa. Aplicando el método de la producción industrial del papel, la $\tan \delta$ del papel impregnado con aceite a una temperatura por debajo de 80°C fue mejorada como se muestra en la mostrado en Fig. N° 2.4

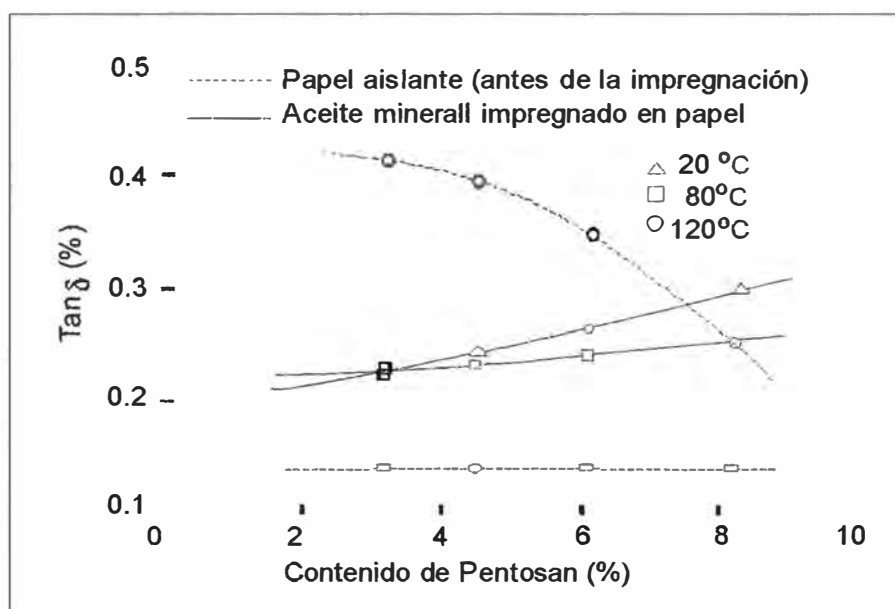


Fig. 2.4 Mejora de la $\tan \delta$ de papel aislante y papel impregnado en aceite mineral por el método especial de cocción de la pulpa

La pérdida del dieléctrico a altas temperaturas se relaciona principalmente a las conducciones iónicas y puede ser mejorada disminuyendo iones o intercambiando los cationes monovalentes con iones multivalentes. Aplicando el agua purificada para lavar la pulpa, la $\tan \delta$ del papel impregnado con aceite a alta temperatura fue mejorada como se muestra en la Fig. N° 2.5.

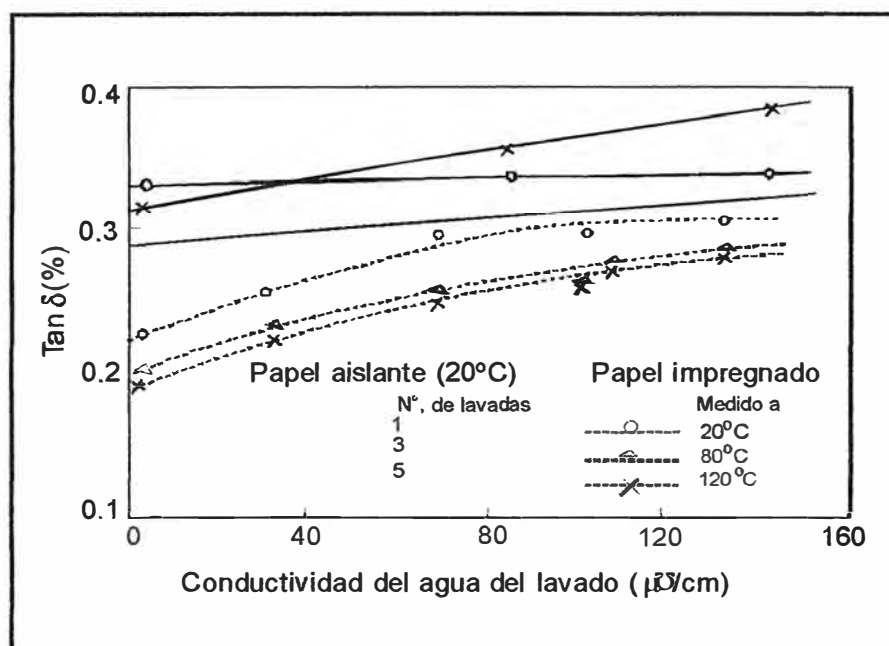


Fig. N° 2.5 Mejora de la $\tan \delta$ de papel aislante y papel impregnado en aceite mineral por el lavado de agua de pulpa

2.2.2 El desarrollo del Dieléctrico: Aceite aislante

En cuanto a los impregnantes de los condensadores de potencia, las propiedades como una constante dieléctrica alta, alta resistencia dieléctrica, buena afinidad química con el aislamiento del papel, la estabilidad química y térmica, y una adecuada viscosidad para la circulación de enfriamiento son requeridas. Cuando los condensadores OF eran por primera vez fabricados, el aceite mineral parafínico importado fue usado como aceite aislante. Sin embargo, se aclaró que la capacidad de absorción del gas hidrógeno del aceite era muy pobre, los aceites minerales, los cuales tienen la capacidad superior de absorción del gas, eran investigados. Como resultado, el aceite mineral naphthenic doméstico de una capacidad superior a la absorción del gas, fue desarrollado y adoptado en 1935. La capacidad de absorción del gas hidrógeno se consideraba que era una propiedad importante para la alta resistencia del dieléctrico de papel impregnado con aceite, y la capacidad de varios aceites minerales se probó usando un pequeño condensador de prueba como se muestra en la Fig. N° 2.6. Se encontró que la capacidad de absorción del gas tenía una relación íntima con los contenidos de los componentes del aceite, sobre todo el contenido de componentes aromáticos, como se muestra en la Fig. N° 2.7.

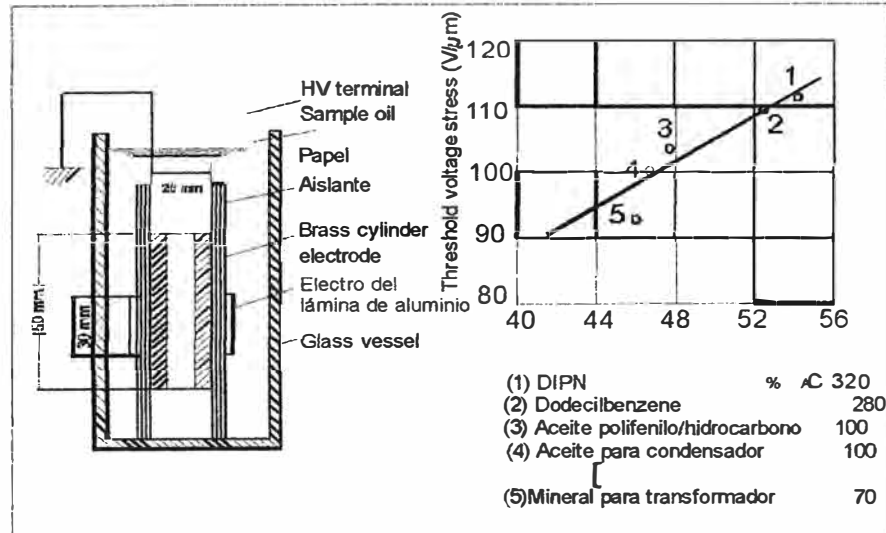


Fig. N° 2.6 Condensador muestra usado para la prueba de absorción de gas y la relación entre la tensión de generación del gas y la tensión umbral de esfuerzo de características de V-T

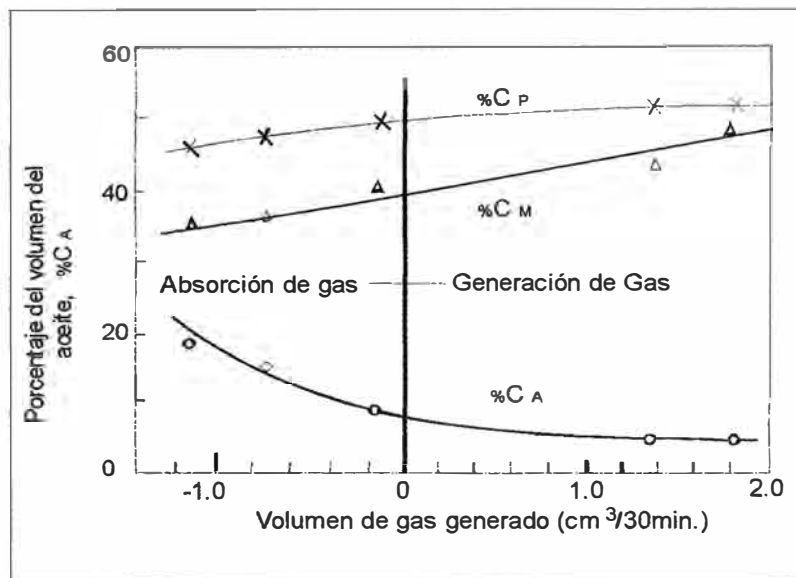


Fig. N° 2.7 Capacidad de absorción de gas del aceite mineral

En 1965, los aceites sintéticos, los cuales son convenientes para los impregnantes de cables de potencia y condensadores de potencia, también han sido investigados en Japón. Como resultado, en 1970, los derivados del diarylalkane fueron inventados como aceites aislantes para los cables de potencia, y diisopropylnaphthalene (DIPN) y el phenylxylyl ethane (PXE) se desarrollaron como impregnantes de condensadores de potencia OF. Éstos aceites de hidrocarburo aromáticos sintéticos tienen la estructura molecular mostrada en la Fig. N° 2.8 y tienen unas propiedades excelentes, como se muestra en la Tabla N°

2.1. En 1975 fueron aplicados por primera vez para condensadores mixtos papel/film, tipo tanque.

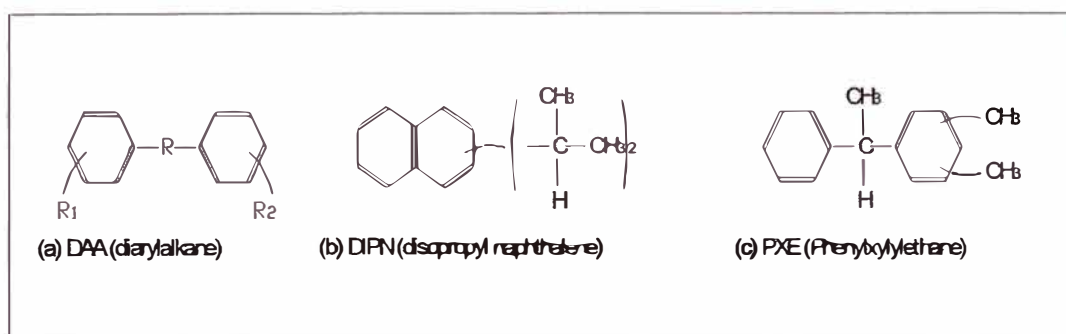


Fig. N° 10 Estructura molecular del aceite hidrocarburo aromático sintético

Tabla N° 2.1. Propiedades de los Impregnantes de los Condensadores

Propiedades	Aceites ^{*1}			
	MO	TCD	DIPN	PXE
Peso específico [15/4°C]	0.88	1.40	0.96	0.99
Viscosidad [30°C] (cSt)	11.0	25.0	8.5	8.0
Punto de Combustión (°C)	135	(170)	144	148
Punto de Congelamiento (°C)	-32	-17	-47.5	-47.5
Flamabilidad ^{*2} (mm/s)	5.6	S.E. ^{*3}	6.3	4.7
ϵ [60Hz, 80°C]	2.18	5.20	2.48	2.51
Tan δ [60Hz, 80°C] (%)	0.01	0.04	0.005	0.005
Tensión disruptiva (kV/2.5mm)	70	65	80	80

*1: MO: Aceite mineral, TCD: Trichlorodiphenyl, DIPN: Diisopropyl-naphthalene, PXE: Phenylxylyl ethane

*2: Método de la cinta de aislar de fibra de vidrio

*3: Auto extinguable

2.2.3 Papel/Aceite

En la mayoría de equipos eléctricos, como en los transformadores, el aislamiento es sometido a esfuerzo relativamente bajo para aislar o espaciar a los conductores. En los condensadores, el aislamiento está esforzado altamente y se usa para almacenar la energía eléctrica - en esta capacidad el aislamiento está normalmente referido al "dieléctrico". El dieléctrico es el elemento activo y como tal, determina el tamaño, peso y costo del condensador. Desde que el tamaño varía directamente por la constante del dieléctrico y por el cuadrado de la tensión (los voltios por espesor de la unidad), estas dos características recibieron mucha atención en el desarrollo de condensadores de potencia.

Los primeros condensadores eran hechos con un dieléctrico de papel de lino impregnado con cera. Éstos eran condensadores muy pequeños porque tenían altas pérdidas dieléctricas (vatios perdidos por kVar) y tenían baja fiabilidad porque la cera tenía vacíos las cuales causaban fallas debido a las descargas parciales. Una significativa mejora en el desempeño fue hecho cuando la cera fue reemplazada con aceite mineral. Las mejoras fueron hechas cuando apilaron capas de papel y las láminas dieron la manera a enrollar. La pureza y los métodos de fabricación del papel de la pulpa de madera se mejoraron grandemente y en 1928 el papel Kraft reemplazó al papel de lino.

2.2.4 Papel / PCB

En 1931, el Bifenilo Policlorado (PCB) se introdujo. Este impregnante tuvo varias ventajas sobre el aceite mineral incluso una constante dieléctrica más alta, mejor capacidad de esfuerzo, química buena y estabilidades térmicas, y se caracterizó como no inflamable.

En 1948, cuando los condensadores de potencia fueron usados más ampliamente, los bancos de condensadores comenzaron a ser populares, entonces los condensadores serían energizados solamente en momentos de alta carga. Esto permitió más eficiencia, la completa corrección de los sistemas de máxima carga, mientras que evite las condiciones de sobre tensión durante las condiciones de poca carga. El PCB en uso, pentaclorodifenilo, tenía un punto de transición de cristal de aproximadamente -10°C , demasiado alto para permitir el cambio en el invierno sin vacíos y el daño consecuente debido a las descargas parciales. Para resolver este problema, el triclorobenzeno fue mezclado con el PCB, bajando el punto de transición de cristal a -40°C . Esta mezcla se reemplazó después con triclorobifenilo que tiene un punto de transición de cristal de -35°C .

A través de la prueba de sobre tensión a temperatura elevada, se encontró que la relación de potencia y la vida del condensador fueron mejoradas por la suma de un estabilizador epóxido al PCB. La función del epóxido fue de combinarse con los contaminantes iónicos en el impregnante para reducir la relación de potencia y la degradación del dieléctrico. Se observó que las mejoras en duración fueron más de 2:1.

Durante los años cuarenta y cincuenta, continuaron las mejoras en la calidad del papel mejorando la resistencia del dieléctrico y redujeron las pérdidas eléctricas. La mejora en la relación de potencia se ilustra en Fig. N° 2.9. Con el aceite

mineral el tamaño del condensador se había limitado térmicamente a 10 kVAR. Con el uso de PCB y el papel de Isokraft introducido en 1958, el tamaño del condensador más grande aumentó a 100 kVAR.

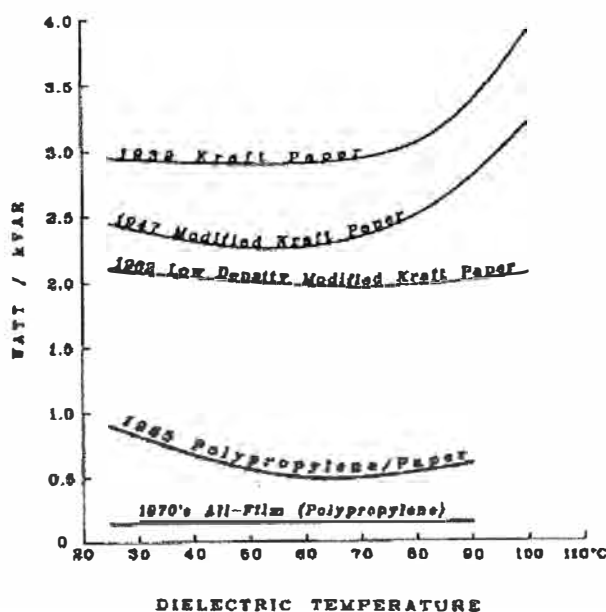


Fig. N° 2.9 Variación de las pérdidas de dieléctrico para dieléctricos de All-paper, Film/Papel y All-Film

2.2.5 Papel/Film/PCB

A inicios de los años sesenta, se examinaron muchos polímeros diferentes para reemplazar el papel. Los requisitos importantes que se consideraron además de la constante dieléctrica y la capacidad de esfuerzo fueron el costo de la resina base, procesabilidad sub-milimétrica de los espesores, compatibilidad con el impregnante de PCB y el rango de temperatura de operación hasta los 100°C. El Polipropileno surgió como el mejor polímero de todos. Tenía especialmente buena resistencia dieléctrica y bajas pérdidas. Los primeros condensadores de potencia de film de polipropileno/papel/PCB fueron introducidos en 1965.

Como se muestra en la Fig. N° 2.9, la relación de potencia del dieléctrico film/papel era la mitad del mejor papel dieléctrico. Esta reducción en la relación de potencia virtualmente quitó la barrera térmica en el diseño del condensador. La mejora en la capacidad de esfuerzo a 1200 voltios por mili pulgada para el polipropileno comparado a 400 voltios por mili pulgada para el papel más que compensado por la reducción en la forma en la constante dieléctrica de 6.1 para el

papel a 2.25 para el polipropileno. Por consiguiente, en los años 70 los condensadores film/papel/PCB fueron producidos hasta el tamaño de 400 kVAR en rangos estándar y hasta 600 kVAR para las aplicaciones especiales. La Fig. N° 2.10 muestra el considerable efecto que mejoró la tecnología del dieléctrico que ha llevado a la reducción del volumen del condensador.

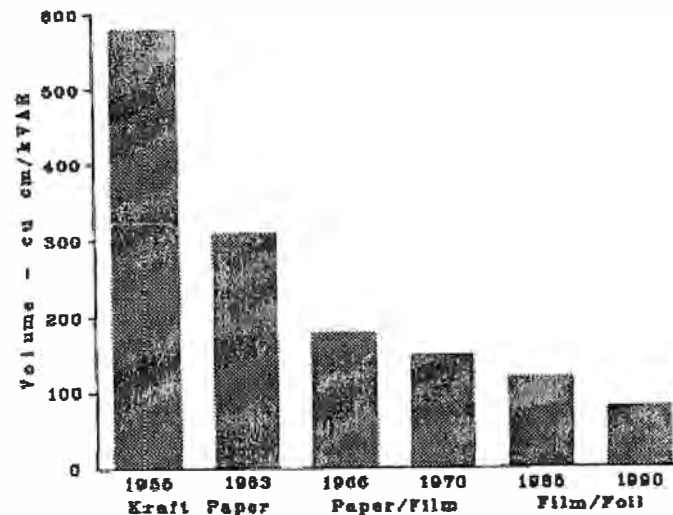


Fig. N° 2.10 Decrecimiento en el volumen del condensador con mejoramiento en el dieléctrico

2.3 Materiales de hoy

2.3.1 Dieléctricos Líquidos

Después del prohibir del uso de PCB a inicios de los años setenta, había una proliferación de nuevos fluidos de reemplazo. De hecho, muchos fabricantes de condensadores vieron la necesidad de reemplazar el PCB como una oportunidad de efectuar una conversión completa a los condensadores de muy baja pérdida usando los líquidos de baja pérdida inherentemente compatible con el polipropileno, la elección del dieléctrico sólido.

Los proveedores del líquido dirigieron su atención a las estructuras moleculares aromáticas no polares desde que la absorción de gas de hidrógeno era una propiedad importante para la capacidad de esfuerzo alta en AC. Se desarrollaron pruebas de apantallamiento de líquido sensibles para la medida exacta de voltaje de principio de descarga parcial y absorción de gas de hidrógeno para ayudar en

la búsqueda para los fluidos convenientes. También se encontraron otras propiedades físicas, como el punto de lluvia bajo y la baja viscosidad, para ser ventajosas y así estrecharon el campo de candidatos convenientes.

Hoy son usados los líquidos de hidrocarburo poliaromático no tratados con cloro por la mayoría de fabricantes de condensadores de potencia. Esta clase de dieléctrico líquido se caracteriza más por su similitud de propiedades que por sus diferencias. Los fluidos de las Tablas N° 2.1 y 2.2, usados separadamente o como mezclas, satisface el volumen de necesidades del mundo por condensadores de potencia:

Tabla N° 2.2. Propiedades de los Nuevos Impregnantes de los Condensadores

Propiedades	Aceites ^{*1}			
	CPE	MIPB	PMS	BO
Peso específico [15/4°C]	0.96	0.99	0.97	1.07
Viscosidad [30°C] (cSt)	5.2	8.3	35	37
Punto de Combustión (°C)	156	140	317	148
Punto de Congelamiento (°C)	-60	-50	-77	-40
Flamabilidad ^{*2} (mm/s)	-	-	1.0	S.E. ^{*3}
ϵ [60Hz, 80°C]	2.44	2.55	2.65	4.61
Tan δ [60Hz, 80°C] (%)	0.005	0.005	0.08	0.61
Tensión disruptiva (kV/2.5mm)	80	80	58	60

*1: CPE: Cumylphenylethane, MIPB: Monoisopropylbiphenyl, PMS: Phenylmethyldimethyl silicone, BO: Aceite mezclado con (Blended oil of) DIPN o PXE y TCP

*2: y *3: Referirse a Tabla N° 2.1

Ninguno de estos nuevos fluidos tiene las características no inflamables del PCB. El uso de un impregnante inflamable preocupa a los muchos usuarios, especialmente desde que ellos también están interesados, que los condensadores sin PCB no se desempeñen tan bien y que cuando fallen se puedan romper y producir fuego. Sin embargo, lo contrario ocurrió. La mayoría de los nuevos fluidos tuvo mejor la capacidad de esfuerzo que los PCB y el campo de desempeño de los condensadores realmente mejoró. Las fallas e incendios del condensador debido a casos de las rupturas no se volvieron un problema mayor.

Aunque estos fluidos tienen las constantes dieléctricas bajas comparadas a los de PCB, ellos recuperan esta deficiencia inherentemente con valores bajos de pérdida del dieléctrico y la alta duración al esfuerzo eléctrico son el resultado de las excelentes propiedades de absorción de gas. Estas propiedades hacen posible aumentar dramáticamente la densidad de poder reactivo de condensadores individuales comparadas a las unidades iniciales de PCB. Los condensadores de

potencia con densidad en kVAR tres veces que las unidades de film/papel/PCB serán probablemente ofrecidos en el futuro cercano. Estos adelantos son hechos posibles porque cuidadosamente se controló los procesos industriales, la atención estricta para limpiar condiciones de la habitación y la comprobación rigurosa de las pruebas eléctricas internas se ha vuelto la operación práctica estándar para los fabricantes de calidad.

En las Tablas N° 2.1 y 2.2, se dan una lista de algunos fluidos junto con algunas de sus características de su mejor desempeño.

Evaluando estos fluidos, las consideraciones más importantes son:

- La aceptabilidad medioambiental.
- Las características eléctricas.
- Las propiedades gaseosas.
- El grado de interacción con el film de polipropileno.
- La influencia en las pérdidas.
- Esfuerzo en la distribución.
- El inicio y la extinción de las descargas parciales de tensión.

La práctica actual para la mayoría de los usuarios es que, antes de que cualquier fluido se acepte, la evidencia documental debe producirse por los proveedores para demostrar que el fluido es aceptable a las normas estándar internacionales en relación a los factores de toxicidad (oral e inhalación), y el comportamiento medioambiental (bactericidad y biodegradabilidad).

La absorbencia del fluido impregnante es una propiedad esencial para minimizar las descargas parciales en los dieléctricos. Los gases (vacíos) emitidos del papel aislante o de un elemento de que ha fallado, si no es rápidamente absorbido por el fluido, puede dispersarse a lo largo de la unidad del condensador y quedarse atrapado en las regiones de alto esfuerzo que lleva a las descargas parciales y más fallas de conexión en cascada de los elementos.

En un estudio exhaustivo se ha encontrado que todos los nuevos fluidos listados, mostraron buena absorción de hidrógeno a lo largo de un rango de temperatura de 30-80°C. Las interacciones del film-fluido involucran el la humectabilidad del film, la tasa de impregnación del fluido, solubilidad de la porción de una parte del film, la contracción y el hinchamiento térmico del film. La absorción del fluido tiende notablemente a incrementarse con la temperatura. La impregnación del film generalmente es un proceso bastante rápido (en menos de 15 horas) y el proceso

causa al film un hinchamiento considerable. La humectabilidad es una función de ambos los de film y los tipo fluido.

Las pérdidas del dieléctrico papel/film impregnadas con los nuevos fluidos son comparables con o menores que aquéllos obtenidos con PCB. Como con los de PCB, se ha encontrado que, con los nuevos fluidos también, la aplicación de tensión en el tiempo (varios minutos) causa un tipo de efecto de condicionamiento, el cual generalmente produce una marcada reducción en las pérdidas (5-15%) comparado con el valor inicial. El inicio y la extinción de las descargas parciales de tensión se encuentran consistentemente más alto que en los de PCB.

2.3.2 Dieléctricos sólidos

El papel, fabricado de productos naturales, sirvió bien como dieléctrico principal en los condensadores de potencia durante muchos años. Pero el concepto del dieléctrico mixto, film plástico usada en la combinación con papel de hojas de celulosa, introducido a mediados de los años sesenta, finalmente llevó a la eliminación completa de papel. Como se mostró en la Fig. N° 2.9, el dieléctrico de all-film tiene 1/20 las pérdidas de all-paper y 1/4 del dieléctrico film/papel. El condensador all-film es un producto establecido.

Los avances hechos en dieléctricos líquidos de baja pérdida convergidos naturalmente con la apariencia inherentemente de baja pérdida no polar polyolefins en los años 60. Como cada vez más aplicaciones surgieron para los plásticos sintéticos, la tecnología de fabricación de polímeros avanzó rápidamente, la capacidad de la producción fue extendida y los precios de la resina base se pusieron económicamente atractivos.

Algunos fabricantes de condensadores vieron la ventaja de desarrollar la especialización interna en la producción de condensadores de film polímero de calidad. La investigación de la fabricación inicial del film identificó el polipropileno como un material con deseables propiedades eléctricas y físicas y pronto se volvieron la resina polimérica sintética para las altas tensiones condensadores de potencia de film.

El film de polipropileno, con aproximadamente el triple de la capacidad de esfuerzo eléctrico que del papel Kraft, presentó nuevos retos para los diseñadores del condensador. Las interacciones de líquido/polímero se volvieron un factor importante en la selección de la tensión del bobinado rollo y las condiciones de impregnación. Los efectos de hinchazón del film tuvieron que considerarse que

asegurar la completa impregnación líquida. En los condensadores de papel y film/papel, el no hinchable papel Kraft sirvió como el dieléctrico sólido y como un camino de impregnación para el dieléctrico líquido. Los polímeros sintéticos no poseen esta capacidad de "empaquetadura de algodón" casi así como el papel celulósico.

Para ayudar la impregnación, muchos fabricantes de condensadores emplearon láminas metálicas repujadas en el diseño de all-film y los fabricantes de film buscaron reproducir la naturaleza áspera del papel hacia la superficie del film de polipropileno. Tal efecto de textura se logró a través de la explotación de las transiciones de fase cristal inducidas termalmente controlando las condiciones del proceso cuidadosamente. El éxito del condensador all-film era el asegurarse con la introducción del también llamado HAZY® film. Mucho del esfuerzo de desarrollo técnico expendido por los fabricantes del film en los últimos diez años ha estado apuntado a lograr sistemáticamente niveles específicos de superficies asperezas más delgadas y láminas de medidas más delgadas.

Durante los últimos quince años mucha investigación se ha hecho para determinar las estructuras moleculares deseables para mejorar la capacidad de esfuerzo de los dieléctricos líquidos. Esta investigación, como se mencionó antes, ha producido una opción de varios dieléctricos líquidos disponibles para la industria del condensador. La situación difiere con la disponibilidad de dieléctrico film. El polipropileno ha sido la resina del film de muy alto rendimiento en los condensadores de potencia por más de 20 años y ningún candidato mejorado ha aparecido en el horizonte. Ninguna duda que la razón principal para esto es que el polipropileno es una resina de bajo costo con una excelente combinación de propiedades eléctricas, mecánicas, y químicas que producen un material fácilmente procesable en un dieléctrico film de alto desempeño. Sin embargo, parece que la comprensión e implementación de características estructurales intrínsecas que llevan a las mejoras en la fuerza grande de la interrupción del área del polipropileno, u otros polímeros, no ha sido venidero. Los fabricantes del condensador han hecho grandes pasos reduciendo los factores extrínsecos que trabajan contra la alta capacidad de esfuerzo pero parece que los valores medios de fallas fundamentales orientaron biaxialmente que los polipropileno no hayan aumentado substancialmente en los últimos diez años.

Hoy, los fabricantes de los condensadores de potencia diseñan cuidadosamente el bobinado y las condiciones de impregnación líquida para emparejar las propiedades de sus dieléctricos sólidos y líquidos. La combinación de años de

fabricar con habilidad, medioambientalmente seguro alto esfuerzo / baja pérdida del aislamiento compuesto resulta en el diseño del condensador de potencia comercial, validado por pruebas extensivas de duración, que proporciona años de servicio fiable y barato.

2.4 Futuro

2.4.1 Sólidos

El film polipropileno se ha usado como un material dieléctrico por encima de 25 años y la pregunta obvia es "¿cuándo aparecerá un reemplazo?". Para contestar esto sería útil repasar la evolución de los dieléctricos del condensador de potencia a través de los años. El objetivo global ha sido reducir las pérdidas del dieléctrico. Por consiguiente, cualquier esfuerzo por encontrar un reemplazo para el polipropileno debe guiarse por este requisito fundamental. De hecho, no hay una fuerte necesidad hoy en día de un dieléctrico con las pérdidas más bajas que el polipropileno desde que los grandes condensadores son ahora hechos con niveles de pérdida determinados por las conexiones mecánicas externas, resistencias auto-descarga y lámina de electrodo de resistividad.

Un dieléctrico de reemplazo también debe ser procesable en un film de alta resistencia dieléctrica. La utilidad del mercado del condensador de potencia es un precio sensible, y logrado con contenido reducido de material con film delgados de alta resistencia dieléctrica es un objetivo importante. Como resulta, la resina de polipropileno es uno de los polímeros de costo más bajos capaces de ser fabricado en un film biaxial orientado de alta resistencia. Como una regla general, cualquier nuevo polímero que ofrece la mejora en el promedio de resistencia de dieléctrico de área grande es deseable. Uno debe considerar, sin embargo, los estudios de la falla que el dieléctrico muestra, el componente líquido en el sistema del dieléctrico será como crítico a la última resistencia de falla de CA como el sólido.

2.4.2 Líquidos

Sobre el tema de los líquidos del hidrocarburo aromático eléctricamente resistentes, se ha venido estudiando exhaustivamente. La mayoría de los posibles compuestos de polifenilo de peso moleculares bajos se han sintetizado y las

propiedades del dieléctrico tienden ser similares para todos, con la viscosidad, las llamas y valores de punto de lluvia que ha determinado a los últimos candidatos. Hay posibilidades de avance quizás en el área de fluidos no-hidrocarburos pero la baja pérdida del dieléctrico (como, la constante dieléctrica baja) siempre será deseable.

De un punto de vista completamente técnico, la próxima generación de sistemas de aislamiento para los condensadores de potencia podría ser desarrollada volviendo a tener en cuenta la naturaleza de los dieléctricos compuestos. Los avances respecto de los materiales utilizados, al pasar de los años han seguido generalmente dos caminos paralelos; uno utilizando sólido y el otro utilizando líquido. Los desarrollos en una las áreas han llevado a los cambios en la otra. Una perspectiva más amplia dirigida a la naturaleza de la composición natural de los materiales de altos esfuerzos, de alguna manera a lo largo de las líneas de progreso que se vienen desarrollando acerca de altos esfuerzos mecánicos estructurales de bajo peso, pueden mantener un campo fértil para nuevas ideas. En cualquier caso, por razones medioambientales, técnicas y económicas, los líquidos de alta resistencia disponible hoy en combinación con polipropileno de alta resistencia/bajas pérdidas orientado biaxialmente es una acción difícil de seguir.

a. Los recientes desarrollos del aceite aislante

En vista de los problemas medioambientales de polución, el uso de PCBs, tales como TCD, se ha restringido substancialmente, y el TCD se reemplazó tentativamente por el aceite mineral. El DIPN y PXE, desarrollados al principio como impregnantes de condensadores del tipo OF, fueron investigados por el uso como impregnantes de condensadores de cubierta metálica de film que sustituyen al TCD. Pronto fue demostrado que esos aceites sintéticos de hidrocarburo aromático no sólo tienen la capacidad de absorción del gas hidrógeno más alta y excelentes propiedades del dieléctrico pero también buena afinidad con un film de polipropileno (PP) y mejor biodegradabilidad, aunque ellos no son superiores al PCB respecto a la constante dieléctrica y no inflamabilidad. Ellos fueron adoptados como los impregnantes de los condensadores de film en 1972, particularmente porque su gran capacidad de absorción del gas produce una resistencia dieléctrica alta. El PXE era adoptado como un impregnante de los condensadores de potencia en América, y

monoisopropyl-biphenyl (MIPB), desarrollado en el E.E.U.U., también se usa para este propósito.

Algunas modificaciones a los aceites de hidrocarburo aromático como el cumylphenylethane (CPE) y diphenylethane (DPE) fueron desarrollados recientemente en Japón y se usaron en parte como impregnantes para los condensadores de potencia. Estos aceites, incluyendo DIPN y PXE, son todos de peso molecular bajo compuesto de polifenilo y tienen similares características eléctricas, químicas y físicas, como lo visto en las Tablas N° 2.1 y 2.2.

Los aceites no inflamables que pueden usarse como impregnantes de condensadores de potencia se han investigado enérgicamente, por supuesto, y varios aceites aislantes como el aceite de silicón, y mezclas de tricresylphosphate (TCP) con DIPN o PXE fueron desarrollados como impregnantes de condensador auto extinguidos. El aceite de silicón Dimethyl fue hallado de ser impropio como un impregnante de condensadores de alta tensión, como él evoluciona a gas bajo un gran campo eléctrico. Sin embargo, el aceite phenylmethylsilicone (PMS), debido a la presencia del radical fenilo, tiene una más alta capacidad de absorción del gas y puede ser técnicamente usado como un impregnante no inflamable para los condensadores de alta tensión. Los aceites mezclados de TCP y DIPN o PXE tienen una capacidad de auto extinción y una constante dieléctrica alta, como se muestra en la Tabla N° 2.2, y tales condensadores all-film impregnados en aceite se comercializaron a inicios de los años ochenta. Para probar la flamabilidad de los nuevos impregnantes, los métodos modificados tales como prueba de cinta de fibra de vidrio y la prueba del índice del oxígeno estaban también desarrollados. Las estructuras moleculares de PMS y del TCP están también mostradas en la Fig. N° 2.11.

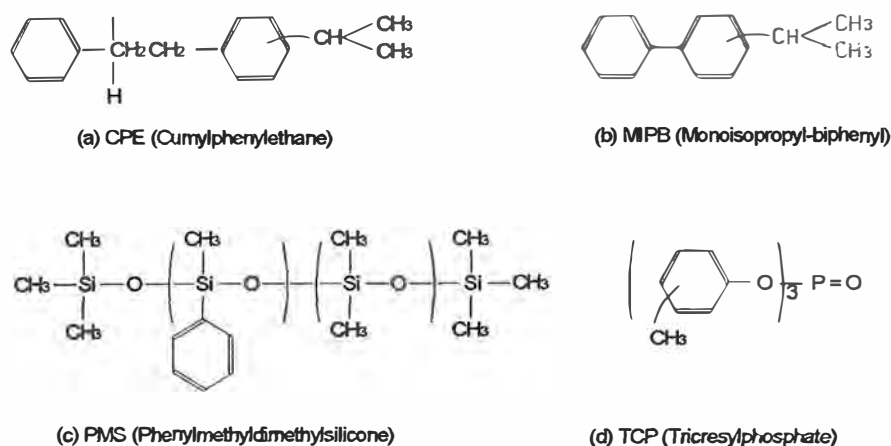


Fig. N° 2.11 Estructura Molecular del CPE, MIPB, PMS y TCP

2.4.3 Construcción

Otra posible dirección para la innovación del condensador de potencia puede ser el uso de materiales existentes en nuevas construcciones. Un concepto no generalmente usado en alta tensión es el polipropileno con un electrodo metalizado. Estos diseños de dieléctrico de una-hoja pueden usarse con altos esfuerzos desde una falla en el dieléctrico se auto reparará.

Hay condensadores de electrodo metalizado que se usan para aplicaciones de alta tensión en Japón. Algunos de éstos usan film con el papel doblemente metalizado como electrodo para proporcionar impregnación y tensión más alta por la capacidad de cada elemento. Recientemente, el uso de films de superficies ásperas metalizadas ha tenido éxito en proporcionar la impregnación total sin el uso del electrodo del papel.

Algunos diseños de films metalizados impregnadas con SF6 o resina se han producido en el Japón. Estos condensadores secos se utilizan en aplicaciones especiales; por ejemplo, para uso interior con el fin de evitar uso de impregnantes inflamables y así reducir el riesgo de incendios. Sin embargo, estos sistemas metalizados todavía no tienen un costo aceptable en utilizaciones de alta tensión, sobre todo si el factor de potencia más alto inherente en el electrodo delgado metalizado (menos de 1/100 de un electrodo de la lámina convencional) es considerado en la evaluación de costos.

No hay ningún camino claro a seguir para la nueva generación de condensadores de potencia de corriente alterna. Podría ser un nuevo polímero, un nuevo fluido o un sistema completamente nuevo.

2.4.4 Diseño del doblado del borde de la lámina

La descarga disruptiva del dieléctrico de los condensadores ha sido observada para ser cualquier perforación en el cuerpo del elemento o erosión del dieléctrico al borde de la lámina de aluminio. Las fallas en el borde de la lámina empiezan con la descarga disruptiva en el fluido aislante en el borde de la lámina donde el campo eléctrico es altamente no homogéneo. Este es debido a las dificultades prácticas en lograr perfectos los bordes lisos en el corte y el ajuste de las láminas durante la fabricación. El gran desplazamiento lateral relativo entre los electrodos también puede producir las distorsiones del campo al borde de la lámina. Se ha encontrado que el inicio de las descargas parciales de tensión tiene una marcada dependencia en el borde del electrodo del contorno. Esto no sería un problema si el condensador es diseñado para operar a un esfuerzo eléctrico bastante bajo o baja tensión en el elemento. Sin embargo, algunos fluidos de reemplazo tienen una constante dieléctrica más baja que el de PCB, y para un elemento de tensión dado, el componente fluido puede ser el factor limitante. Un método usado para alcanzar las condiciones controladas es doblando los bordes de la lámina. Con el doblado de los bordes del electrodo se ha encontrado que aumenta el inicio y la extinción de las descargas parciales de tensión (20-30%), y por consiguiente permite un elemento de tensión alto (hasta 2300V). Sin embargo, el doblado de los bordes de las láminas tienen desventajas, ellos hacen la impregnación más difícil y también toman el valioso espacio.

2.4.5 Influencia de aditivos en los fluidos

Los aditivos de epóxido, por ejemplo epóxidos de aluminio, han sido usados en los condensadores all-paper impregnados con PCB. Éstos fueron hallados para reducir las pérdidas del dieléctrico y extender la vida del condensador.

En los dieléctricos mixtos y condensadores de all-film, el film contiene cantidades pequeñas de neutralizadores, catalizador, residuos, y los portadores iónicos basados en antioxidante. Éstos se disuelven simultáneamente con una parte del film, produciendo contaminación eléctrica en el fluido. Esto incrementará el factor de dispersión del condensador.

CAPÍTULO III

EVOLUCIÓN DE LOS CONDENSADORES DE POTENCIA

En los años cuarenta empezando con el papel kraft, los condensadores impregnados con aceite mineral; la tecnología entonces se movió a un papel kraft mejorado y adoptó un fluido muy estable, no-inflamable y eléctricamente superior conocido como el Bifenilo policlorado (PCB) en los años cincuenta e inicios de los años sesenta. Con el crecimiento de la demanda y la reducción de las pérdidas en los sistemas de potencia, los condensadores utilizaron un dieléctrico mixto de baja pérdida consistido de capas alternadas de films de polipropileno y papel kraft fino, impregnado con PCB; se desarrolló con éxito y se usó a finales de los años sesenta. Sin embargo, desde los años setenta, el uso de PCB se ha descontinuado, debido a las preocupaciones por su no biodegradabilidad e incompatibilidad con el medio ambiente; muchos fluidos aislantes nuevos sin PCB se han introducido. A fines de los años setenta, los condensadores llamados "all-film" fueron desarrollados.

También las presiones económicas y medioambientales han estimulado los cambios rápidos en la tecnología de condensadores de potencia. Debido al desarrollo más fuerte y fácil del impregnante film de polipropileno, junto con la introducción exitosa de una docena o más de impregnantes fluidos sin PCB, una nueva generación de bajo-pérdida de alta capacitancia de condensadores all-film gradualmente están reemplazando los tradicionales tipos de all-paper y de mezcla de papel/film.

Los condensadores de potencia se encuentran en amplias aplicaciones en los sistemas modernos de potencia. Se han usado como dispositivos en paralelo (condensadores shunt) para la corrección de factor de potencia y control de la tensión; como dispositivos en serie (condensadores en serie) para aumentar la capacidad de transferencia de potencia en líneas de transmisión de Alta Tensión; como dispositivos sintonizados de filtración (filtros armónicos AC o DC) para reducir corrientes armónicas y tensiones; como dispositivos de acoplamiento (condensadores de acoplamiento) para acoplar los equipos de comunicaciones a las líneas de alta tensión, como parte de un dispositivo que mide la tensión (transformadores de tensión capacitivo) para medición y protección, como los dispositivos de puesta a tierra (condensadores de puesta a tierra) en sistemas sin puesta a tierra ; y como dispositivos de control de onda (condensadores de onda) para reducir la

magnitud y la proporción de elevación de ondas transferidas como dispositivo del control de onda (condensador de onda).

En los últimos tiempos, los condensadores de potencia se han usado también ampliamente en “alta tecnología” como los Compensadores Estáticos Var (SVCs) para proporcionar una rápida acción (dentro de 1-2 ciclos) la regulación de la tensión, el control de la tensión en desequilibrio, el control de las sobretensiones en el sistema o el mejoramiento en la estabilidad de los sistemas de potencia.

3.1 Los condensadores OF

Los condensadores de potencia son un tipo de equipo eléctrico desarrollado hace tiempo, originado del frasco de Lyden, inventado en 1774. Hasta que se desarrollaron los films sintéticos, el método más práctico y barato de proporcionar áreas muy grandes de electrodos de condensador para lograr una capacidad práctica, era usar papel aislante impregnado con un líquido dieléctrico o cera.

La parafina, cera impregnada en papel se ha usado durante muchos años como un dieléctrico para condensadores relativamente pequeños. Los esfuerzos por construir estos condensadores en tamaños grandes eran infructuosos debido a la presencia de huecos y la dificultad de quitar el calor asociado con el servicio AC. Los condensadores de papel impregnados con un aceite aislante prueban ser la solución a un problema de vacíos y limitaciones térmicas.

El uso de condensadores en los sistemas de potencia se volvió una práctica general, usando papel impregnado con aceite mineral como dieléctrico, hace aproximadamente 75 años en América. En Japón, por otra parte, la aplicación de los condensadores para estos propósitos empezó en 1933 con el desarrollo de condensadores OF muy fiables y económicos. Ellos fueron los primeros en proporcionar esta solución a un proveedor de energía en 1935. El uso de los condensadores para la regulación de tensión de redes de transmisión principales empezó en 1937, y desde entonces, cerca de la mitad de la potencia reactiva de las redes ha sido proporcionada por los condensadores de potencia.

El condensador tipo tanque o “OF” (relleno de aceite) se caracterizó por su gran tamaño del tanque físico y el uso de elementos internos grandes. Estos elementos consisten en electrodos de lámina de aluminio y denso papel kraft, impregnado en aceite mineral. Las conexiones entre los elementos internos son proporcionadas por tabs insertadas entre las láminas y las capas del dieléctrico. Los grupos de

elementos aislados están empaquetados en los tanques grandes de acero, encajados con aceite de expansión del fuelle.

Al inicio de la utilización del condensador en Japón, los condensadores fueron usados principalmente por suministradores de energía quienes se beneficiaron directamente de las mejoras del factor de potencia, como no había cláusula del factor de potencia en las tarifas de energía en ese tiempo. Como resultado, la gran capacidad de los condensadores del tipo tanque eran casi siempre instalados en subestaciones de alta tensión.

Después de la Segunda Guerra Mundial, debido a la escasez de energía eléctrica, los méritos de instalar los condensadores cerca de las cargas fueron reconocidos, y las tarifas de energía fueron introducidas en 1950, eso proporcionó un retorno atractivo a los consumidores por la mejora del factor de potencia. Desde entonces, la demanda de los condensadores de potencia ha sido fuertemente alentada y los campos de aplicación han sido notoriamente ampliados. Los condensadores OF fueron desarrollados, aplicando la tecnología de los cables OF. El elemento estaba compuesto de varias hojas de papel aislante grueso, un par de electrodos de lámina de aluminio, e hilos de derivación. El hilo de derivación fue al inicio hecho de alambre de cobre, pero esto se cambió a aluminio en 1956 para evitar una reacción química con el azufre libre contenido en el aceite mineral. El alambre fue tejido posteriormente en una malla para mejorar el contacto eléctrico con el electrodo de aluminio.

Los elementos del condensador se reúnen en una pila de elementos y se conectan en serie y paralelo por hilos de conexión que corresponden a la tensión nominal y capacidad del condensador. La pila de elementos se colocan en un recipiente grueso de acero y los elementos son deshidratados completamente en vacío a alta temperatura y luego impregnado completamente con aceite mineral purificado y desgasificado, sin romper el vacío en el recipiente.

El volumen cambiante del aceite, causado por la variación de temperatura, es compensado por un dispositivo de ajuste de la presión del aceite llamado tanque de retroalimentación (FT feedback tank), el cual está compuesto de varias células de la unidad, hechas de un par de hojas de latón delgadas, corrugadas. El material de la célula fue cambiado a acero inoxidable en 1963 para evitar la descomposición térmica estacional del latón.

La impregnación con aceite mineral, el espesor del papel de Kraft (por ejemplo >5 milipulgada) se había usado mucho tiempo para los condensadores del tipo tanque hasta que los dieléctricos se sustituyeran en 1973 por un papel/film de

polipropileno mixto (PP) impregnado con aceites sintéticos de hidrocarburo aromático, como diisopropyl naphthalene (DIPN) o phenylxylethane (PXE) tuvo la suerte que el bifenilo policlorado (PCB) cuya aplicación en los condensadores había sido prohibida en vista de los problemas de polución del medio ambiente, no fue usado como aceite aislante para los condensadores del tipo tanque, porque PCB era incapaz para la circulación entre el recipiente y el tanque de retroalimentación debido a su alta viscosidad a las bajas temperaturas en invierno.

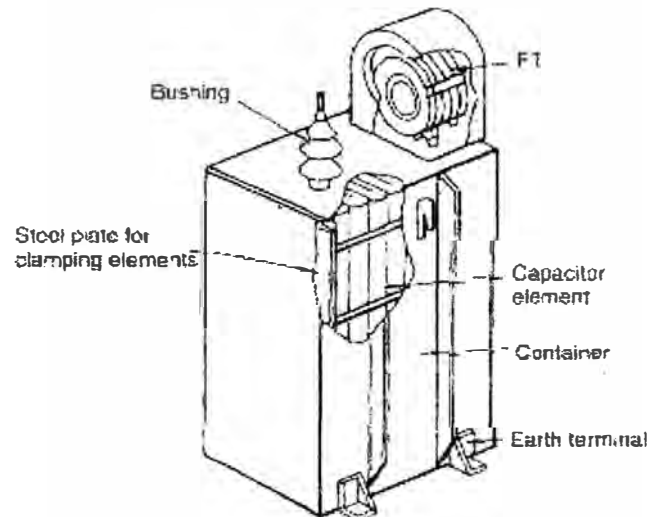


Fig. N° 3.1: Construcción del condensador tipo tanque

La Fig. N° 3.1 muestra la construcción de una unidad de condensador del tipo tanque, y la Fig. N° 3.2 muestra una fotografía de un tanque de retroalimentación y la propiedad de ajuste del volumen de aceite. Como se muestra en la figura, el volumen de aceite entre los puntos A y B, la curva se utiliza para la compensación del volumen de aceite, para mantener la presión interna de la constante del recipiente del condensador, y es un poco más alta que la presión atmosférica para evitar la intrusión de aire exterior si se encontraran agujeros pequeños o grietas capilares en el recipiente.

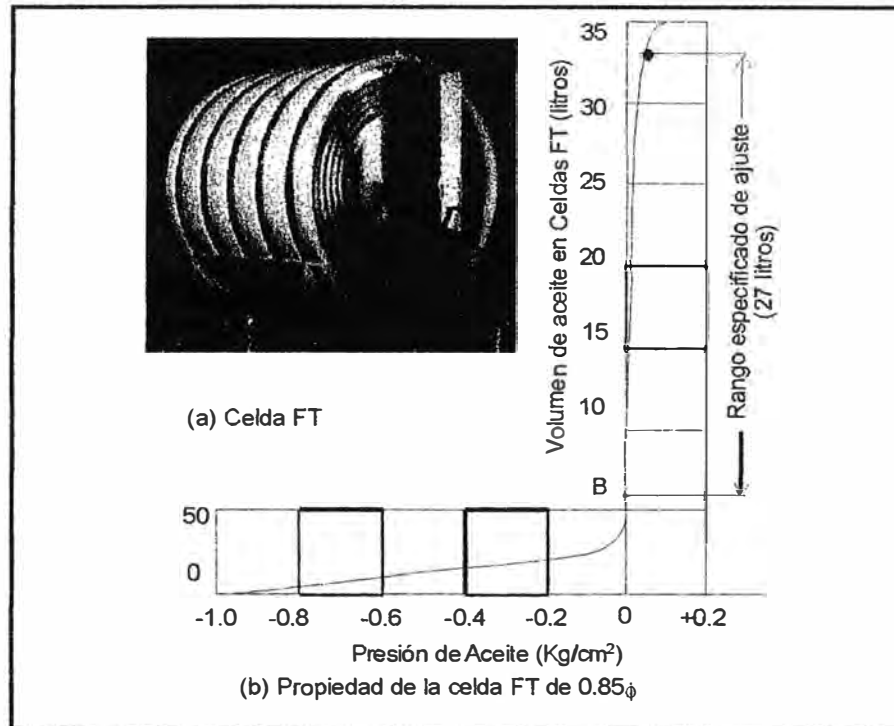


Fig. N° 3.2 Dispositivo de ajuste de la presión del aceite (tanque de retroalimentación: FT) y la propiedad de ajuste del volumen del aceite

3.2 Los condensadores de papel dieléctrico

Los condensadores all-paper emplearon papel kraft como dieléctrico y aceite mineral o PCB como impregnante. Los condensadores tuvieron cualquiera de los diseños tipo tanque o cubierta metálica.

Este tipo de condensador padece de dos limitaciones técnicas. Primero, ellos tienen altas pérdidas dieléctricas resultando en un alto aumento de temperatura bajo las condiciones normales de operación. Un valor típico es aproximadamente 3W/kVAr. Esto tiende a limitar su eficiencia volumétrica. Segundo, debido a la resistencia dieléctrica relativamente baja del papel, hay limitaciones en la tensión aplicada de esfuerzo y el elemento de tensión.

La permitividad dieléctrica relativa del papel kraft impregnado en aceite es aproximadamente 3.5-4, el esfuerzo de la tensión es aproximadamente 10-15V/ μm . Las unidades del tanque estaban fijadas en 5-10kV, y 500-1000kVAr. Se construyeron los MVAR bancos trifásicos grandes de las unidades de tanque individuales conectándolos en la combinación en serie/paralelo. El tipo tanque no emplea los fusibles para protección. Los transformadores de tensión electromagnéticos individuales, conectados a través de cada grupo de serie fueron usados para realizar la función dual de descargar los condensadores

cuando se encuentren desenergizados, además de proporcionar protección para tensiones desequilibradas contra las fallas elemento/tanque.

Los condensadores con cubierta metálica son de construcción del tipo más pequeña, sellada herméticamente. Los elementos pequeños están empaquetados dentro de cajas de acero o latas. Debido a su tamaño más pequeño, los condensadores con cubierta metálica son más baratos de producir y más flexibles en la aplicación: pueden construirse bancos de cualquier tamaño de MVAR y rango de tensión a partir de condensadores con cubierta metálica individuales pequeños. Los condensadores con cubierta metálica iniciales usaron papel kraft fino como el dieléctrico principal, pero estaba operando a un esfuerzo eléctrico más alto que el de tipo tanque. La permitividad dieléctrica relativa del papel impregnado en PCB es aproximadamente 5-6, con valores típicos de esfuerzo de aproximadamente 17-20V/ μm . Las unidades estaban fijadas en 6-11 kV, y 25-100kVAr. Las conexiones interiores entre los elementos fueron proporcionadas por cualquier tab de contacto a presión o por el uso de láminas extendidas. Las resistencias de descarga eran internamente encajadas a través de los terminales de cada condensador con cubierta metálica. Los fusibles de protección fueron proporcionados internamente por cualquiera de los elementos individuales o externamente por cada condensador con cubierta metálica. Se construyeron los bancos trifásicos grandes de los condensadores con cubierta metálica individuales conectándolos en la combinación de serie/paralelo. La protección del banco contra las fallas de la cubierta metálica fue proporcionada de varias maneras, incluso la protección de desequilibrio a través del neutro de la estrella no aterrada.

3.3 Los condensadores combinados papel/film

El sistema de dieléctrico combinado de papel/film de polipropileno muestra las ventajas encima del tipo all-paper debido a las propiedades del film de polipropileno que se introdujo para los condensadores a inicios de los años sesenta. En este tipo de condensador, el papel se usa como una mecha para ayudar que las capas del film, ocupando sólo 15-30% del volumen total. Las pérdidas del dieléctrico film son mucho más bajas (sobre el 0.5W/kVAr) y su resistencia del dieléctrico es mucho más alta. Porque la constante dieléctrica relativa del film impregnado es mucho más baja que el del papel impregnado (aproximadamente 40% menor), la distribución esforzada en la combinación es tal que la mayoría del esfuerzo es desarrollado por el film más fuerte. Los valores

típicos de esfuerzo son aproximadamente $17\text{-}20\text{V}/\mu\text{m}$ para el papel impregnado en PCB y $45\text{-}57\text{V}/\mu\text{m}$ para el film impregnado en PCB. Por lo tanto es posible de diseñar los condensadores para operar a esfuerzos (promedio) muy superiores sin sobre esforzar el componente del papel. Este sistema de dieléctrico combinado aumenta la eficacia volumétrica, permitiendo más kVar por unidad de volumen, y al mismo tiempo produce una reducción global en las pérdidas. La capacidad de los condensadores hasta 380kVar se ha alcanzado.

El film de polipropileno es como un material de goma. Antes de que pueda usarse, debe de estirarse en dos direcciones (biaxialmente). La orientación biaxial mejora las propiedades mecánicas y resistencia del dieléctrico. Sin embargo, se ha observado que el método de estiramiento usado, tiene una influencia importante en la propiedad de hinchazón del film. Cuando usan el film, los sistemas rigurosos de calidad-control deberían ser implementados por los fabricantes. El film puede cargarse muy fácilmente y puede atraer las partículas del polvo presentes en la máquina bobinadora o en el aire. Se ha demostrado que la tensión de descarga disruptiva de los condensadores puede ser influenciado significativamente por las partículas de polvo. El film es también mecánicamente frágil y debería manejarse con cuidado por los operadores para evitar rayaduras y perforaciones accidentales.

3.4 Los Condensadores de film

Como se mencionó en el punto 2.2.1, la $\tan \delta$ del condensador tipo tanque fue disminuyendo mejorando el papel aislante, pero para reducir la $\tan \delta$ más eficazmente, es necesario reemplazar el papel con el film de polipropileno (PP), el cual ha sido probado, ser un dieléctrico superior en los condensadores con cubierta metálica.

En 1975, era fabricado el primer condensador de tipo tanque impregnado con aceite sintético, aromático, dieléctrico mixto papel/film de PP, y este tipo de condensadores rápidamente reemplazo a los condensadores de papel impregnados con aceite mineral, los primeros cumplieron las necesidades de disminuir las pérdidas, tamaño, y peso de los condensadores. El tipo tanque, impregnado con aceite sintético, condensadores all-film que usaron el film de PP con una superficie puesta áspera, se desarrolló e inicialmente se comercializó en 1981. Sin embargo, los condensadores mixtos de papel/film impregnado con aceite sintético continúan siendo usados en los condensadores del tipo tanque

estándar, cuando los dieléctricos tienen una superior constante dieléctrica y habilita una más completa impregnación con aceite comparado con los dieléctricos de all-film. El volumen de un condensador de potencia es casi inversamente proporcional al producto de la constante dieléctrica (ϵ) y el cuadrado del esfuerzo de trabajo (G) $\{\epsilon G^2\}$. La Fig. N° 3.3 muestra la constante dieléctrica, el esfuerzo de trabajo y el volumen, ϵG^2 , de la impregnación con aceite sintético, los dieléctricos mixtos de papel/film como funciones porcentuales del film por volumen. Esta figura muestra que un sistema dieléctrico que tiene un porcentaje de film de aproximadamente 30% hace el volumen total de condensadores de potencia mínimo.

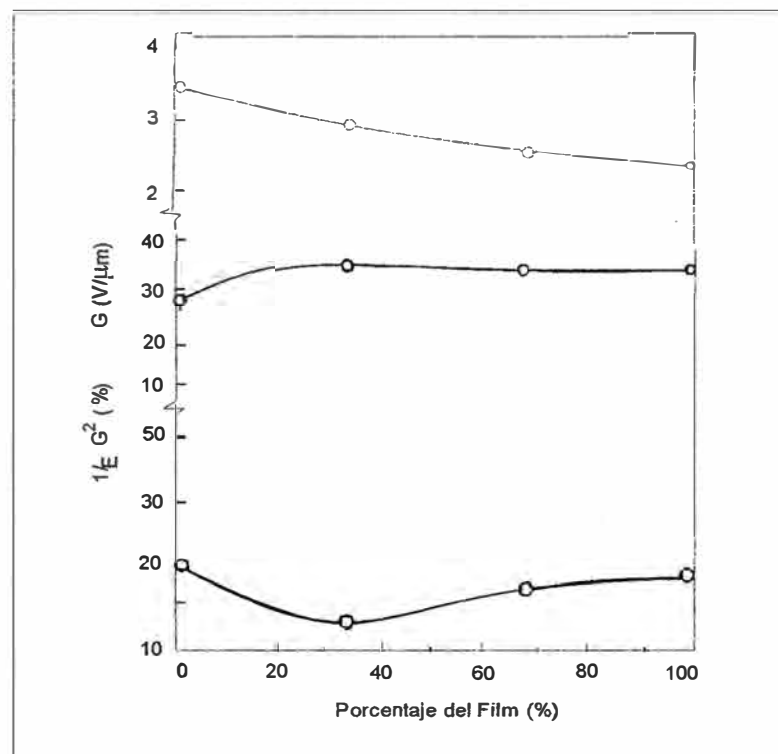


Fig. N° 3.3 Propiedades dieléctricas y relación del volumen de condensadores papel/film impregnados con DIPN

3.4.1 Avances en los condensadores

Aplicando los resultados de la investigación antes mencionada y desarrollada, la $\tan \delta$ de los condensadores tipo tanque, se mejoró eficazmente, como se ilustra en la Fig. N° 3.4.

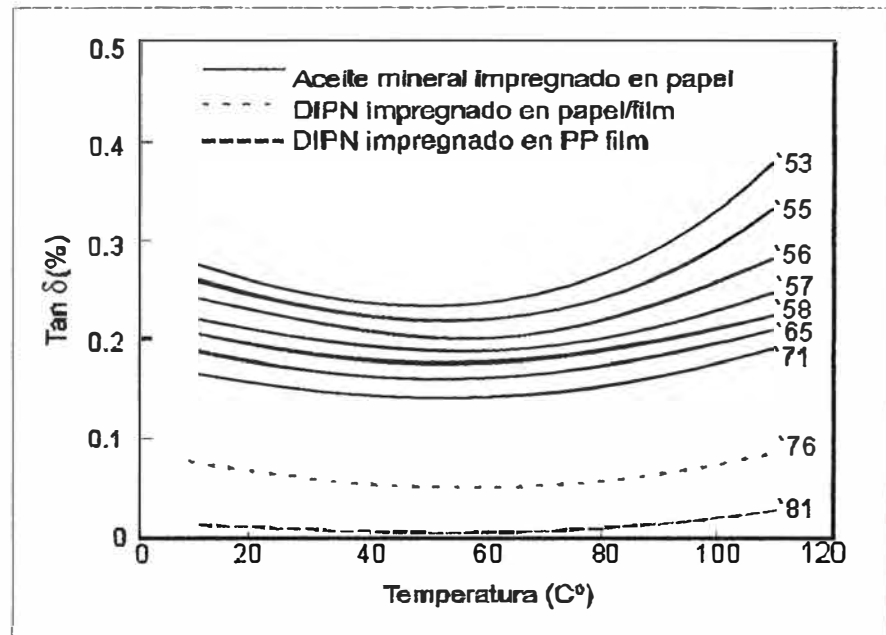


Fig. N° 3.4 Mejoramiento de la $\tan \delta$ de condensadores tipo tanque

Los adelantos en los materiales, diseños, y procesos hicieron posible desarrollar los condensadores del tipo tanque altamente fiables de una gran capacidad, respondiendo a la tendencia hacia el uso de grandes condensadores por suministradores de energía y consumidores de grandes energías. La Fig. N° 3.5 muestra el cambio de la capacidad máxima de los condensadores tipo tanque estándar y el volumen del condensador por kVar. Estas unidades muy grandes del condensador se pueden observar por estricto, la calidad controlada de los dieléctricos y cuidadosamente controlada en los procesos de fabricación, como la tasa de falla de las unidades es casi proporcional a su capacidad.

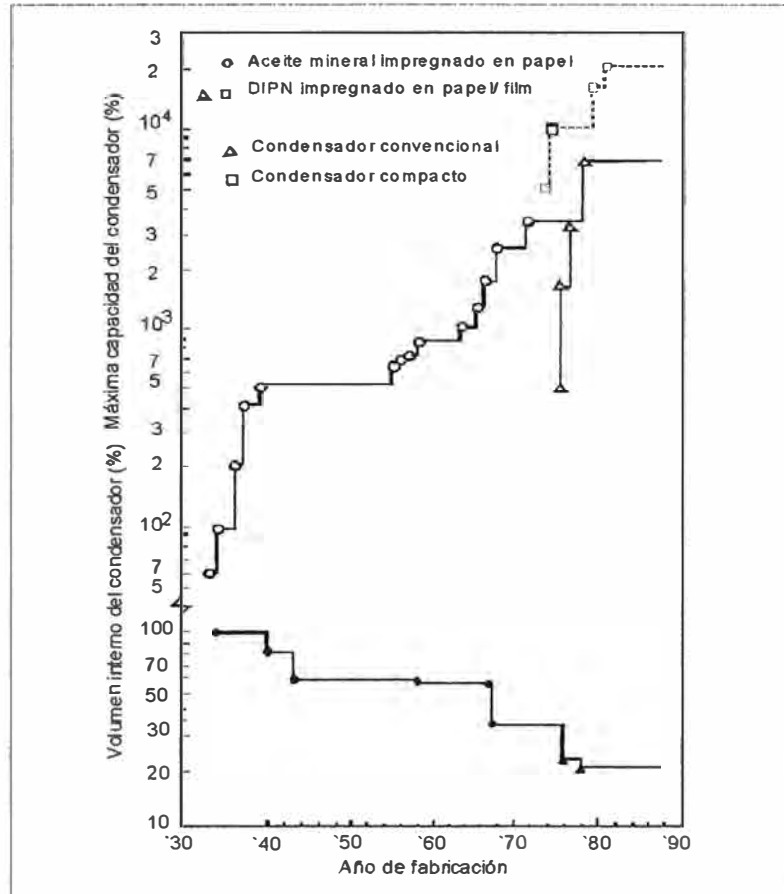


Fig. N° 3.5 Cambio de la capacidad máxima y el volumen interno de la unidad del condensador

3.5 Condensadores con cubierta metálica

Los condensadores con cubierta metálica, populares en otros países, también han sido fabricados y usados en Japón, principalmente, en los sistemas de distribución de energía y las instalaciones y edificios de los consumidores de energía pequeños, tienen una construcción e historia similar como aquéllos en otros países. La impregnación con aceite mineral, el papel de Kraft grueso era al principio usado para los condensadores con cubierta metálica hasta que el pentachlorodiphenyl (PCD) fue sustituido por el aceite a mediados de los años cincuenta. Se caracteriza como no inflamable y se tiene una alta constante dieléctrica y mejor estabilidad química y térmica el aceite mineral. El PCD fue reemplazado por el trichlorodiphenyl (TCD) en 1958. El TCD tiene una constante dieléctrica superior y un más bajo punto de congelación comparado con PCD. El papel aislante grueso fue reemplazado en 1964 por papel más delgado que tiene una más alta resistencia dieléctrica, y se hizo posible aumentar el diseño de

esfuerzo del papel impregnado con aceite y disminuir el tamaño de los condensadores.

Para mejorar la pérdida del dieléctrico de los condensadores, muchas investigaciones fueron hechas usando films sintéticos como los dieléctricos del condensador, y varios polímeros fueron examinados para reemplazar el papel en los años sesenta. El film de polyethylene (PE) impregnado con aceite mineral se usó al principio en 1961 para condensadores de alta frecuencia cuyo tamaño es principalmente decidido por la $\tan \delta$ de los dieléctricos. Para condensadores de frecuencia de potencia, sin embargo, orientado biaxialmente el film de PP era escogido, como él que tiene mejores propiedades dieléctricas, la buena compatibilidad con el TCD, y un más bajo costo. Para mejorar la impregnación con aceite y aumentar la constante dieléctrica, un sistema de dieléctrico mixto papel/film de PP se prefirió como los dieléctricos de condensadores de frecuencia de potencia y los condensadores mixtos de papel/film impregnados con TCD se comercializaron a finales de los años sesenta en Japón.

Para reducir la $\tan \delta$ de los condensadores de potencia, los condensadores all-film habían sido investigados enérgicamente, y condensadores all-film impregnados con TCD que adoptaron la superficie áspera o lisa del film PP y las láminas de aluminio repujadas fueron desarrolladas para mejorar la impregnación con aceite y fueron inicialmente comercializadas a mediados de los años setenta.

3.6 Los Condensadores all-film

Los condensadores all-film impregnados con DIPN o PXE de superficie áspera de film de PP fueron desarrollados y se puso en práctica a finales de los años setenta. Las interacciones entre los aceites y el film de PP se volvieron factores importantes en relación con la tensión del elemento de bobinado del condensador y las condiciones de impregnación; los efectos de hinchamiento del film tuvieron también que considerarse para asegurar la completa impregnación con el aceite. Estos problemas fueron investigados activamente y estos resultados dieron la información útil para el desarrollo de condensadores all-film y también impregnantes de aceite.

Las dispersiones α y β son los picos que existen en la relación $\tan \delta$ - temperatura del film PP calentado en PXE como se muestra en la Fig. Nº 3.6. La dispersión β se relaciona con el segmento en movimiento de la fase amorfa que existe en el film, y la dispersión α es causada por la polarización dieléctrica en la superficie de

la fase cristalina en el película. La $\tan \delta$ en la temperatura de dispersión β se correlaciona bien con la disolución del film en el aceite, y la $\tan \delta$ en la temperatura de la dispersión α se correlaciona con la absorción del aceite en el film, según se muestra en la Fig. N° 3.7.

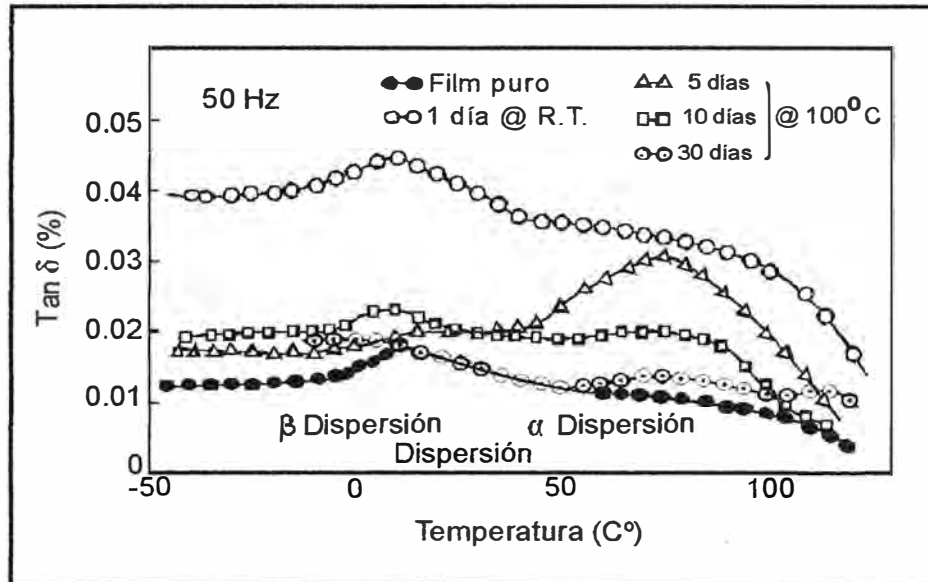


Fig. N° 3.6 Las dispersiones α y β de la relación $\tan \delta$ vs. temperatura

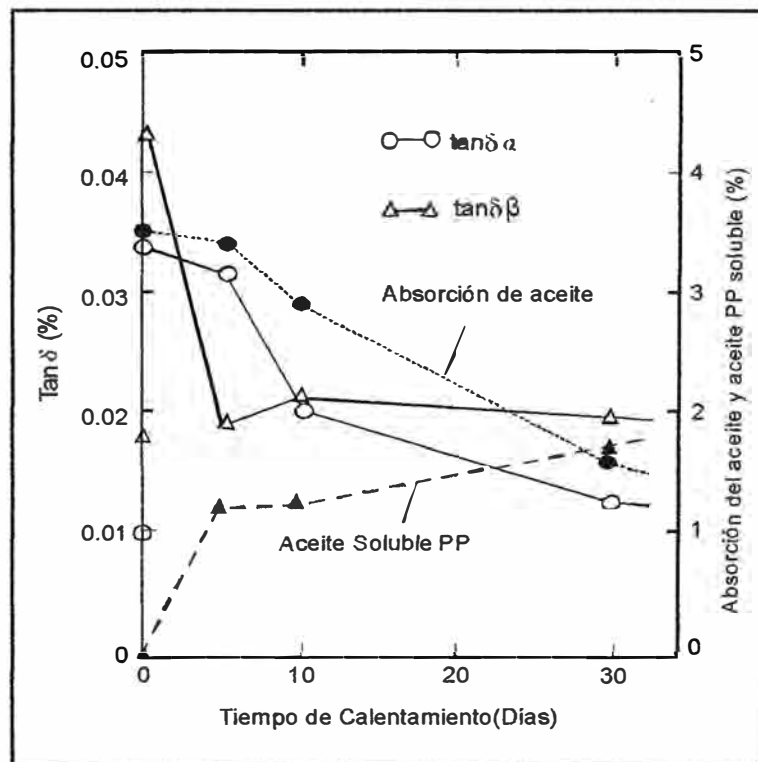


Fig. N° 3.7 Dependencia de $\tan \delta$ dispersiones de temperaturas α y β , polipropileno soluble en aceite y absorción de aceite calentado a 100°C

En los condensadores all-film, las impurezas juegan un papel importante, y sus efectos en las propiedades del dieléctrico de los condensadores all-film se han investigado. Se encontró que las impurezas disueltas en el aceite del film de PP ejercen una influencia dañina en las propiedades dieléctricas de los condensadores. El antioxidante contenido dentro del film se disuelve en el aceite y deteriora las propiedades dieléctricas de los condensadores.

Del punto de vista de energía y de pérdidas de dieléctrico, el condensador mixto papel/film es todavía ineficaz. En un típico dieléctrico mixto del condensador, aunque el papel forma parte sólo del 30% de volumen, contribuye solamente al 15% del rendimiento total del kVAr. El sistema es forzado más allá para operar ineficientemente en el 30% del papel en el sistema combinado del dieléctrico contribuye por encima de la mitad de las pérdidas totales del dieléctrico. Desde estas consideraciones, parecería bastante lógico eliminar el componente del papel en la próxima etapa del desarrollo del condensador, y esto ha llevado a llamarlo condensador all-film.

La eliminación del papel tiene ventajas significativas técnicas y prácticas: la reducción de pérdidas (aproximadamente 0.1 W/kVAr), aumento en el promedio de esfuerzo (hasta 60V/ μm) y alto rendimiento del kVAr por unidad de volumen. Es más, con la ausencia del papel, menos gas es emitido en los elementos fallados. Por consiguiente, la ruptura del tanque sobre la falla puede ser menos riesgosa en condensadores all-film que en ellos con all-paper o papel/film.

Los primeros condensadores "all-film" se desarrollaron a principios de los años setenta usando film liso convencional y láminas de aluminio lisas. Los resultados eran desastrosos con muchos fracasos en el servicio, particularmente en América del Norte, debido al bloqueo de la penetración del fluido entre todas las capas. En el ínterin de los años, muchos progresos han sido hechos debido grandemente a los desarrollos en el film, los impregnantes no clorados, descarga parciales y comprobación de vida acelerada. Los problemas de penetración del fluido han sido grandemente superados por el uso del 'áspero' film de Polipropileno y/o el repujado de láminas de aluminio. La superficie del film puede ser 'puesto áspero' en una sola superficie o en ambas superficies. El repujado normalmente se hace directamente por la máquina bobinadora. Pueden construirse tres tipos de elementos de all-film:

- Un dieléctrico formado dos o tres capas de film áspero con láminas de aluminio lisas.

- Un dieléctrico formado de dos capas de film liso con láminas de aluminio repujado.
- Un dieléctrico formado dos o tres capas de film áspero con láminas de aluminio repujadas.

En la actualidad, la mayoría de los fabricantes usa el primer método empleando ambas capas, simples y dobles de film.

Además de reforzar las características físicas del film para asegurar la buena impregnación, las interacciones film-fluidos en los condensadores all-film son aun más cruciales que en los condensadores de dieléctrico mixtos. Como se ha mencionado antes, el hinchamiento (por la penetración del fluido) y el encogimiento (por el calor) de lo orientado biaxialmente del film bajo elevadas temperaturas elevadas son dos áreas críticas. Un importante factor que afecta el hinchamiento y el encogimiento es el método industrial usado para estirar el film. Esto se puede hacer por el proceso del marco del bastidor o por el proceso de la "burbuja". El film bi-estirado por el método de la "burbuja" tiene una tasa de hinchamiento muy significativa. Su grosor se incrementa considerablemente desde el punto de vista termal (el encogimiento) y el contacto con el impregnante. El hinchamiento debido al fluido puede ser irreversible más allá de un cierto límite. Para asegurar la buena penetración del fluido al centro de los elementos, los parámetros siguientes deben tenerse en cuenta:

- a. Debe de haber un suficientemente alto factor total del film de si mismo del espacio más el factor del espacio en los elementos. Un valor entre 15 y 30% es considerado necesario.
- b. Los impregnantes no de deben ser demasiado viscosos (pegajosos).
- c. La temperatura de impregnación debe ser lo suficientemente baja para que el hinchamiento del film es un proceso mucho más lento que eso de la penetración del fluido. Es imprescindible que se impregne los condensadores en o cerca de la temperatura ambiente si el film se hincha a temperaturas sobre la temperatura ambiente.
- d. La presencia de un aditivo epóxido en el fluido impregnante mejora considerablemente la resistencia y vida del dieléctrico.

3.7 Los condensadores de film auto regenerables

La impregnación con aceite, condensadores con papel metalizado (MP: metallized paper) auto regenerables han sido comercializados para el uso de baja tensión a

mediados de los años cincuenta en Japón, y la demanda por este tipo de condensadores se fue agrandado constantemente. A mediados de los años setenta el MP fue cambiado al film metalizado de polipropileno (MF: metallized film), y la capacidad de la unidad fue aumentada debido a muy alta resistencia dieléctrica y baja pérdida del film. El film de PP tiene una muy alta resistencia dieléctrica (27 kV/milipulgada o 1063 kV/mm). Sin embargo, en la práctica real, incluye defectos, los cuales influyen en la resistencia dieléctrica, y una hoja del film de PP no se puede utilizar como dieléctrico para los condensadores con láminas de electrodo. Los condensadores MF con una hoja de film de PP son la solución a los problemas y puede ser usado para más altos esfuerzos, desde una falla en los dieléctricos se auto extinguirá. Éstos fueron usados en condensadores de alta tensión a finales de los años ochenta.

Hay dos tipos de condensadores de alta tensión auto regenerables (SH: self-healing), como se muestra en la Fig. N° 3.8. Los condensadores del tipo A, desarrollados en 1981, usan los film de PP como un dieléctrico y doblemente papel metalizado como electrodo para proporcionar la capacidad de auto regenerables y el trayecto de impregnación del aceite. Están generalmente impregnados con aceite aislante. La metalización en papel aislante asegura la buena adherencia del metal depositado en el papel y el electrodo de metal rociado.

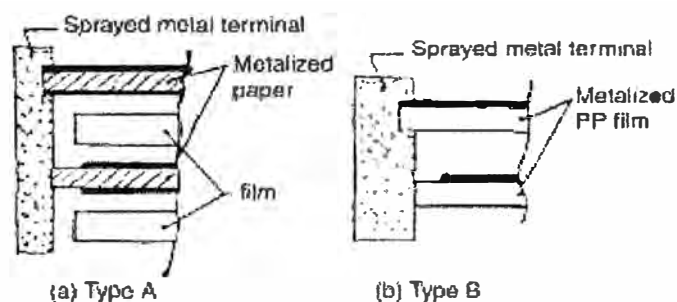


Fig. N° 3.8 Condensadores de alta tensión auto regenerables

Por otra parte, los condensadores del tipo B tienen igual construcción que los condensadores de baja tensión MF, los cuales son generalmente usados como condensadores sin aceite. Para este tipo de condensador, una superficie áspera del film se utiliza para prevenir el plegado debido a una atracción electrostática durante el bobinado y para proporcionar un trayecto para la impregnación con aceite.

Los condensadores MF son estables en períodos largos de servicio, pero demuestran una disminución leve de la capacitancia con el tiempo. Esta disminución de la capacitancia varía con el tipo del metal depositado por la metalización y se considera que es causado por descargas parciales y reacciones electroquímicas. Observando la superficie metalizada de aluminio del film tomada de un condensador MF impregnado con aceite antes y después de una prueba de envejecimiento acelerado muestra recesión del borde metalizado (erosión) y marcas circulares en la superficie (corrosión). Las investigaciones revelaron que la erosión es causada por descargas parciales y reacciones electroquímicas, y la corrosión es causada por las reacciones electroquímicas.

El aluminio o el cinc son utilizados como el electrodo metalizado. El aluminio es fácil de manejar en la fábrica pero causa una reducción de la capacitancia encima de los períodos largos de servicio. Por otra parte, el cinc da una menor reducción de la capacitancia y una resistencia específica mayor. El cinc es también probablemente para experimentar un cambio químico en presencia de la humedad y requiere cuidado especial y manejo en la elaboración.

La resistencia superficial del electrodo es uno de los factores importantes de los condensadores auto regenerables. La avería local causada por los defectos incluidos en el film es despejado a través de la evaporación del metal del electrodo en un área alrededor del punto por la energía que atraviesa ese punto. El grado de evaporación es dependiente de la resistencia del electrodo, la cual también afecta la característica de resistencia de la tensión de los dieléctricos. La resistencia más alta del electrodo causa un superior esfuerzo a la avería y una superior pérdida del condensador, y sobrecalentamiento causado por la pérdida, dando lugar a una reducción de la capacitancia y una deterioración de la función del condensador. Actualmente, la resistencia superficial del electrodo por unidad de superficie está generalmente seleccionada en un rango desde 3 a 9 Ω por metro cuadrado.

El film de PP aumenta en el grosor y contracciones o se amplía en longitud cuando se sumerge en aceite aislante, el grado varía, dependiendo del tipo de aceite aislante. La hinchazón del film de PP causa agrietamiento de electrodos, incrementa la resistencia y pérdidas del electrodo, y provoca la avería del condensador.

Los condensadores MF sin aceite impregnados con resina o SF₆ se han desarrollado en Japón y se han utilizado en aplicaciones especiales, por ejemplo en el interior para evitar el uso de impregnantes flamables y de este modo reducir

el riesgo de accidentes con fuego. Sin embargo, la aplicación de resina moldeada de los condensadores MF está limitada a casos especiales porque las características son inestables, surgiendo de las dificultades en lograr una completa impregnación con resina, la cual significa que el diseño de esfuerzo del elemento del condensador debe ser limitado a un nivel bajo. Por otro lado, se utilizan los condensadores MF impregnados con gas SF₆ para reducir extensamente el riesgo de fuego.

Un film metalizado especial cuyo electrodo está rajado en longitud y ancho, como se muestra en la Fig. N° 3.9, fue desarrollado en 1991. Este condensador MF hace posible que se restrinja la energía auto regenerable cuando la avería local del film ocurre y hace grandes condensadores MF de un volumen pequeño.

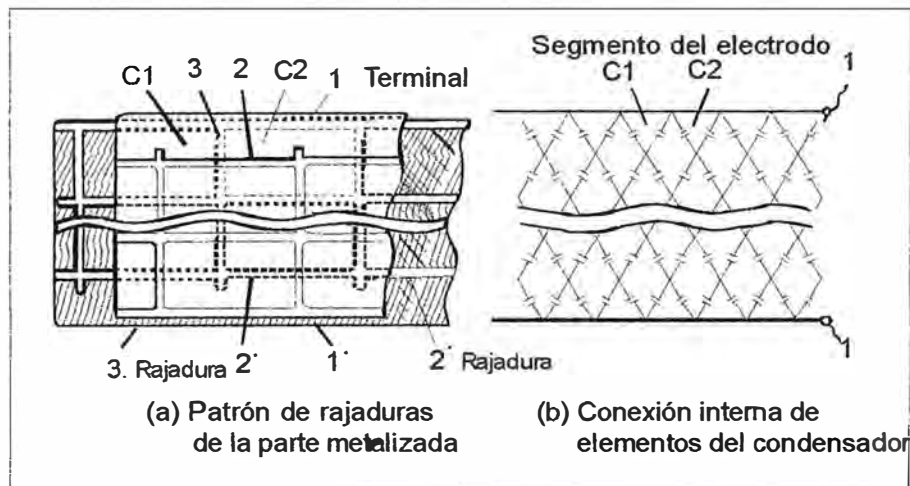


Fig. N° 3.9 Film metalizado especial de condensadores MF

3.8 Banco de Condensadores

Los bancos de condensadores de alta tensión japoneses generalmente son equipados con un reactor en serie y bobinas de descarga. Cada una de las fases del banco de condensadores conectado en estrella está compuesta de una serie de juegos conectados en dos grupos de condensadores monofásicos, como se muestra en la Fig. N° 3.10. La unidad del condensador tiene un manguito aislador, y el otro terminal está conectado al recipiente. La reactancia del reactor en serie es generalmente puesta al 6% de la reactancia del banco de condensadores para hacer una reactancia total del banco inductivo para la quinta y más alta corriente armónica, suprimiendo así las corrientes armónicas.

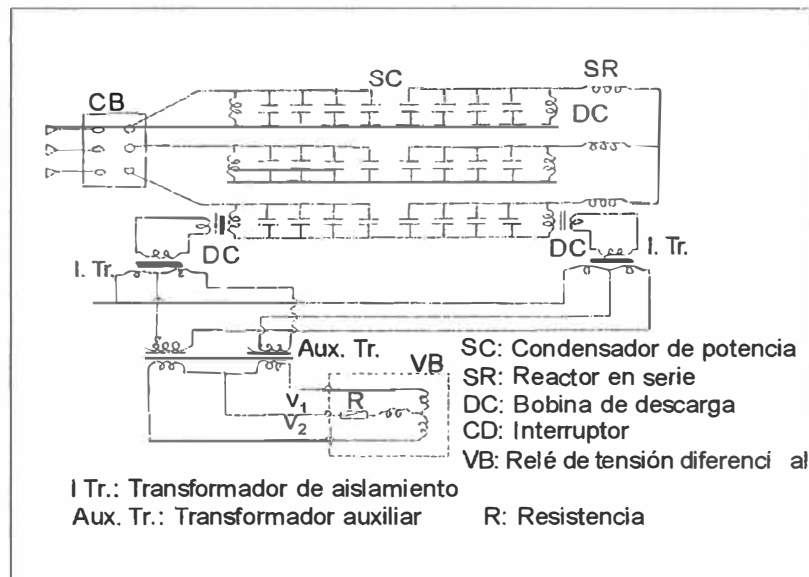


Fig. Nº 3.10 Diagrama de conexión de banco de condensadores de tipo tanque

Los bancos de condensadores instalados sobre 66 kV son generalmente montados en pedestales de montaje aislados. Las tres fases del reactor en serie generalmente se conectan al punto neutro del banco, y las bobinas de descarga están conectadas en paralelo con cada grupo de condensadores, como se ilustra en la Fig. Nº 3.10. Por esta construcción, las distancias entre cada fase de las barras colectoras de un potencial diferente y entre los grupos de condensadores de diferente potencial pueden mantenerse suficientemente para prevenir un corto circuito entre ellos. Las fallas de corriente causadas por la avería del condensador por un corto circuito de las barras colectoras son limitadas a un nivel aceptable, y así, sus efectos en la red de energía pueden ser descuidados debido a su magnitud pequeña.

Las unidades de condensador tipo tanque no son proporcionados con una protección mediante fusibles, ellos son desconectados por medio de otros dispositivos de protección si la unidad falla. Cuando dos o más elementos del condensador se conectan en serie, una corriente de fase se desequilibra debido a una falla del elemento si no es bastante grande para ser detectado fácilmente, y un desequilibrio de tensión el sistema de retransmisión se usa para detectar la falla. Los terminales de tensión de cada grupo de condensadores son reducidos por los bobinados secundarios de la bobina de descarga conectados en paralelo con el grupo y proporciona a un relé de desequilibrio de tensión a través de un transformador auxiliar, el cual compensa el desequilibrio inicial de tensión entre dos grupos de condensadores, como se muestra en la Fig. Nº 3.10.

Este sistema de retransmisión opera bien a pesar de las maniobras del banco de condensadores, una corriente armónica más alta, o la tensión desequilibrada de las fuentes de energía, y por consiguiente, el relé puede diseñarse para ser muy sensible para la detección de fallas en una unidad del condensador.

3.9 Banco de Condensadores Compactos

La escala de subestaciones se ha vuelto más grande año tras año con la expansión de la economía japonesa, y se propone aumentar las capacidades de la unidad en los principales equipos de las subestaciones y para encerrar las partes vivas de los equipos, por la causa de ahorrar las áreas de tierra necesarias, mejorando la seguridad y niveles de seguridad, y haciendo que sean libre de polución el medioambiente. Para corresponder con esto, se han desarrollado los bancos de condensadores compactos, y un banco de 80MVar, 66kV, 50 Hz, trifásico, el cual está compuesto de unidades de condensadores tipo tanque inactivo de 66/3kV, monofásico, 13.3 Mvar impregnados con DIPN, dieléctrico mixto papel/film, el cual fue instalado en 1979. Un banco de condensadores de 30MVar, 22 kV, 50 Hz, trifásico, dieléctrico all-film impregnado con PXE se instaló en 1990. La Fig. N° 3.11 muestra la construcción de una unidad de condensador. El elemento del condensador apilado de la unidad de condensador compacto es revestido con un escudo metálico para minimizar la intensidad del campo eléctrico entre las pilas y el recipiente, y el escudo es aislado del recipiente por una impregnación con aceite sintético, el grueso cartón comprimido aislante, como se muestra en la Fig. N° 3.11. Una bobina de descarga es colocada en cada recipiente desde entonces, como se muestra en la Fig. N° 3.10, no es económico equipar el banco de condensadores con unas bobinas de descarga.

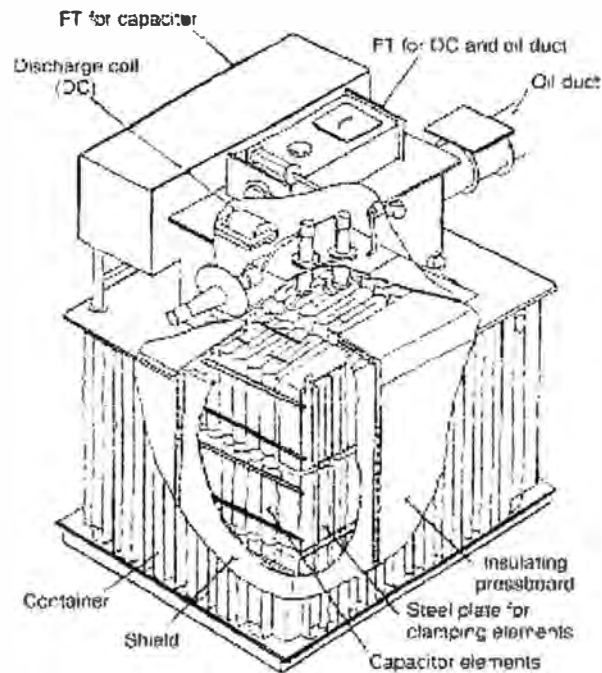


Fig. N° 3.11 Construcción de una unidad de condensador para un banco de condensadores compacto (13.34 kVar, 38kV, 50 Hz, monofásico)

La conexión de las barras entre las unidades de condensadores, el reactor en serie y los dispositivos de distribución están encerrados por conductos y aislados por papel impregnado con aceite mineral; por consiguiente, el banco entero está completamente encerrado y está libre de la salinidad y contaminación, y la operación segura y el fácil mantenimiento del banco están asegurados. Este banco empareja los alrededores muy bien, especialmente en las subestaciones de SF6 gas-aislado, dispositivos de distribución revestidos de metal, y requiere menos espacio que el convencional, el cual se monta en pedestales aisladores. Por ejemplo, el área de tierra requerida el banco de condensadores compacto de 80MVar, 66kV, 50 Hz, trifásico es del 35% de un banco convencional de los mismos rangos. La capacidad total de los bancos de condensadores compactos entregados a finales de 1993 alcanzaron cerca de 11 000 Mvar.

También era necesario desarrollar un filtro de armónico AC del tipo del tanque estático con los mismos requisitos que los bancos de condensadores compactos, y un filtro compacto AC del tipo tanque estático de 275 kV fue desarrollado y puesto en servicio en 1992.

3.10 Influencias de la lámina del electrodo

Se encontró que la $\tan \delta$ de los condensadores se vuelve más grande cuando el ancho de la lámina del electrodo se vuelve más estrecho, y está dado por la ecuación siguiente:

$$\tan \delta = \tan \delta_0 + \left(\frac{2}{b}\right) \tan \delta_E$$

Donde, $\tan \delta_0$ es $\tan \delta$ del mismo dieléctrico, el $\tan \delta_E$ es el aumento de la $\tan \delta$ causado en el borde del electrodo, y b es la anchura de la lámina del electrodo. Este aumento de $\tan \delta$ se observa en los condensadores all-film para quien la $\tan \delta$ es muy pequeña, y las relaciones medidas entre el $\tan \delta$ y la anchura del electrodo se da en la Fig. N° 3.12.

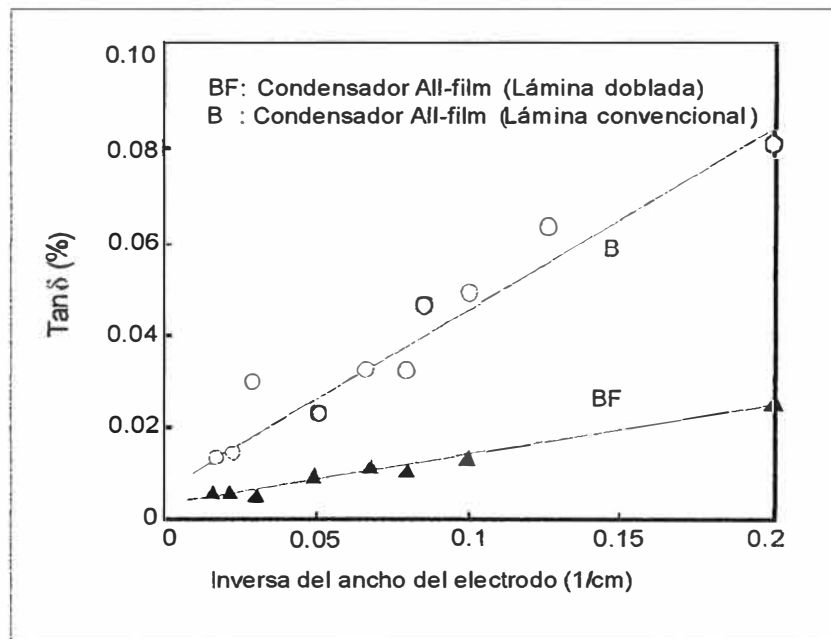


Fig. N° 3.12 Influencia del borde del electrodo en la $\tan \delta$ del condensador all-film y la mejora de la $\tan \delta$ por el doblado de la lámina del electrodo

Es bien sabido que la tensión de inicio de la descarga (DIV) de un condensador está restringida por los altos campos eléctricos en el borde del electrodo; el doblado de la lámina libera el campo eléctrico y eleva el DIV de los condensadores como se muestra en la Fig. N° 3.13. El doblado de la lámina también mejora la $\tan \delta$ de los condensadores, según lo demostrado en la Fig. N° 3.12. Los condensadores all-film con la lámina doblada fueron empleados a inicios de los años ochenta.

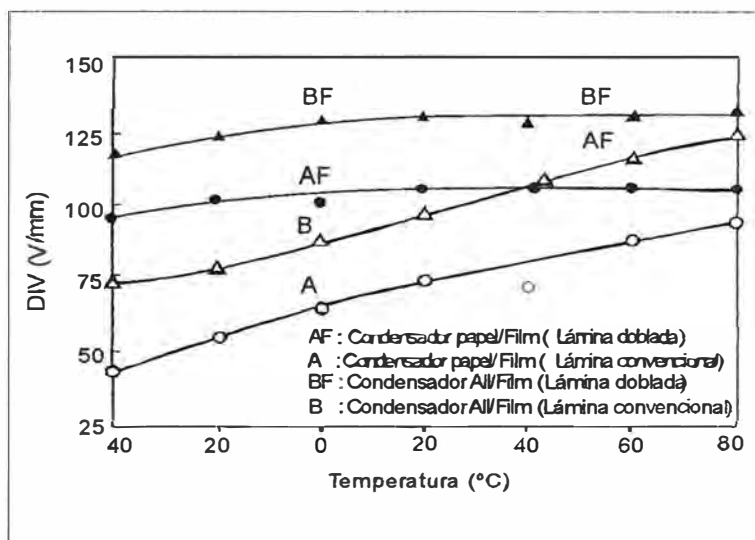


Fig. N° 3.13 Característica de la temperatura de DIV de los condensadores de film

3.11 Investigaciones en la resistencia dieléctrica

La resistencia dieléctrica es la propiedad más importante de los condensadores de potencia y se ha estudiado enérgicamente. Se ha puesto en claro, tanto teórica como experimentalmente, que el cambio de los esfuerzos de la interrupción de DC y de AC con porcentaje del film por el volumen del condensador mixto papel/film y el de all-film, según lo demostrado en la Fig. N° 3.14.

Se sabe que, cuando la tensión AC es impuesta en los dieléctricos compuestos, el tiempo (T) de la interrupción después de imponer la tensión depende grandemente sobre la tensión, y es claramente evidente que las características V-T son observadas. Se encontró que las características V-T de los condensadores de potencia consisten de dos regiones, una región de largo plazo, el cual es iniciado por la irrupción o avería del aceite, y una región a corto plazo, la cual está decidida por la irrupción o avería del papel o film, como se muestra en la Fig. N° 3.15. La tensión de esfuerzo (E) de ambas regiones de los condensadores de grosor del dieléctrico (t) puede estar generalmente representado por la siguiente fórmula:

$$E = E_1 t^{-a} + E_0 = E_1 t^{-a} + E_2 t^{-b}$$

Donde, E_0 es una tensión de esfuerzo de resistencia a largo plazo del voltaje de la característica V-T, las cuales se relacionan de cerca con el DIV, y E_1 , E_2 , a , y b son los parámetros que dependen de los dieléctricos.

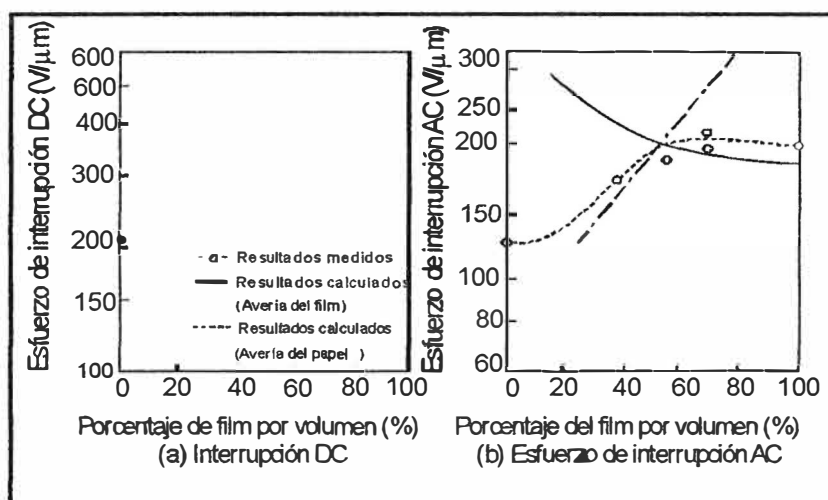


Fig. N° 3.14 Esfuerzos de irrupción en AC y DC de los condensadores mixto papel/film

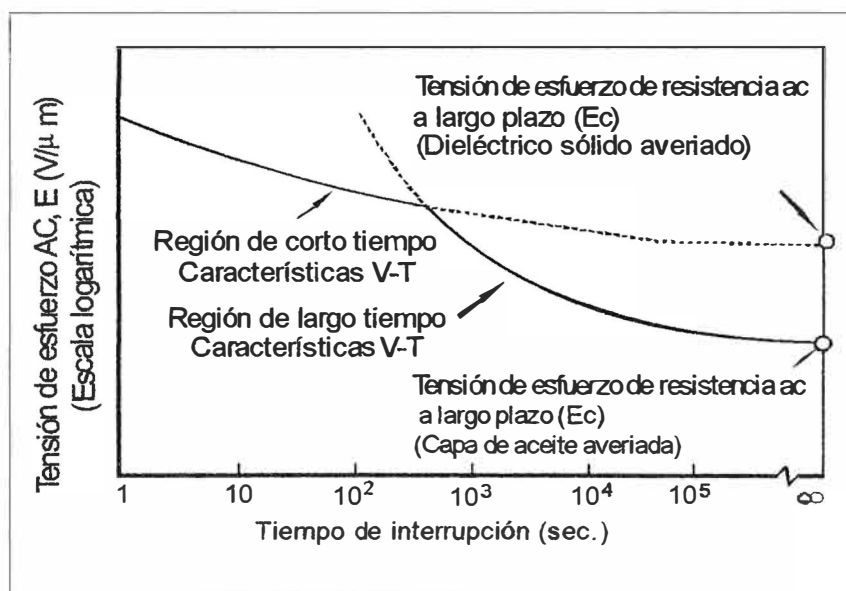


Fig. N° 3.15 Las características de V-T de dieléctricos compuestos

3.12 Protección contra ruptura de la Caja del condensador

Cuando los aceites inflamables de hidrocarburo aromático fueron adoptados como sustitutos para los PCBs, era importante prevenir los accidentes con fuego que pudieron ocurrir en la caja del condensador en caso de avería del condensador y en caso que se rompa, las protecciones para prevenir las rupturas fueron desarrolladas.

Cuando los aceites del hidrocarburo aromáticos inflamables eran adoptado como suplentes para PCBs, era importante que prevenga accidentes de fuego de que

podrían ocurrir en el caso una falla del condensador y una ruptura del caso, para que los protectores prevengan se desarrollaron las rupturas.

La Fig. N° 3.16 (a) muestra un dispositivo mecánico de protección. Dos placas de interrupción, encajadas en ambas paredes de la caja, están conectadas con el punto neutro del condensador o entre las líneas y el condensador. Cuando la deformación de la caja es transmitida a las placas de interrupción, las placas se rompen casi al mismo tiempo que se desconecta el condensador. Para prevenir el reencendido y asegurar la interrupción de alta velocidad, las placas son hechas de láminas de cobre, las cuales se cortan instantáneamente de modo que las distancias del aislamiento son mantenidas apartadas lo suficientemente lejos para evitar el reencendido.

La Fig. N° 3.16 (b) ilustra el sistema de protección que detecta cualquier aumento de la presión del aceite en el caja usando un pequeño fuelle conectado a la caja y dispara el interruptor del condensador cuando la presión en la caja excede el límite.

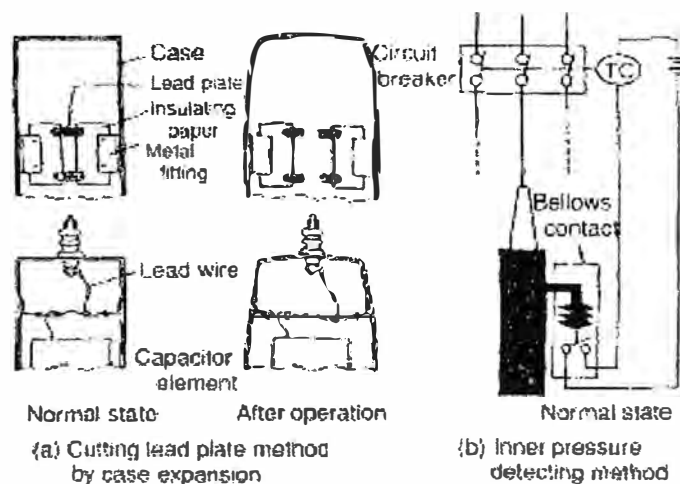


Fig. N° 3.16 Dispositivos de protección mecánica de condensadores de potencia

3.13 Diagnóstico de los condensadores de potencia

Los condensadores de potencia son generalmente muy confiables; sin embargo, si se usan materiales defectuosos no detectados, si la mano de obra es inexperta, o si las condiciones de operación exceden las condiciones especificadas, los condensadores podrían deteriorarse y finalmente fallar. Por lo tanto, es importante detectar la deterioración antes de la falla, y la capacitancia, tan δ y niveles de descargas parciales han sido medidos como diagnóstico no destructivo. Como la

capacitancia del condensador de potencia es muy grande, es a menudo difícil de determinar eléctricamente descargas parciales débiles (menores que 30 pC) necesitado para diagnóstico, y un sonido ultrasónico, 40 a 100 kHz, generado por las descargas parciales es frecuentemente medido para detectar descargas parciales débiles cerca de 10 pC. Supervisando los gases combustibles generados por la descomposición del aceite causado por las descargas parciales y disueltas en el aceite, también es utilizado para diagnosticar los condensadores de potencia. En un sistema de supervisión del gas, el hidrógeno disuelto en el aceite es supervisado, el contenido se correlaciona bien con el total de contenido de gases combustibles disueltos en el aceite. El hidrógeno pasa a través de una membrana permeable de hidrógeno y es detectado por un sensor de hidrógeno en el compartimiento de gas unido al recipiente del condensador. Este sensor detecta la concentración del hidrógeno usando un cambio de resistencia debido a un cambio de la conducción del calor del gas

3.14 Adelanto de la unidad del condensador

Los condensadores con cubierta metálica alcanzaron progresos notables, según lo mencionado anteriormente y el diseño de esfuerzo y el volumen de los condensadores cambiaron según se muestra en la Fig. N° 3.17.

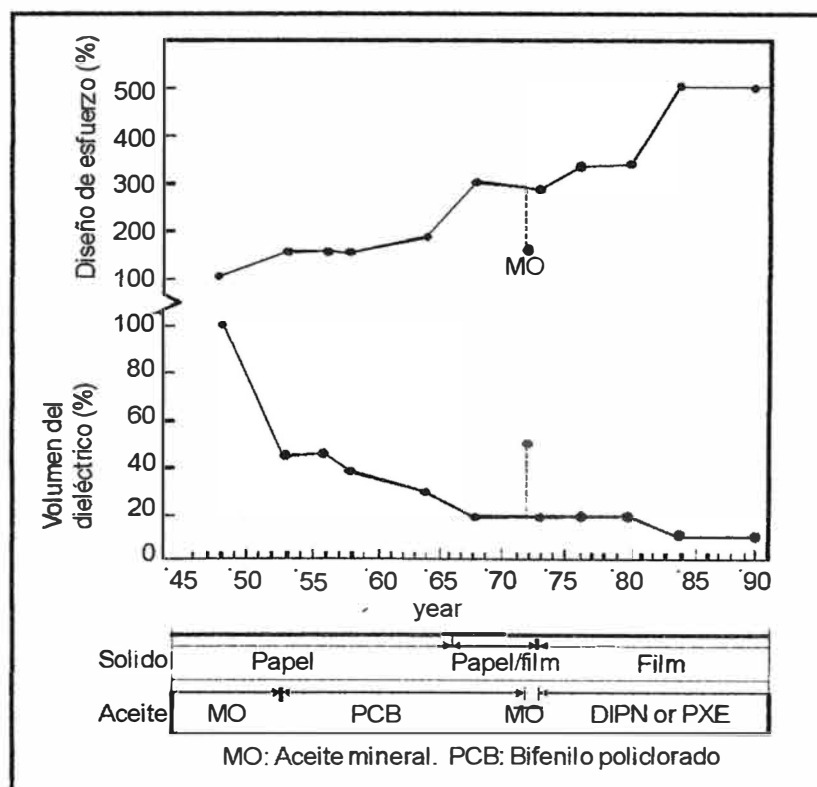


Fig. N° 3.17 El cambio del diseño de esfuerzo y el volumen del dieléctrico de los condensadores con cubierta metálica

3.15 Desempeño en servicio de los condensadores de potencia (ejemplo de la red de Alta Tensión del Nuevo Sur de Gales)

En la actualidad, la cantidad total de condensadores de potencia instalados en la red de Alta Tensión del Nuevo Sur de Gales es más de 3500 MVar. Desde 1968 aproximadamente 420 condensadores con cubierta metálica (73 MVar) han fallado directamente durante el servicio. Esto corresponde a una tasa de falla de menos de 0-2% por año con una capacidad instalada de 16 500 condensadores con cubierta metálica.

Los condensadores all-paper de tipo de tanque (capacidad total instalada de 550 MVar) ha dado un desempeño fiable. Para fechar, ningún fracaso debido a las fallas de aislamiento del dieléctrico se ha informado. Ninguno se ha comprado desde 1966 debido a sus precios más altos comparados con el tipo cubierta metálica, y también ellos requieren un espacio mayor en las subestaciones.

Los primeros condensadores con cubierta metálica de all-paper impregnados con PCB fueron introducidos en 1956. De este tipo se compraron por encima de 800 MVar entre 1966 y 1972. Desde 1982, éstos han sido reemplazados gradualmente por los condensadores con dieléctrico mixto papel/film sin PCB. El desempeño de este tipo de condensador no ha sido bueno. Más de 250 condensadores con cubierta metálica (aproximadamente 25 MVar) de 19 bancos (258MVar) han fallado en servicio. Las fallas iniciales han sido atribuidas a las fallas del aislamiento del dieléctrico (pandeo de cubiertas metálicas, debido al gas, prematuro envejecimiento debido a sobreesfuerzos del borde de la lámina, pobre impregnación de los elementos, etc.) en algunos bancos. Pero, en la mayoría de casos, el fracaso se ha atribuido a los agentes externos como la polución, alimañas (las urracas, los gatos, etc.), fallas mecánicas en los fusibles externos (el rizado defectuoso), conexiones de alta tensión (las grapas, pernos y empalmes), aisladores resquebrajados, etc. Se ha observado que la frecuencia de fusión del fusible y las fallas de los condensadores con cubierta metálica tiende a incrementarse después de una falla inicial. Esto sugiere que las latas que no han fallado en el banco al sobreesfuerzo por sobretensiones anormales creado por falla(s) inicial (es).

El desempeño de los condensadores mixtos de papel/film ha sido algo de mezcla. Aquéllos impregnados con los fluidos sin PCB se han desempeñado bien, considerando que las unidades impregnadas con PCB no lo han hecho. Desde 1973, más de 1800MVA_r de condensadores mixtos de papel/film se ha instalado. Aproximadamente el 35% de éstos son del tipo impregnados con PCB. Desde 1979, se han comprado solamente bancos con sin PCB. Éstos son del tipo Wemcol, Dow y PXE. Los bancos de PCB están siendo reemplazados gradualmente por los del tipo sin PCB. Aproximadamente 150 latas impregnadas de PCB, condensadores mixtos de papel/film de 20 bancos (aproximadamente 2500 latas) fallaron por encima de un período de seis años (1973 a 1979) produciendo una significativa reducción de la capacidad y, en algunos casos, el retiro de los bancos.

Las causas de las fallas son variadas, pero en la mayoría de casos, la falla se atribuye a las deficiencias del diseño, proceso y control de calidad, por ejemplo, el entrapamiento de aire entre las capas del film encima sobre extendido, la pobre impregnación, la erosión de dieléctrico en el borde del electrodo debido a las actividades de descargas parciales, la contaminación del fluido, los fusibles defectuosos (ambos interno y externo), la soldadura defectuosa (las goteras de los fluidos) y manguitos aisladores con cierre soldado. La polución, las alimañas, los defectos en los sistemas de protección en cubierta metálica-falla, la corriente de retorno de los interruptores también han causado las mayores fallas. Las fallas no siempre han sido causadas por los condensadores defectuosos. Las condiciones anormales del sistema, inadecuados equipos de protección, la corriente de retorno de los interruptores y procedimientos de mantenimiento deficientes pueden afectar el desempeño de los condensadores. Otra observación era que las unidades que han fallado no son aquéllas que se diseñaron para operar a valores más altos. De hecho, todos los bancos diseñados para alto esfuerzo no han experimentado fallas. Esto sugiere que la influencia del proceso y control de calidad es dominante.

Por otro lado, el desempeño de los sin PCB, los condensadores mixtos de papel/film han sido buenos. Desde 1979 se han comprado aproximadamente 1500 MVA_r de este tipo (incluyendo 300 MVA_r como reemplazos). Las fallas se han limitado a sólo diez latas (2-5 MVA_r). El aparente desempeño superior de los condensadores impregnados con sin PCB parece ser consistente con las experiencias reportadas de en el mundo.

Con la fiable experiencia en servicio de los sin PCB, los condensadores de dieléctrico mixto y la fabricación limitada y la experiencia en servicio del condensador all-film, se ha adoptado un acercamiento cauto con la nueva tecnología. En 1980, un banco de 33 kV, 6MVA de all-film (una sola hazy), los condensadores DOW impregnados con fluidos fueron instalados para obtener experiencia en servicio. Así lejos, las unidades han dado un desempeño libre de problemas. Recientemente, se ha hecho los pedidos para 560MVA de condensadores all-film, incluyendo 300MVA de condensadores thyristor-switched asociados con dos compensadores estáticos Var grandes. Se han puesto sólo 50MVA en servicio y ninguna falla se ha reportado. Sin embargo, las fallas bajo la prueba de trabajo fueron experimentados antes que las unidades fueran encargadas.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS DE LOS CONDENSADORES DE POTENCIA

4.1. Pruebas de Diseño

La solidez de un diseño del condensador es evaluada por las pruebas de diseño o pruebas "tipo". Tradicionalmente, había la prueba de estabilidad térmica, prueba de descargas parciales, la medida de las pérdidas a temperatura elevada, la prueba de descarga de cortocircuito, impulso y prueba de resistencia de un minuto AC.

Con los condensadores all-paper, la prueba de estabilidad térmica se había vuelto un factor limitante en el diseño. Pero con condensadores de dieléctrico mixto los cuales producen solamente la mitad de pérdidas, se había vuelto una prueba mucho más fácil para pasar. Debido a las bajas pérdidas en los condensadores all-film, esta prueba se consideró inútil. Pero la experiencia ha mostrado que es aun útil, particularmente en detectar fluido y/o films contaminados. Esta prueba también ha verificado los efectos de barrido de aditivos epóxidos de los fluidos.

4.1.1 Prueba de descargas parciales

La prueba de descargas parciales es de lejos la prueba más útil para determinar la calidad del diseño y elaboración, particularmente la impregnación. Con los condensadores all-paper, esta prueba no había sido un problema por dos razones. Primero, el papel celuloso, siendo relativamente poroso, permite una buena impregnación y da un pequeño problema con las descargas parciales surgidas de la formación nula.

En segundo lugar, debido al rango relativamente bajo en kVar de las unidades (25-100kVar), no ha habido ninguna limitación en la prueba provocada por la gran fuente de prueba requerida y la reducción en sensibilidad de la medida que disminuye con el aumento de la capacitancia. Sin embargo, estas limitaciones probadas han sido encontradas en los años recientes donde el tamaño de la unidad ha crecido de 25 kVar a 380 kVar.

No obstante estas limitaciones, las descargas parciales son más importantes en los dieléctricos mixtos y condensadores all-film, la impregnación satisfactoria del film en contacto con el electrodo exige características especiales, en el diseño y elaboración. Varias fallas se han debido a la incapacidad de mantener la impregnación satisfactoria sobre todo en la presencia de ciclos térmicos y sobretensiones momentáneas. Los fabricantes reconocen la importancia de esta prueba para verificar su diseño y elaboración, aunque en pequeñas unidades de prueba kVar. La nueva norma australiana en condensadores shunt establece que las pruebas de descargas parciales serán divididas en pruebas tipo, de rutina y muestra. Las pruebas tipo se llevan a cabo preferentemente en unidades completamente llenas. Si los suministros necesarios de la prueba no están disponibles, o si la capacitancia es bastante grande para presentar un problema de sensibilidad, la prueba puede realizarse en una unidad de prueba especial teniendo que tiene un menor valor de kVar, sin embargo, con los elementos de diseño, construcción y tamaño idénticos al usado en la producción.

La parte interna de un condensador puede estar sujeto a choques mecánicos durante la energización debido a la alta frecuencia y a la máxima corriente inicial de energización. Para evaluar la integridad mecánica de conexiones interiores (los fusibles, resistencias etc.), es considerado obligatorio aplicar la prueba de descarga de cortocircuito en una base rutinaria. La nueva norma australiana estipula este requisito.

La norma IEC y la australiana (por ejemplo), ambas permiten la opción de cualquier prueba con una tensión alterna de $2.5U_n$ para 10 segundos o una tensión directa de $4.4U_n$ para 10 segundos. Fundamentalmente, aun cuando asumiéramos la equivalencia en magnitud de tensión, el esfuerzo de distribución a través de los componentes del dieléctrico (papel, film y fluido) son básicamente diferentes bajo condiciones sostenidas de tensión AC y DC. Además, bajo las condiciones de servicio reales, los condensadores están sujetos a tensiones AC y DC. Por consiguiente, hay un caso fuerte por especificar AC rutinario y pruebas de tensión DC.

La medición de las pérdidas se ha vuelto una prueba difícil para los condensadores all-film de baja pérdida. Los fabricantes exigen que las pérdidas sean tan bajas como el $0.2W/kVAr$, (0.02% factor de dispersión de dieléctrico). Para gran capacitancia, condensadores all-film, estos circuitos tienen una exactitud solamente de $0.1 W/kVAr$. Así un 50% de error es posible. Actualmente, un grupo de trabajo del IEC ha propuesto un método conocido como el método de

“comparación de watt” para medir las pérdidas como una prueba tipo. Este método utiliza una resistencia simulada la cual puede producir el mismo valor de elevación de temperatura mural como el que tiene el envase utilizado para una entrada de potencia medible.

4.1.2 La prueba de sobretensión momentánea

En muchos casos, los condensadores habían pasado las pruebas prescritas de fábrica, pero fallaron poco después de la puesta en servicio. Los análisis de tales fallas sugieren que las unidades pueden haber estado sujetas a sobretensiones momentáneas.

Sin embargo, durante muchos años, no ha habido pruebas prescritas para cubrir el desempeño de los condensadores contra las sobretensiones. En 1978, una prueba con sobretensión momentánea fue inventada por Electricité de Francia (EdF). Esta prueba consiste en la aplicación repetida de una sobretensión sinusoidal 50Hz de $2.25U_n$ valor RMS, cada uno de 1 segundo de duración en intervalos de 5 minutos. Para explorar el comportamiento a diferentes temperaturas, la temperatura del condensador es reducida a -25°C durante la noche, y las sobretensiones son aplicadas durante un período de 7 horas durante el cual el condensador gradualmente alcanza la temperatura ambiente. Un total de 1000 ciclos de sobretensiones es considerado necesario para expresar un juicio. En vista de la dificultad de medir las descargas parciales en una unidad completamente llena, el criterio de aceptación se basa en una medida de pérdidas, y se considera que es satisfactorio cuando éstos no aumentan más del 40%. Esto se ha vuelto conocido como la prueba de duración de las sobretensiones momentáneas (TOV Transient Overvoltage). Para verificar cualquier deterioración que puede haber desarrollado el condensador durante la prueba TOV, una prueba de sobrecarga térmica (TOL Thermal Overload), o prueba de envejecimiento acelerado se ha agregado. Esta prueba aplicada inmediatamente después de la prueba TOV cuando la unidad es expuesta a $1.4U_n$ durante aproximadamente 5000 horas en un ambiente de $50-55^{\circ}\text{C}$. El criterio para la aceptación es que ninguna descarga eléctrica ocurra en el aislamiento durante esta prueba. Estas pruebas se han vuelto colectivamente conocidas como las pruebas de duración, y han sido especificadas como una prueba tipo por la Comisión australiana en 1979. La adopción de la prueba de duración ha estado bajo la consideración del Comité de Condensadores de la IEC desde 1981 cuando

el informe del proyecto fue hecho público para consideración internacional. La versión de la IEC es menos rigurosa que la prueba de duración EdF en que ha reducido drásticamente algunos de los parámetros de la prueba y criterio de aceptación, por ejemplo, en la prueba de envejecimiento acelerado, el período de la prueba ha sido reducido de 5000 horas a 500 horas, y el rango de temperatura ambiente ha sido reducido de 50-55°C a 35-45°C.

Si uno acepta la correlación entre la descarga parcial y la prueba de duración con el desempeño superior y fiable de los condensadores con dieléctrico mixto sin PCB, entonces estas dos pruebas deben ser obligatorias para los nuevos condensadores all-film.

Por ejemplo, en la nueva norma australiana para los condensadores shunt, una versión modificada del proyecto del IEC de la prueba de duración ha sido adoptada.

Las modificaciones han sido hechas en por lo menos en dos áreas importantes. Primero, en la prueba de envejecimiento acelerado el IEC exige poner la unidad en un ambiente de sólo 35-45°C. Esto fue considerado ser inadecuado en vista que la sensibilidad de condensadores all-film a la temperatura, y el hecho que las pérdidas (calentamiento) de los condensadores all-film están muy reducidas, particularmente cuando las unidades de prueba tienen menos elementos comparados con condensadores con cubierta metálica completamente llenos. En la nueva norma, este rango de temperatura ha sido el incrementado a 50-55°C. En segundo lugar, el criterio de aceptación propuesto por el IEC es considerado ser inadecuado. Esto requiere solamente la detección de una avería de un elemento, o la operación de un fusible interno, como una falla. En su elección de parámetros, el IEC ha reconocido la presencia de descargas parciales y sus poderes destructivos. Sin embargo, ellos han escogido no usar la medida de descargas parciales como un criterio de aceptación. La versión australiana contiene este criterio.

De un punto de vista de comprobación, parece que existen limitaciones en las pruebas convencionales para alta capacitancia de los condensadores all-film de baja pérdida. En la actualidad, se cree que las pruebas de duración (modificada) pueden ser las únicas pruebas que son lo bastante rigurosas para medir el desempeño potencial de un condensador all-film. En los recientes años, las pruebas de duración parecen haber sido adoptadas y usadas ampliamente por fabricantes y usuarios en la evaluación de nuevos diseños. Así lejos, las pruebas parecen dar las nuevas revelaciones sobre el desempeño de condensadores all-

film. Basado en la prueba de envejecimiento acelerado, un reciente reporte sugiere que, con ciertos tipos de "construcción", los condensadores all-film son propensos al envejecimiento prematuro cuando es sujeto a temperaturas altas de operación. Fue declarado que este tipo de envejecimiento no era evidente en los condensadores de dieléctrico mixto. Fue sugerido que este fenómeno pueda ser relacionado a ese hecho que los condensadores de dieléctrico mixto están operando a un esfuerzo eléctrico menor. Fue sugerido que una investigación extensa se lleve a cabo para entender el mecanismo de este envejecimiento y averías en los condensadores all-film.

4.2. Pruebas para verificación de funcionamiento de condensadores de potencia

4.2.1 Las pruebas del campo para los condensadores de potencia.

Las pruebas del campo difieren dependiendo si un condensador de potencia está poniéndose en servicio o si está verificándose después de que ha estado en servicio. Los bancos de condensadores cambiados deben verificarse para una correcta operación de conexión.

a. ***Pruebas antes de entrar en servicio.*** La experiencia ha mostrado que estas pruebas no pueden ser necesarias en todos los condensadores.

Las pruebas consisten en segundas aplicaciones de tensión de no más del 75% de la tensión de las pruebas en fábrica usadas en la prueba de terminal a terminal. Las pruebas de tensión en fábrica de terminal a terminal están aplicadas durante 10 segundos en 4.3 veces el rango de tensión eficaz para la entrada en DC, y dos veces el rango de tensión eficaz para la entrada en AC. Si las pruebas del terminal a la carcasa son hechas, referirse a las instrucciones del fabricante o a las pruebas de tensión en AC de ANSI/IEEE 18.

b. ***Pruebas después de haber estado en servicio.*** Estas pruebas son sólo necesarias en determinadas condiciones de operación de los condensadores de potencia después de la exposición a posibles daños u otros problemas indicados. La resistencia del dieléctrico puede medirse aplicando la misma tensión que en la prueba antes de entrar en servicio. La capacitancia puede determinarse aplicando una tensión y frecuencia conocida con una buena forma de onda. En cortocircuito o circuito abierto los condensadores serán indicados por esta prueba.

4.2.2 Las pruebas terminales de condensadores de potencia.

Las pruebas entre terminales pueden ser para medir la resistencia, como lo recomendado por ANSI/IEEE 18.

a. **Prueba de tensión entre terminales.** El propósito de esta prueba es determinar si el condensador funciona de acuerdo con su capacidad. Los condensadores con un defecto interno son más económicos reemplazarlos que repararlos.

Procedimiento. Con el condensador aislado de tierra, aplicar entre terminales una tensión igual a la tensión nominal del condensador, en concordancia con la Fig. N° 4.1. La tensión debería ser aplicada por un minuto con el circuito de prueba protegido por fusible. El rango del fusible deberá ser recomendado por el condensador o si ese tamaño no está fácilmente disponible, uno nominal de dos veces la corriente normal de carga. Medir la tensión y la corriente. El amperímetro debe ser provisto con un circuito pequeño de conexión. El interruptor sólo debe abrirse después de que ha sido determinado para que no exista corto circuito.

Interpretación. La fusión del fusible indica un corto circuito en el condensador. La ausencia de corriente indica que el condensador está en circuito abierto. Los condensadores en buen estado tienen lecturas de corriente de 100 a 115% los valores nominales, con la carcasa y temperatura interna de 25°C. Las lecturas de corriente por encima de 115% de la corriente nominal pueden indicar un corto interno o la presencia de armónicos en la prueba de tensión. Si se sospecha de la forma de onda de la prueba de tensión, la prueba deberá ser repetida usando una fuente alterna de potencia eléctrica.

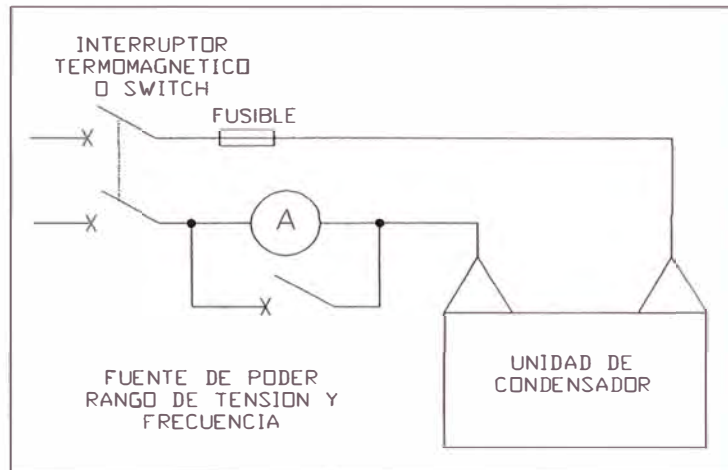


Fig. Nº 4.1. Circuito de la prueba de tensión entre terminales

- b. **Prueba de aislamiento entre terminales y carcasa.** El propósito de esta prueba es determinar la adecuación del aislamiento a tierra dado por el condensador. Esta prueba deberá ser aplicada entre los dos manguitos aisladores, en condensadores monofásicos, pero no para condensadores donde la carcasa es utilizada como terminal.

Procedimiento. Con el condensador aislado de tierra, aplicar una tensión igual a dos veces la tensión nominal entre la carcasa y terminales (todos los terminales conectados juntos), en concordancia con la Fig. Nº 4.2. La tensión deberá ser aplicada por un minuto, con el circuito de prueba protegido por fusible y con una impedancia suficiente para limitar la corriente, el condensador en prueba debería estar en cortocircuito.

Interpretación. El fracaso de pasar esta prueba indica una descarga eléctrica (flashover) interna y el condensador debe de ser reemplazado.

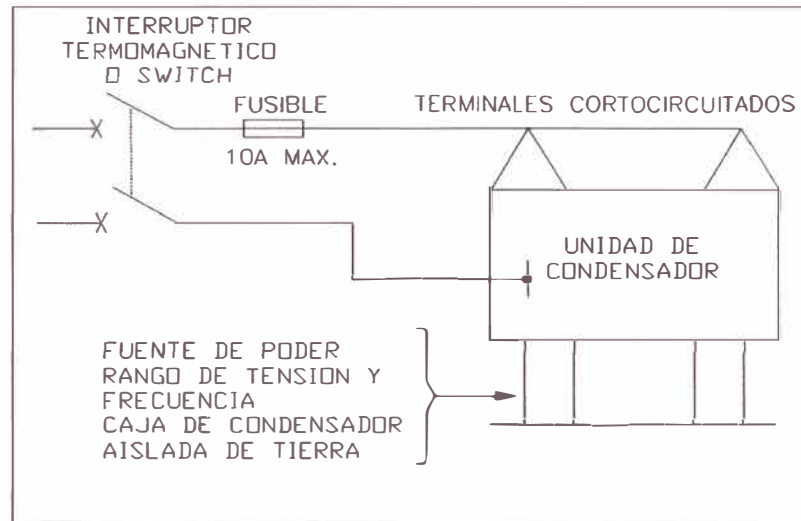


Fig. Nº 4.2. Circuito de la prueba de aislamiento entre terminales y carcasa

4.2.3 Las pruebas de la gotera de condensadores de potencia.

Las carcasas de los condensadores que tienen fugas. Desde que las instalaciones de los condensadores están normalmente formadas por un número de unidades individuales, a veces es difícil averiguar cuál es la unidad o unidades que tienen fugas.

Procedimiento. Si la unidad que presenta la falla no puede ser encontrada por una inspección visual, el condensador sospechoso deberá ser removido, limpiado a conciencia y puesto en un horno por un mínimo de 4 horas. La temperatura de la carcasa no debería de exceder las recomendaciones del fabricante.

Interpretación. Ponga en forma horizontal los condensadores en una hoja de papel limpia (se sugiere el papel que se utiliza para embalar) con el punto sospechoso de gotera hacia abajo. El condensador resquebrajado deberá ser reemplazado.

CONCLUSIONES

- 1 Las presiones económicas y medioambientales han estimulado los cambios rápidos en la tecnología del condensador de potencia. Durante tres décadas, ha habido una reducción de 15 veces en las pérdidas del dieléctrico (3 a 0.2W/kVAr), un aumento de 4 a 16 veces el rendimiento de kVAr por unidad de volumen de 25kVAr a 400kVAr por unidad para el tipo cubierta metálica, el desarrollo del film de Polipropileno más fuerte y más fácil de-impregnar ("hazy" film), y la introducción exitosa de una docena o más de nuevos fluidos impregnantes que son medioambientalmente y eléctricamente superiores al PCB.
- 2 Debido a sus menores pérdidas y costo del capital (en \$ por kVAr base), los nuevos condensadores all-film han reemplazado al tipo dieléctrico mixto eficazmente. Sin embargo, su fiabilidad en servicio todavía continúa para ser probada. Además, hay evidencia que la aplicación exitosa de esta nueva tecnología requiere de los fabricantes un nivel más alto de especialización, sofisticación y procedimientos de control de calidad más severos. Para los condensadores all-film, debido a su aparente sensibilidad a la temperatura (química y térmica) y la experiencia en servicio limitada, la prueba de duración, conjuntamente con la prueba de descargas parciales, son obligatorias para asegurar el servicio sin problemas.
- 3 Los dieléctricos de film impregnados con aceites sintéticos de hidrocarburo aromático tienen características excelentes como los dieléctricos de los condensadores de potencia. Por lo tanto, el encontrar mejores reemplazos para ellos parece ser una tarea difícil en un futuro cercano. Sin embargo, es deseable desarrollar dieléctricos no inflamables, que exceden los actuales dieléctricos tanto técnica como económicamente, y para este propósito, muchas mejoras en los condensadores secos auto regenerables son anticipados. El aumento de la capacidad y disminución del volumen de las unidades de condensadores tipo tanque son requeridos, y para satisfacer estos requisitos, mejoras en los dieléctricos basados en las experiencias de los condensadores con cubierta metálica son deseables. El desarrollo de los condensadores compactos de 500 kV de rango de tensión también es requerido para los bancos de condensadores en serie de capacidad muy grande para ajustarse a las transmisiones de energía futuras.

BIBLIOGRAFÍA

1. Lowe, S.K., "Development, testing and performance of HV power capacitors", Power Engineering Journal, 1988
2. Yu, Z.Q.; "A new additive for improving the electrical property of liquid dielectric in power capacitor" Conference Record., 10th International Conference, 1990
3. Mei Zhongyuan; Lue Qiaoqing; "The research on the space factor of high voltage power capacitors impregnated all PP film/foil", Proceedings of the 3rd International Conference, 1991
4. Jiaqing Gong; Changrong Qiu; "A study on properties of some novel power capacitors", Second International Conference on Properties and Applications, 1988
5. Minglan Song; Shouyu Hu; "Polypropylene film dielectric used in power capacitors", Second International Conference on Properties and Applications, 1988
6. Cichanowski, S.W.; Newcomb, G.R., "Power capacitors", Electrical Electronics Insulation Conference, 1991
7. IEEE guide for application of shunt power capacitors
IEEE Std 1036-1992
19 Feb. 1993
8. Yoshida, Y.; Muraoka, T.; "The development of high voltage power capacitor technology in Japan", Electrical Insulation Magazine, IEEE, 1995
1. Y. Yoshida, M. Nishimatsu, "On New Dielectrics for Power Capacitors," The 4th Symposium on Elec. Insul. Materials, 1971.