

Lej 16

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA



POSIBLES CAUSAS DE LA EXPLOSION
DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

TRABAJO ESCRITO
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A N

PUBLIO BERNA MARTINEZ
FACUNDO GUZMAN GALEANA
SALVADOR PEÑALOZA CHAVARRIA
CARLOS GABRIEL VENEGAS ESPINOZA

MEXICO, D. F.

1981



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



I N D I C E

POSIBLES CAUSAS DE LA EXPLOSION DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

	PAG.
Introducción	1

CAPITULO I

DESCRIPCION Y TEORIA DE LOS TRANSFORMADORES:

A) .- TRANSFORMADORES

A.1).- Definición	3
-------------------------	---

B) .- CLASIFICACION GENERAL

B.1).- Por la forma y proporciones del núcleo	
B.2).- Por la refrigeración	
B.3).- Por el número de fases	
B.4).- Por la operación	
B.5).- Por la aplicación	
B.6).- Por la colocación	
B.7).- Por el medio refrigerante	
B.8).- Por la regulación	
B.9).- Por la construcción del tanque	

C) .- ESTRUCTURA

C.1).- Núcleo	8
C.1.1).- Núcleo magnético monofásico	
C.1.2).- Núcleo polifásico	
C.1.3).- Núcleos especiales	
C.2).- Devanados	15
C.3).- Partes auxiliares	17
C.3.1).- Tanques y cubierta	17
C.3.2).- Tipos de aislamientos	19
C.3.3).- Boquillas terminales	21
C.3.4).- Cambiadores de derivación	25
C.3.5).- Tipos de enfriamiento	29
C.3.6).- Accesorios	33

CAPITULO II

CONSTRUCCION DEL CIRCUITO MAGNETICO DEL TRANSFORMADOR

	PAG.
A).- GENERALIDADES	36
B).- TEORIA DE LA MAGNETIZACION DEL NUCLEO	36
C).- DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL NUCLEO	39
C.1).- Devanados	44
C.1.1).- Devanados concéntricos	46
C.1.2).- Devanados alternados	46
D).- ESFUERZOS MECANICOS	46
E).- CONSIDERACIONES ECONOMICAS	48
E.1).- Corriente de Magnetización	48

CAPITULO III

CARACTERISTICAS DE OPERACION DE LOS TRANSFORMADORES

A).- PRINCIPIOS GENERALES DE OPERACION	57
B).- TRANSFORMADOR IDEAL	61
C).- TRANSFORMADOR CON NUCLEO DE HIERRO	65
C.1).- Fugas magnéticas.....	65
C.2).- Efectos del núcleo de hierro y - aproximación simplíficativas....	66
C.3).- Circuito equivalente	68

	PAG.
D).- PERDIDAS MAGNETICAS.....	76
D.1).- Pérdidas por histéresis.....	76
D.2).- Pérdidas por corriente de Foucault.....	82
D.3).- Pérdida total en el núcleo.....	88
D.4).- Separación de las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault.....	90
E).- PROPIEDADES GENERALES DE LAS BOBINAS CON NUCLEO DE HIERRO.....	91
F).- PERDIDAS ELECTRICAS.....	93
F.1).- Pérdidas por resistencia.....	93
F.2).- Pérdidas de tensión por flujo disperso..	95
G).- RENDIMIENTO.....	97
G.1).- Pérdidas en el núcleo.....	97
G.2).- Pérdidas en la carga.....	97

CAPITULO IV

ACEITE PARA TRANSFORMADORES

4.1)	Generalidades y propiedades de los aceites..	100
4.2)	Métodos para comprobar el aceite	103
4.2.1)	Color	103
4.2.2)	Impurezas en suspensión	103
4.2.3)	Peso específico	104
4.2.4)	Viscosidad	104
4.2.5)	Temperatura de inflamabilidad	105
4.2.6)	Acidez inorgánica	106
4.2.7)	Alcalinidad	107
4.2.8)	Acidez orgánica	107
4.2.9)	Asfalto	107
4.2.10)	Resina	108
4.2.11)	Azufre	108
4.2.12)	Cenizas	108
4.2.13)	Rigidez dieléctrica	109
4.2.14)	Tendencia a la gasificación	112
	1.- Descripción del equipo utilizado	113
	2.- Interpretación de la gráfica	116

CAPITULO V

PROTECCION DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

	PAG.
5.1) Generalidades	119
5.2) Descripción general de las protecciones de un transformador	120
5.3) Pararrayos	123
5.3.1) Guía para la selección de pararrayos	126
5.4) Relevador Buchholz	127
5.5) Protección diferencial	135
5.6) Relevador de imagen térmica	145
5.7) Protección de respaldo	149
5.7.1) Protección de respaldo remota	150
5.7.2) Protección de respaldo local	151

CAPITULO VI

DESCRIPCION Y ANALISIS DE LA EXPLOSION DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA

6.1) Generalidades	153
6.2) Antecedentes y descripción de la explosión de un transformador de potencia en la Industria Mexicana de Metales, S.A.	153
6.2.1) Antecedentes de operación del transformador	154
6.2.2) Descripción de la explosión	162
6.2.3) Reporte interno de la Industria Mexicana de Metales S. A.	172
6.2.4) Informe preliminar de siniestros hecho por la Oficina Técnica de Ajustes y Peritajes - de la Compañía de Seguros Oriente, S.A. ...	175
6.3) Análisis por parte de los elaboradores de este trabajo en cuanto al siniestro descrito anteriormente	189

CAPITULO VII

DESCARGAS PARCIALES Y MANTENIMIENTO.

		PAG.
7.1)	Generalidades	182
7.2)	Progresión de una falla debido a descargas parciales	182
7.2.1)	Carga aparente "q"	183
7.2.2)	Frecuencia de repetición "n"	183
7.2.3)	Energía "W" de una descarga individual ...	184
7.2.4)	Cantidades integradas	184
7.2.5)	Corriente de descarga promedio "I"	184
7.2.6)	Razón cuadrática "D"	185
7.2.7)	Potencia de la descarga "P"	185
7.2.8)	Valores de tensión relacionados con las -- descargas parciales	185
	1.- Tensión de iniciación de descargas parciales " V_i "	186
	2.- Tensión de extinción de descargas parciales " V_e "	186
	3.- Tensión de prueba libre de descargas - parciales	186
7.2.9)	Instrumentos de medición	186
	1.- De la magnitud de la mayor descarga... ..	186
	2.- De la frecuencia de repetición de pulsos	187
	3.- De la corriente de descarga promedio .	187
	4.- De la razón cuadrática	188
	5.- De la potencia de descarga	188
7.2.10)	Circuitos de prueba	188
7.2.11)	Métodos no eléctricos para la detección de descargas parciales	195
	1.- Detección acústica	196
	2.- Detección óptica	196
	3.- Observaciones de las huellas de detectorio	196
7.3)	Mantenimiento	196
7.3.1)	Inspecciones de rutina	196
7.3.2)	Carga, voltaje, corriente	200
7.3.3)	Temperatura	200

	PAG.
7.3.4) Instrumentos de medición	201
7.3.5) Accesorios de protección	201
7.3.6) Tanque y accesorios	204
7.3.7) Reparación de fugas	204
7.3.8) Pintura	205
CONCLUSIONES	208
BIBLIOGRAFIA	209

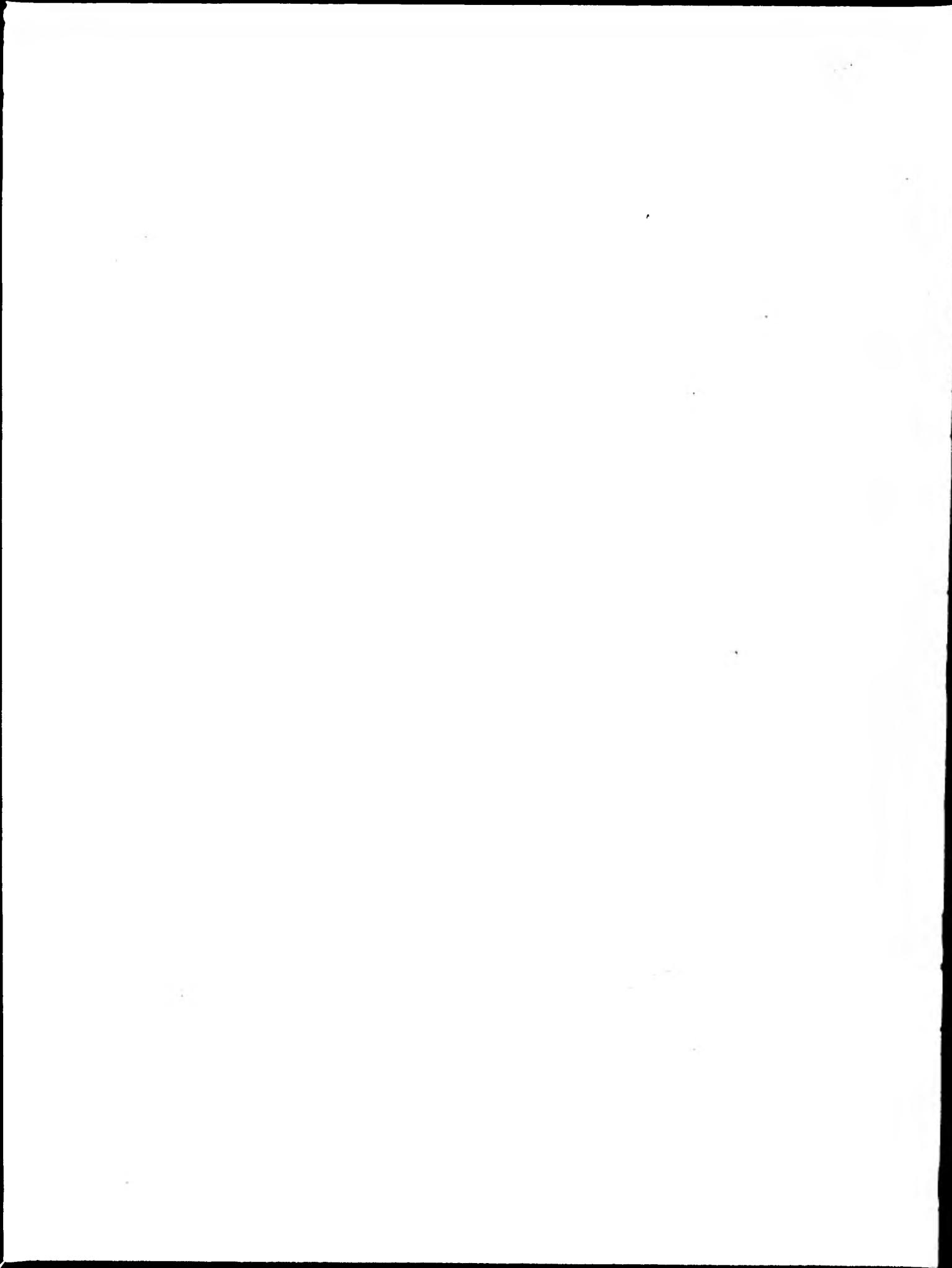
I N T R O D U C C I O N

Dentro de los elementos que forman un sistema eléctrico de potencia, destacan por su importancia los transformadores de potencia (transformadores que tienen una capacidad mayor de 500 - KVA), debido a las funciones que desempeñan para lograr que el suministro de energía eléctrica se realice con las características de continuidad de servicio y de los niveles de tensión necesarios para que los aparatos conectados a dichos sistemas funcionen adecuadamente.

A pesar de que en la mayoría de los casos, los transformadores reciben un riguroso control, tanto en su diseño, construcción, puesta en servicio y mantenimiento, se han presentado en la práctica algunos casos de fallas severas en los mismos; en las cuales se ha llegado a la destrucción parcial e incluso a la explosión del transformador en falla.

Sin ser fenómenos que se presenten frecuentemente, tomando en cuenta los aspectos mencionados inicialmente, así como también el hecho de la importancia que tiene un transformador de potencia en la industria, en cuanto a su confiabilidad y que la explosión de un transformador puede traer implicaciones con respecto a la seguridad de la vida humana y la preservación de la propiedad, éstos fenómenos resultan sumamente peligrosos y de un gran costo económico, razones por las cuales se deben tratar de evitar completamente.

El objetivo principal de este trabajo es el de analizar las características que se presentan en dichos fenómenos y con base en los aspectos teóricos del funcionamiento de los transformadores, proponer las medidas necesarias para evitarlos.



C A P I T U L O I

DESCRIPCION Y TEORIA DE LOS TRANSFORMADORES

A).- TRANSFORMADORES

A1).- DEFINICION

El transformador es un dispositivo estático que transfiere energía eléctrica de un circuito a otro (devanados), me--diante un acoplamiento magnético. Dicho acoplamiento se logra - encadenando el flujo magnético (que tiene como característica - ser variable en el tiempo) producido por el paso de la corrien- te a través de los circuitos eléctricos. Su función básica es la de cambiar niveles de voltaje a una misma frecuencia y como consecuencia de ello hay también un cambio de corriente.

B).- CLASIFICACION GENERAL

Los transformadores pueden ser clasificados de distintas maneras, según se tome como base la construcción o la operación en cada uno de sus aspectos. La primera clasificación, cuya trascendencia es mayor, se refiere a la forma y proporciones del núcleo, dividiéndose los transformadores en dos categorías: de columna y acorazados.

B.1).- POR LA FORMA Y PROPORCIONES DEL NUCLEO

1).- TRANSFORMADORES DE COLUMNA: Se componen de dos o más columnas ligadas por ambos extremos mediante yugos y con -- enrollamientos dispuestos sobre una o todas las columnas; figuras (1.1 y 1.2).

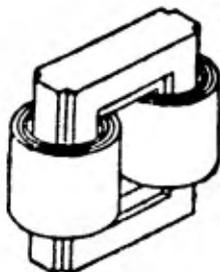


Fig. 1.1 Bobinas y laminaciones de un transformador del tipo de columnas.

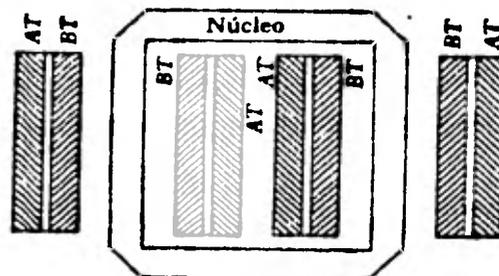


Fig. 1.2 Grupo de bobinas de alta y baja tensión de un transformador del tipo de columnas.

2).- TRANSFORMADORES ACORAZADOS: Consisten de uno o más arrollamientos envueltos por laminación, en una gran parte de su longitud; figuras (1.3 y 1.4)

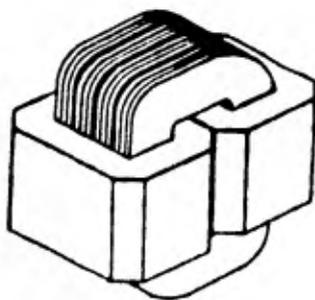


Fig. 1.3 Bobinas y laminaciones de un transformador del tipo de columnas.

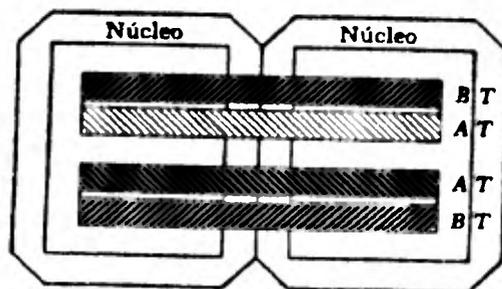


Fig. 1.4 Grupos de bobinas de alta y baja tensión de un transformador del tipo acorazado.

B.2).- POR LA REFRIGERACION

Otra clasificación importante se basa en la refrigeración de los transformadores, dividiéndolos en transformadores con:

- a) Enfriamiento con aire natural.
- b) Enfriamiento con aire activado.
- c) Enfriamiento con agua interior.
- d) Enfriamiento con agua exterior.
- e) Enfriamiento con aire a presión.
- f) Enfriamiento mixto.

Asimismo, también suele hacerse la clasificación de los transformadores, tomando en cuenta los siguientes aspectos.

B.3).- POR EL NUMERO DE FASES

- 1.- Monofásicos.
- 2.- Polifásicos.

B.4).- POR LA OPERACION

- 1.- De Potencia.
- 2.- De Distribución.
- 3.- De Potencial.
- 4.- De Corriente.

B.5).- POR LA APLICACION

- 1.- De línea, para interconexión o protección.

- 2.- De estación generadora (Para elevar).
- 3.- De estación receptora (Para reducir).
- 4.- De potencial constante (múltiple).
- 5.- De intensidad constante (serie).

B.6) .- POR LA COLOCACION

- 1.- Interiores.
- 2.- De intemperie.
- 3.- Sumergibles.

B.7) .- POR EL MEDIO REFRIGERANTE

- 1.- En aire, o gas a presión.
- 2.- En aceite
- 3.- En líquidos especiales.
- 4.- En compuesto mixto.

B.8) .- POR LA REGULACION

- 1.- De relación fija
- 2.- De relación ajustable con carga, manual o automática.
- 3.- De corriente constante.

B.9) .- POR LA CONSTRUCCION DEL TANQUE.

- 1.- De conservador de aceite.
- 2.- De cámara inerte.
- 3.- De tubos paralelos.
- 4.- De radiadores simples, o con ventilador.
- 5.- De gas a presión, con circulación cerrada.

6.- De circulación forzada de aceite.

Como se mencionó al inicio de la sección B). la clasificación de transformadores que tiene más trascendencia es la - que se refiere a la forma y proporciones del núcleo, por lo que a continuación se muestra una figura más, que representa un --- transformador acorazado de forma distribuida.

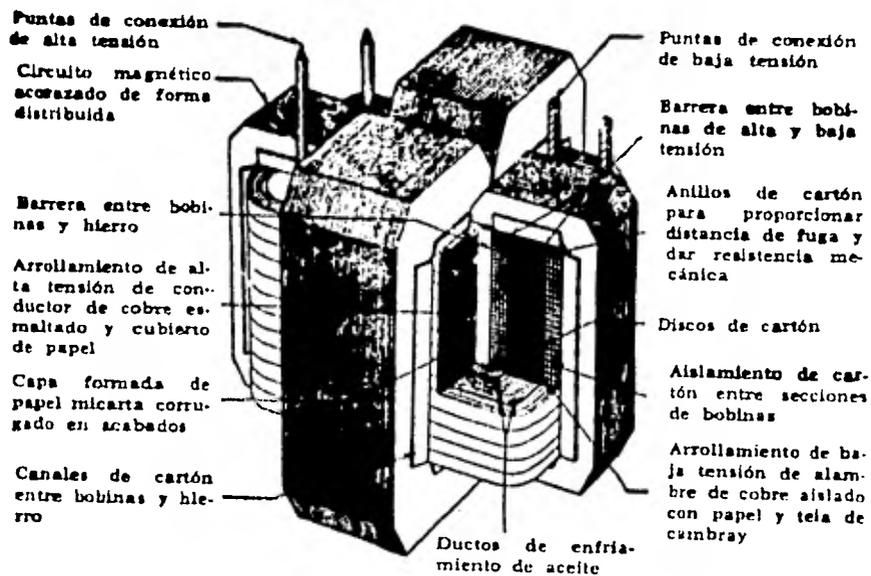


Fig. 1.5 Transformador acorazado de forma distribuida, mostrando núcleo, bobinas, ductos de enfriamiento y aislamiento.

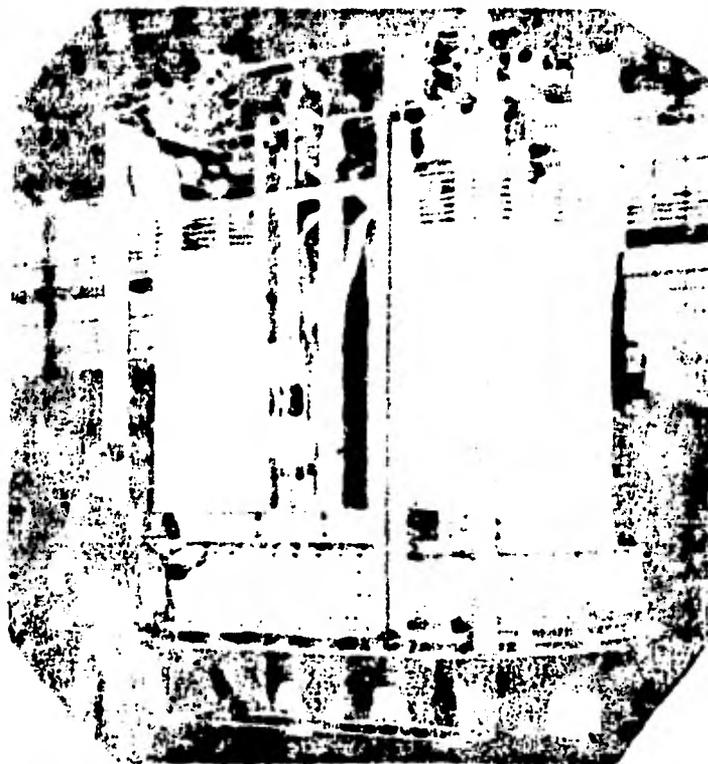


Fig. 1.6 Bobinas y núcleo de un transformador de 42,500 KVA.

C).- ESTRUCTURA

En forma general las partes constitutivas del transformador son: núcleo, devanados y partes auxiliares.

C1).- NUCLEO

Es la parte de material ferromagnético que constituye la médula del circuito magnético; alrededor de él se encuentran

devanadas las dos bobinas que sirven para reducir y encadenar - el flujo magnético. El núcleo generalmente se construye de -- acero, hierro laminado o acero al silicio, se utilizan éstos ma- teriales por estar entre los tres únicos ferromagnéticos de la naturaleza. La utilización de estos elementos influye en que no haya un flujo de dispersión de magnitud considerable, implican- do ésto una alta eficiencia de transformador.

Los núcleos por su construcción se dividen en apila-- dos y enrollados. Los apilados se forman colocando una sobre - otra una serie de placas metálicas iguales, hasta formar un es- pesor deseado; y los enrollados son los formados por una serie- de largas tiras metálicas que van enrolladas sobre sí mismas. - (Ver Figuras 1.7 y 1.8)

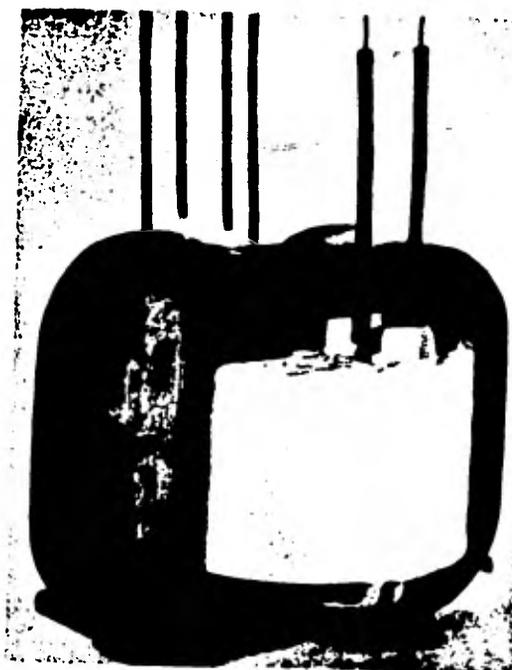


Fig. 1.7 Núcleo y arrollamientos de un transformador del tipo de columnas en espiral.

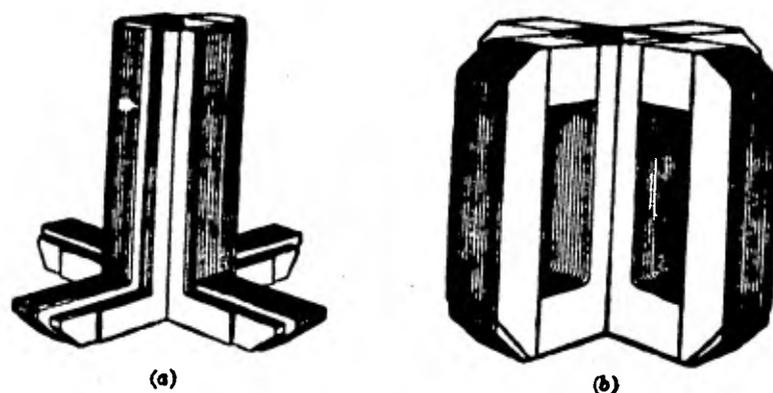


Fig. 1.8 Construcción del núcleo de un transformador del tipo acorazado de forma distribuida.

C.1.1).- EL NUCLEO MAGNETICO MONOFASICO

Esta parte, esencial para un transformador de frecuencia moderada, se construye como ya dijimos de lámina de acero-silicio, de un espesor cercano a $1/3$ de milímetro, cortada en diversas formas, según las dimensiones y tipo de núcleo y preparada convenientemente para obtener la mayor permeabilidad y la menor pérdida. Para reducir las corrientes de Foucault se siguen distintos caminos: en algunas fábricas las tiras de laminación son barnizadas con barniz a prueba de aceite en ambas caras; en otras ocasiones se provoca la formación de una delgada capa de óxido sobre la lámina por vía química; pero tal vez el sistema más notable consiste en depositar sobre la lámina una delgada capa de celulosa que es comprimida y endurecida posteriormente; se emplea también papel interpuesto entre las láminas, aunque la sección útil del núcleo se reduce entonces considerablemente, si no se usa papel de fabricación muy especial.

Las figuras 1.9 y 1.10 dan una idea de la forma en que se corta la lámina para núcleos pequeños de tipo acorazado. La forma de la figura 1.9 es de una sola pieza; pero no es difícil

doblar con suavidad las partes marcadas con "a" hacia arriba y acomodar la lámina de manera que "b" quede dentro del hueco de la bobina, previamente enrollada, con sus dos circuitos y su aislamiento apropiado. Una vez que ha entrado "b" se desdoblan las alas "a" y se coloca otra lámina encima de la primera, pero con las alas en sentido contrario, de tal manera que las separaciones que existente entre "a" y "b" queden en la posición indicada con líneas punteadas. Alternando así la posición de las láminas se evita que se forme un entrehierro continuo a todo lo alto del núcleo.

La forma de la figura 1.10, está hecha de dos partes y no necesita doblez en las alas para acomodarse dentro de la bobina. La parte grande A, entra por un lado y la B por otro - hasta casi tocar la A; en la hilada siguiente la A entra en lugar de la B y viceversa, de manera que el entrehierro queda alternado y además el núcleo no propende a desarmarse. Es importante señalar que es posible diseñar otras formas de corte de una y dos partes.

Cuando se trate de dimensiones mayores no es económico recortar la lámina en formas complicadas porque se desperdicia fierro y se requiere un troquel costoso y de corta duración, Es preferible entonces cortar tiras simples de diversos tama - ños que se combinan para formar los núcleos necesarios.

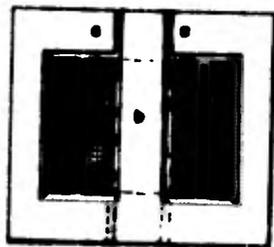


Fig. 1.9

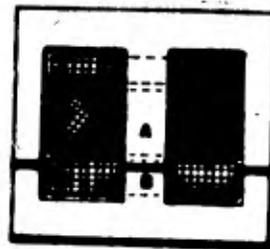


Fig. 1.10

C.1.2).- EL NUCLEO POLIFASICO

En transformadores de dos, tres y seis fases se encuentran también las formas de columnas y la acorazada. La figura (1.11) muestra un núcleo de 3 columnas, siendo la central 41.4 % más ancha que las extremas, para un transformador de dos fases. En este caso las bobinas de la fase A rodean la columna izquierda y las de la fase B rodean la columna derecha. La central sirve de regreso a los dos flujos, que se suman o se restan, pero cuya resultante es siempre mayor que cualquiera de los flujos separados en la proporción de 1.414 a 1.

En la figura (1.12) se muestra un núcleo de 3 columnas iguales para tres fases, o para dos con ligeras modificaciones. Esta formado con tiras de cuatro tamaños diferentes, numerados de uno a cuatro, pero ahora en una hilada entran dos tamaños solamente (1 y 2), y en la que sigue entran los otros dos únicamente (3 y 4).

Los transformadores de corta altura y gran distancia entre columnas pueden tener cinco de éstas, sin bobinas en la primera y última, para cerrar por separado los circuitos magnéticos de las columnas segunda y cuarta y reducir así la corriente magnetizante de las fases respectivas hasta quedar al nivel de la fase central.

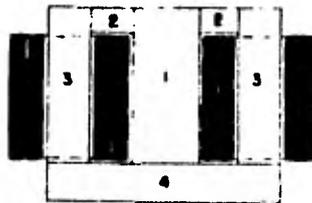


Fig. 1.11

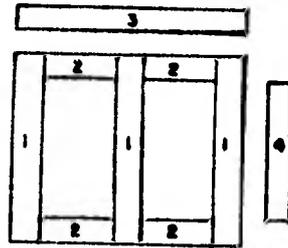


Fig. 1.12

C.1.3).- NUCLEOS ESPECIALES

En transformadores de potencias elevadas, tipo de columnas se emplean tiras de anchos graduados, con objeto de aprovechar mejor el espacio destinado al fierro dentro de un cilindro aislante, figura (1.13)

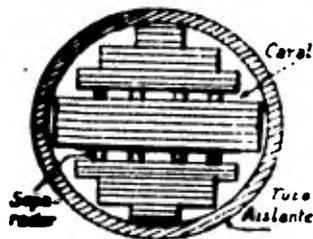


Fig. 1.13

Además se forman grupos con láminas y esos grupos quedan separados entre sí por piezas aislantes. En los espacios -- que quedan puede circular con facilidad el aceite o fluido refrigerante, de abajo hacia arriba, y transportar calor desarrollado en el centro de las columnas.

Algunos transformadores de fabricación reciente tienen el núcleo formado por una cinta de acero, de gran longitud, que es obligada a enrollarse en espiral pasando alternativamente por el hueco del enrollamiento ya preparado y por el exterior del mismo, en una forma semejante a como se enrollan los "metros" de acero en sus cajas, hasta ocupar la mitad del espacio disponible. Otra cinta de acero, enrollada en forma análoga, pero en sentido contrario, llena la otra mitad. Algunos núcleos de "Veta orientada" tienen una sola junta del tipo "traslapado", en cada hilada. Las tiras son de longitud creciente, en progresión aritmética, y cada una se enrolla encima de la anterior, - pasando por el hueco de las bobinas.

Como se observa en la figura (1.14), las juntas son - la superficie suficiente para casi anular el salto de aire relativo.

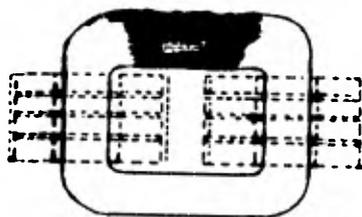


Fig.1.1 4

C.2) .- DEVANADOS

Generalmente son dos y están constituidos esencialmente por dos enrollamientos de hilo conductor bobinado sobre el mismo núcleo, en uno de los enrollamientos llamado primario se hace circular una corriente alterna que crea en el núcleo metálico un cierto flujo tanto más intenso cuanto mejor es la permeabilidad magnética del metal; este flujo variable según las alternancias de la corriente primaria, induce en el otro enrollamiento llamado secundario un voltaje con una intensidad tanto mayor cuanto menor es el número de espiras.

Los embobinados para transformador pueden clasificarse de diferentes maneras: según la forma de las vueltas de las bobinas, en circulares y en rectangulares; según la colocación relativa de los embobinados primario y secundario, en concéntricos, cuando uno de ellos se enrolla sobre el núcleo (el de baja tensión generalmente) y después en el exterior de éste se enrolla el otro embobinado; interpuesto, cuando hay bobinas primarias y secundarias, intercaladas a lo largo de una pierna del núcleo; en este caso pueden ser las bobinas primarias y secundarias de igual diámetro.

Las bobinas pueden hacerse con alambre de cobre, o con solera cuando la intensidad de corriente es muy grande, las bobinas pueden estar hechas de tal manera que una sola bobina de forma tubular recorra todo el largo de la pierna del núcleo sobre la cual se coloca (esto se usa en las bajas tensiones). Este tipo de bobinas se consigue enrollando el alambre en forma de hélice en una o más capas. Las bobinas también pueden formar paquetes separados cuando el alambre se enrolla en forma de espiral: si el paquete tiene una sola espiral se trata de una bobina discoidal y si cada paquete contiene varias espirales se trata de una bobina anular. Tanto las bobinas anulares como las discoidales son adecuadas para tensiones altas porque entre ---

paquete y paquete se pueden colocar cuñas de aislamiento.

A continuación se muestran algunos tipos de bobinas.

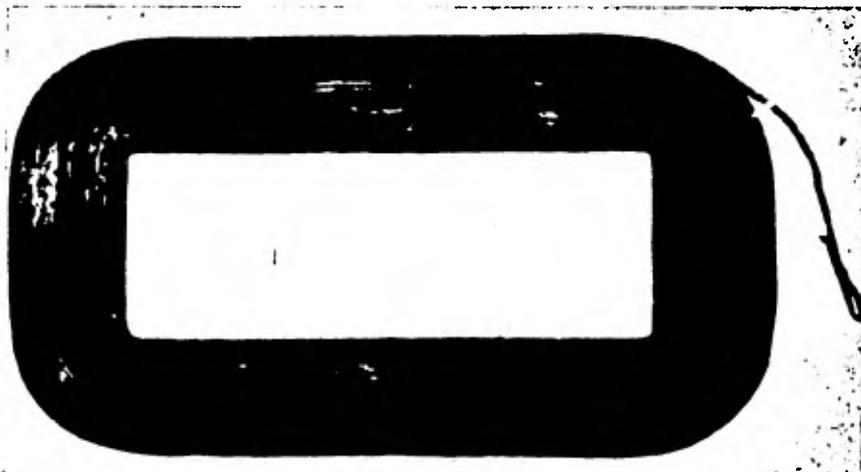


Fig. 1.15.- Bobina de disco o achatada
(1.3.2.2)

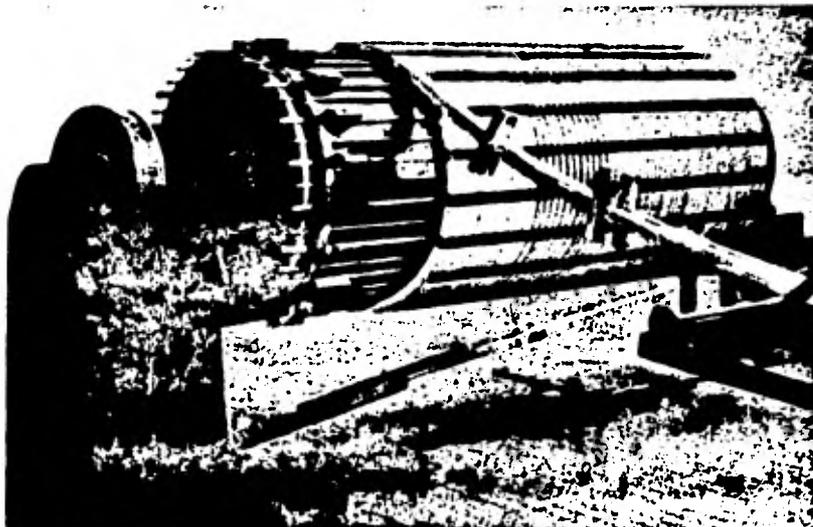


Fig. 1.16.- Devanado de una bobina
cilíndrica para un transformador -
de 55000 KVA. 287 500/16 220 Volts.
(I.3.2.b)

C.3).- PARTES AUXILIARES

Las partes del equipo auxiliar son muy numerosas, dentro de las más esenciales e importantes se encuentran las que a continuación se mencionan:

C.3.1).- TANQUE Y CUBIERTA

Son indispensables en los transformadores que usan un fluido distinto al aire, pueden ser omitidos en casos especiales o reducidos a una simple tela de lámina perforada cuando el elemento refrigerante es aire común y las bobinas están aisladas con materiales sólidos.

En la construcción moderna de transformadores, los tanques se fabrican con lámina de acero del grueso apropiado para cada capacidad; las uniones se soldan por medio de soldadura eléctrica y una vez terminados se prueban por medio de un compresor de aire para localizar los poros y defectos de la soldadura.

Los tanques de transformador pueden ser construidos de diversas maneras según su tamaño y proporciones:

1) FUNDIDOS: Se obtiene una gran resistencia y seguridad contra escape de aceite; pero el peso es exagerado.

2) DE LAMINA REMACHADA: El peso se reduce al mínimo, pero hay pequeñas filtraciones constantes de aceite.

3) DE LAMINA SOLDADA: Con los modernos procedimientos de soldadura se ha eliminado casi por completo la porosidad de las juntas. El peso es mínimo como en el caso anterior.

Algunos tanques son de construcción mixta: la base y tapa fundidas, y la pared lateral de lámina corrugada o lisa. - En tamaños pequeños (5 KVA) la superficie del tanque en contacto con el aire es suficientemente amplia para dar salida al calor en condiciones normales. En mayores tamaños (100 KVA) es necesario que las paredes del tanque sean onduladas para aumentar la superficie de contacto en la proporción necesaria.

De 150 KVA en adelante es preciso disponer tubos externos ligados al tanque por la parte alta y por la parte baja, que hacen circular el aceite de arriba a abajo como termo - sifón, o radiadores compuestos de gran número de tubos de sección ovalada, y ondulados a lo largo, o rectos, soldados a dos cabezales de distribución, uno en la parte alta y otro cerca del fondo.

Los tanques de transformador tienen los siguientes orificios de accesorios en general:

- a) Válvula de descarga rápida de aceite.
- b) Espita para muestras de aceite.
- c) Conexión del tubo indicador de nivel.
- d) Conexión del indicador de temperatura.
- e) Orificios para las boquillas de alta y baja.
- f) Cubierta de inspección de las conexiones.
- g) Entradas y salidas de los serpentines.
- h) Entrada del cambiador de derivaciones.
- i) Conexión del conservador de aceite.
- j) Conexión de entrada y salida del aceite a la planta de filtración.
- k) Conexión de la boquilla de escape de presión.
- l) Conexiones del aparato de mantenimiento y control de la cámara inerte, cuando no hay conservador.

Ultimamente se ha intensificado el empleo de transformadores sin aceite enfriados por aire. No hay tanque, naturalmente

te y sólo se dispone una cubierta de lámina perforada que deja circular el aire. A veces se instala un ventilador para activar la refrigeración. El peligro de incendio debido a la presencia de aceite desaparece y los cargos por aseguramiento se hacen mínimos.



Fig. 1.17.- Transformador trifásico de 9000 KVA, 67560/6900 Volts. enfriado por agua con tanque conservador.

(1.3.3.a)

C.3.2).- TIPOS DE AISLAMIENTOS

Puede decirse que la vida de un transformador en operación normal, mientras no sufra un accidente, depende de la duración de sus aislamientos. Con el tiempo, los aislamientos se van carbonizando por la acción prolongada del calor, ésta carbonización los debilita mecánicamente y como están sujetos a ----

esfuerzos mecánicos constantemente, acaban por fallar e inutilizar al transformador.

Generalmente los materiales más usados como aislantes en los transformadores son los siguientes: el aire, el aceite; - diferentes tipos de hilos como algodón, lino, cáñamo, etc. (que deben resistir la acción del aceite caliente); papel, presspahn, madera (que debe estar bien preparada), baquelita, corcho, porcelana (sobre todo en las boquillas), asbesto y diferentes tipos de cartones y ciertas substancias plásticas.

Los materiales se colocan en el lugar adecuado, según sus propiedades, por ejemplo: en un transformador sin aceite -- puede usarse el hule ya que no quedará expuesto a la acción disolvente del aceite caliente, siempre y cuando la temperatura -- que alcance el lugar de aplicación no requiera un aislamiento -- más resistente al calor.

Según la A.S.A. (American Standard Association). la clasificación para los diferentes aislamientos usuales en aparatos eléctricos es:

CLASE O: Algodón, seda, papel y materiales orgánicos semejantes, sin estar impregnados o sumergidos en un dieléctrico líquido.

CLASE A: Algodón, seda, papel y materiales orgánicos semejantes impregnados o sumergidos en un dieléctrico líquido; - materiales moldeados o laminados con relleno de celulosa, resinas fenólicas y similares; películas y hojas de acetato de celulosa o derivados de celulosa similares, barnices y esmaltes no conductores.

CLASE B: Mica, asbesto, fibra de vidrio, materiales -- inorgánicos semejantes, fabricados con una limitada cantidad de aislamiento clase A como base.

CLASE C: Mica, porcelana, vidrio, cuarzo y materiales inorgánicos similares.

Las temperaturas máximas que pueden resistir los aislamientos son, desde luego, constantes para cada uno y muy parecidas en todos los aislamientos de un mismo tipo, pero como --- existen diferentes modos de tomar la temperatura a los aparatos en operación se han especificado las siguientes operaciones límite.

METODO DE ESTIMAR LA TEMPERATURA	CON TERMOMETRO	CON DETECTOR	POR RESISTENCIA	LIMITE
CLASE O	75°C	85°C	85°C	90°C
CLASE A	90°C	110°C	95°C	105°C
CLASE B	110°C	120°C	120°C	130°C

C.3.3) BOQUILLAS TERMINALES

Para conectar los enrollamientos interiores de un --- transformador con las líneas externas, a través de la tapa o --- tanque se emplean elementos conductores llamados boquillas --- (bushings), cuya construcción obedece a uno de los tipos si--- guientes:

1) TIPO MACIZO: La boquilla es una pieza de porcelana o bakelita, en forma de aislador de poste, con una brida de sujeción y campanas por la parte externa, cuando es para intemperie, figura (1.18).

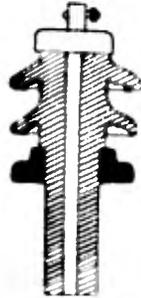


Fig. 1.18

Tiene una horadación a lo largo por la cual puede pasar el cable terminal del enrollamiento, ajustado, con su aislamiento propio, siendo en este caso un simple tubo de protección; pero es preferible colocar en su interior un birlo de cobre duro, con tuerca en ambos extremos y empaadura de corcho, con lo cual se impide efectivamente la entrada de la humedad y la salida de aceite. En efecto, aunque se rellenara con alguna pasta aislante licuada el espacio que deja libre el cable, el forro de éste es poroso y deja pasar la humedad y el aceite como una mecha cualquiera.

Cuando no hay manera de usar birlo se recomienda desnudar el cable por el lado interior, a cierta distancia de la boquilla, para que el aceite no suba por capilaridad. El diámetro del birlo debe ser el mayor posible para reducir el gradiente eléctrico en ése punto, pero sin olvidar la dilatación que puede producirse.

2.- TIPO RELLENO: El tipo anterior es sencillo y barato, pero no es recomendable para tensiones elevadas por la presencia de aire entre la porcelana y el birlo, lo que ocasione que la boquilla se comporte como dos condensadores en serie entre línea

y tierra, uno de porcelana y otro de aire. La disparidad de capacitancias y rigideces hace que el gradiente eléctrico en la porcelana quede fuera de control y se produzcan concentraciones de campo en algunos puntos de la boquilla.

El tipo relleno tiene un gran espacio entre la porcelana y el birlo, pero éste espacio no está ocupado por aire sino por aceite o compuesto (compaund). Ver figura (1.19)

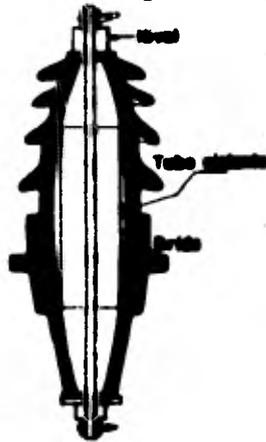


Figura 1.1 9

Las boquillas rellenas de aceite, hechas generalmente de un cuerpo de porcelana formado de varios segmentos anulares cementados entre sí, con una brida de acero en la parte media, - para sujetar la boquilla a la tapa, y rematado por una caja cilíndrica de vidrio que permite apreciar el nivel del aceite.

Un birlo tubular mantiene comprimidas las partes, y - sirve de conductor, o en su interior pasa un cable de cobre para disminuir la resistencia.

Entre el birlo y la pared de la boquilla se encuentran uno o más cilindros aislantes que tienen por objeto evitar la - formación de cadenas continuas de corpúsculos en suspensión que ocasionarían concentraciones de campo peligrosas.

Las boquillas rellenas del compuesto, para uso interior

en la planta, no necesitan ser de porcelana y pueden estar hechas de anillos pequeños de cartón bakelizado unidos con rondanas del mismo material. El compuesto que se usa para boquillas tienen una rigidez igual o mayor que la de un buen aceite; pero está expuesto a cristalizar y formar regiones de baja rigidez dieléctrica, lo que puede ocasionar la falla de la boquilla.

3).- TIPO DE CONDENSADOR: Estas boquillas son construidas con papel especial que se impregna de bakelita al momento de ser enrollado. Cuando se ha alcanzado un cierto espesor se coloca sobre el papel una hoja delgada de aluminio, un tanto menos larga que el birlo y cubriendo una vuelta completa. Hecho ésto se prosigue al enrollado y cuando se llega a un espesor doble se dispone otra hoja de aluminio cubriendo una vuelta como la anterior, pero dos tantos menos larga que el birlo. Se continúa enrollando el papel y cuando se tenga un espesor triple se coloca una tercera hoja, tres tantos menos larga que el birlo y así sucesivamente, hasta terminar. Si la construcción es correcta, la brida debe tener un tanto menos de largo que la última hoja de aluminio y los bordes de la brida y de todas las hojas intermedias deben quedar en línea recta. Las hojas deben tener una superficie constante, lo que se logra disminuyendo su longitud a medida que aumenta su diámetro (Ver figura 1.20).

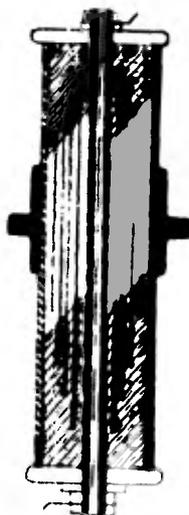


Fig. 1 . 20

C.3.4). CAMBIADOR DE DERIVACIONES (TAPS)

El cambiador de derivaciones se emplea para suprimir o aumentar el número de vueltas o de bobinas de un devanado, con lo que se obtiene un nivel mas o menos -- estable de la tensión requerida.

Los derivadores son generalmente colocados en el devanado de alta tensión, por ser este el devanado exterior y consecuentemente la conexión de derivadores puede hacerse fácilmente y sin dificultad por cuanto al aislamiento. Del mismo modo, como el devanado de alto voltaje tiene un gran número de vueltas el derivador puede ajustar estas para tener una mejor regulación en el voltaje.

Los derivadores en el lado de baja tensión no se recomiendan, pues los conductores de los devanados son de mayor sección, llevando por ello una corriente considerable, que podría ocasionar arcos durante el cambio. Además este devanado normalmente está en la parte interna como se ve en la figura 1.21 y presentará dificultades de construcción.

La posición física de los derivadores en el devanado de alta tensión, está determinada por consideración de voltaje, amper-vuelta, balanceo en cada posición del derivador y variación de la impedancia sobre el rango del cambiador.

Previendo lo anterior se acostumbra conectar los - contactos de los derivadores en el centro de devanados divididos, como se muestra en la figura 1.21

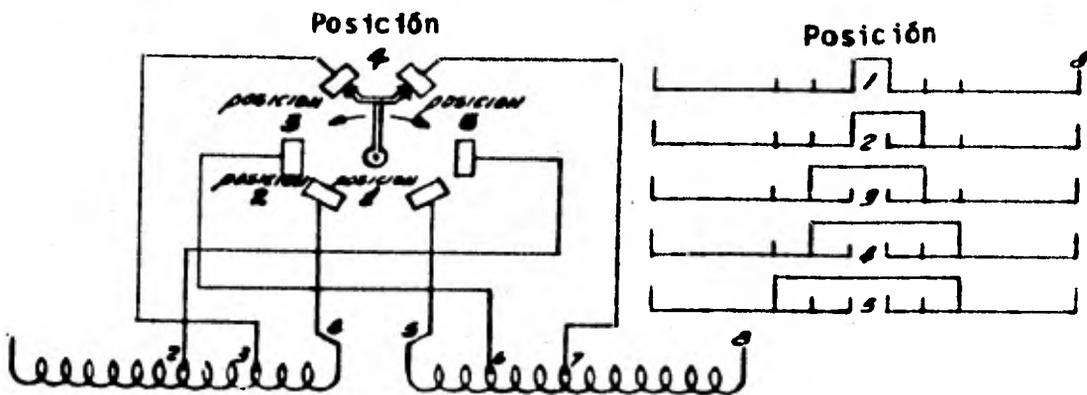


Figura 1.21

Los cambiadores de derivaciones se clasifican en - dos grupos que son:

- a) Cambiadores de derivaciones sin carga.
- b) Cambiadores de derivaciones con carga.

Los cambiadores de derivaciones sin carga son aque- llos diseñados para ajustar la relación del transformador, en forma poco frecuente, cuando el transformador - puede desconectarse de la línea. Este ajuste general- mente es manual y se hace para adaptar el transformador al voltaje promedio existente en la localidad del trans formador.

Los cambiadores de derivaciones con carga se diseñan para trabajar bajo carga; puesto que se debe alimentar continuamente la carga aún cuando el derivador está cambiando. Por este hecho cada dos derivaciones deben estar puenteadas en el mismo camino durante el cambio del derivador. Para prevenir el excesivo flujo de corriente entre derivadores se utiliza el arreglo que se muestra en la figura 1.22

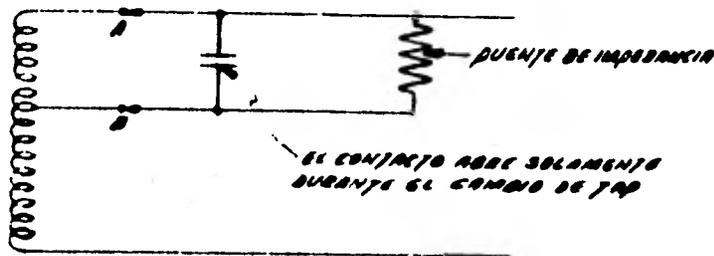


Figura 1.22

Los cambiadores básicamente están formados por los siguientes elementos:

- I) Mecanismo operador del cambiador.
- II) Contactos del cambiador.
- III) Manivela o perilla (colocada en la parte superior del tanque).

Los cambiadores bajo carga, cuentan además con un control (mando a motor) que envía la señal para alimentar un motor que opera el mecanismo del cambio.

A continuación se muestra un diagrama esquemático de un cambiador de derivaciones bajo carga.

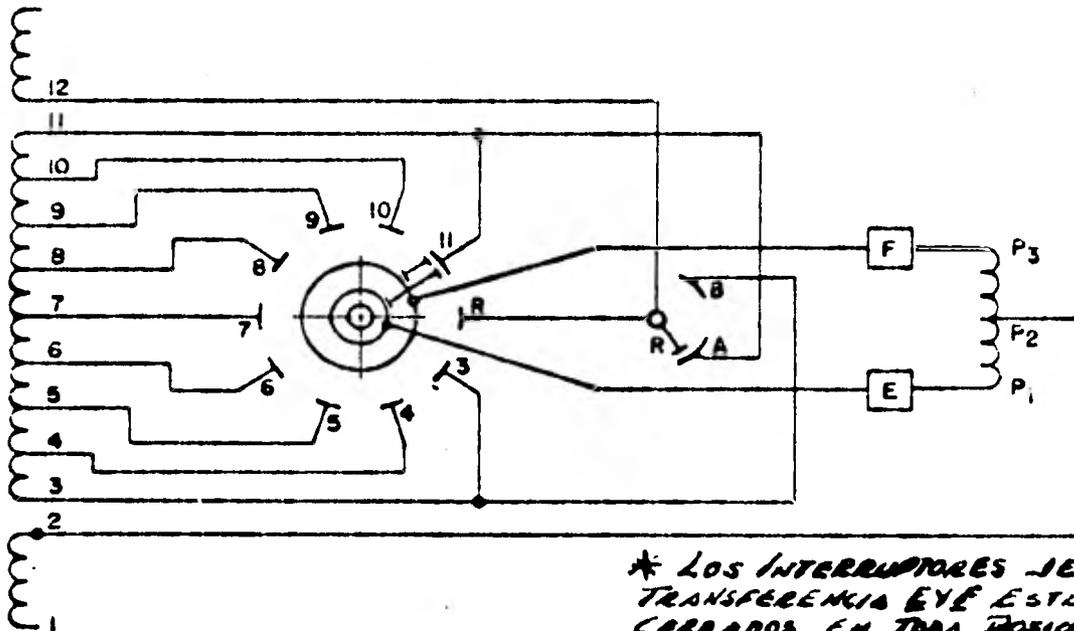


Figura 1.23

C.3.5).- TIPOS DE ENFRIAMIENTO.

Los diferentes tipos de enfriamiento utilizados para disipar las pérdidas de transformadores al ambiente son básicamente los siguientes:

a).- Transformadores en aceite autoenfriados (tipo OA).- En este tipo, el aceite aislante circula dentro del tanque, el cual disipa el calor llevado por el aceite al aire circundante en reposo. Es el tipo de enfriamiento más común sobre todo en transformadores de mediana potencia, debido a su simplicidad y bajo mantenimiento.

b).- Transformadores en aceite con aire forzado (tipo FA).- Este tipo es básicamente una unidad OA a la que se le han añadido ventiladores para aumentar la disipación de las superficies enfriadoras, permitiendo así aumentar la capacidad del transformador. El porcentaje de capacidad autoenfriado que se puede aumentar con enfriamiento FA varía desde 15% para transformadores menores de 2500 KVA hasta 33% para transformadores mayores de 12000 KVA -- aproximadamente.

c).- Transformadores en aceite con aire y aceite -- forzado (tipo FOA).- Con la circulación forzada de aire y aceite se puede obtener hasta un 167% de la capacidad que tiene el transformador en OA, con capacidad intermedia hasta 123% en F.A. Si el transformador tiene un radiador exclusivo para que siempre trabaje en FOA pudiendo calentarse excesivamente, sin el aire o aceite forzado con las pérdidas de excitación únicamente.

d).- Transformadores en aceite con enfriamiento de agua (OW).- En este tipo de transformadores el calor se disipa a unos serpentines de agua en contacto con el aceite aislante. Dichas unidades no pueden trabajar sin la circulación de agua, por lo que no se les designa capacidad en OA.

e).- Transformadores en aceite con agua y aceite forzado Tipo FOW).- Se utiliza un cambiador de calor de aceite a agua externo al transformador, siendo su funcionamiento similar al FOA con radiador solamente para aire forzado.

f).- Transformadores secos, autoenfriados (Tipo AA).- En éstas unidades el aire circudante al núcleo y bobinas enfría circulando por convección natural.

g).- Transformadores secos, con aire forzado (tipo -- AFA).- A estos tipos de transformadores sólo se les designa una capacidad basada en la circulación forzada de aire.

A continuación se muestran algunos transformadores con cierto tipo de enfriamiento.



Fig. 1.24 Transformador de Distribución con enfriamiento propio.

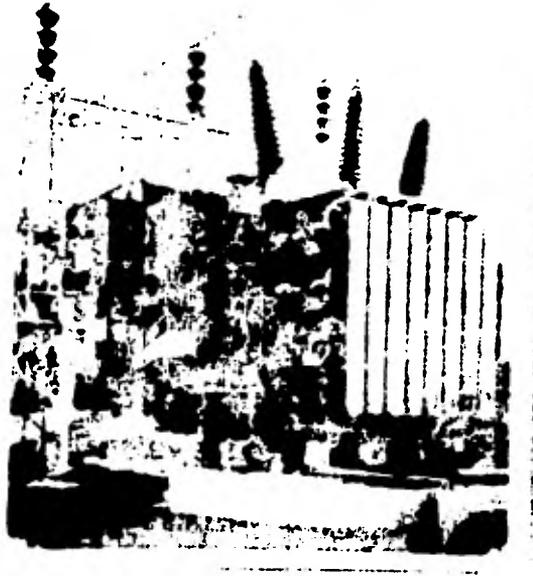


Fig. 1.25 Transformador con refrigeración de aceite y aire.

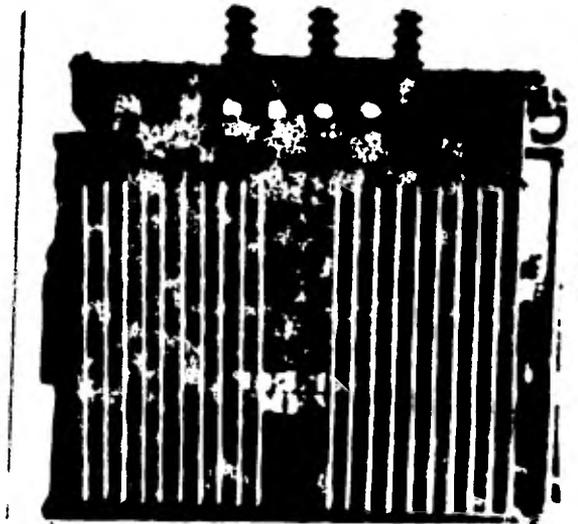


Fig. 1.26 Transformador con refrigeración de aceite o líquido no inflamable.



Fig. 1.27 Probador de aceite para transformadores.

ACCESORIOS NORMALES PARA TRANSFORMADORES MONOFASICOS 50 A 60 CICLOS,
HASTA 1000 KVA.

A C C E S O R I O	Hasta 25KVA	37.5 a 150KVA	167 a 1000KVA	
	15000 Volts o menos	15000 V o menos	Más de 15000 V	Todo Voltaje
Válvula para drenaje de (1/2")	SI			
Válvula combinada para drenaje y muestreo.		SI		
Válvula combinada para drenaje, - muestreo y adaptación para la conexión inferior del filtro-prensa.				SI
Indicador de nivel de aceite.				
Indicador circular de temperatura-para el aceite.				SI
Válvula para la conexión superior-al filtro-prensa.			SI	
Cambiador de derivaciones sin carga, de operación interior y accionamiento rápido.	SI	SI	SI	SI
Cambiador de derivaciones sin carga, operación simultánea con manija exterior montada en la tapa del transformador y con provisión para asegurarse con candado.				OPCIONAL
Conector para la tierra del tanque.	SI	SI	SI	SI
Placa de características con diagrama de conexiones.	SI	SI	SI	SI
Ganchos para levantar el transformador.	SI	SI	SI	SI
Aceite aislante necesario.	SI	SI	SI	SI
Agujero de mano para inspección y - cambio de conexiones.	SI	SI	SI	SI
Dispositivo para rolar.				SI

ACCESORIOS NORMALES PARA TRANSFORMADORES TRIFASICOS, 50 a 60 CICLOS,
HASTA 1000 KVA.

A C C E S O R I O	9 a 15 KVA	30 a 150 KVA	225 a 1000 KVA
	15000 V o menos	15000 V o menos	Más de 15000 V Todo Voltaje
Válvula para drenaje de (1/2")	SI		
Válvula combinada para drenaje y muestreo.		SI	SI
Válvula combinada para drenaje, muestreo y adaptación para la conexión inferior del filtro- -prensa.			SI SI
Indicador del nivel del aceite.			SI
Indicador circular de temperatu <u>r</u> a para el aceite.			SI
Válvula para la conexión supe <u>r</u> rior al filtro-prensa.			SI
Cambiador de derivaciones sin - carga, de operación interior y accionamiento rápido.	SI	SI	SI SI
Cambiador de derivaciones sin - carga, operación simultánea con manejo exterior montada en la - tapa del transformador y con -- previsión para asegurarse con - candado.			OPCIONAL
Conector para la tierra del tan <u>q</u> ue.	SI	SI	SI SI
Placa de características con -- diagrama de conexiones.	SI	SI	SI SI
Ganchos para levantar el trans- formador.	SI	SI	SI SI
Ganchos para levantar el trans- formador y para la tapa del - - principal.			SI
Aceite aislante necesario.	SI	SI	SI SI
Agujero de mano para inspección y cambio de conexiones.	SI	SI	SI SI

C A P I T U L O I I

CONSTRUCCION DEL CIRCUITO MAGNETICO DEL TRANSFORMADOR

A).- GENERALIDADES

Los transformadores más comunes se proyectan seleccionando una estructura de forma sencilla con el fin de que pueda embobinarse fácilmente y de que el núcleo a la vez sea fácil de construir.

Otra cuestión en la que se insiste en el diseño de los transformadores es que la longitud media de los devanados y el núcleo debe ser lo más pequeña posible para una área de sección transversal dada, con el objeto de reducir tanto la cantidad de material necesario como las pérdidas.

La forma de construcción debe prever canales de ventilación para facilitar el enfriamiento, con aislamiento sencillo y económico y devanados de forma apropiada para resistir los esfuerzos mecánicos.

Dentro de los tipos de transformadores usados más comúnmente para efectos de diseño se deben tener las siguientes características:

Para el tipo de transformador de núcleo se debe tener gran longitud media del circuito magnético y pequeña longitud media de los devanados, en cuanto a los de tipo acorazados la orden de longitudes debe ser inversa. Esto se traduce en menor área de núcleo y mayor número de espiras en los transformadores del núcleo que en los acorazados de igual potencia.

B).- TEORIA DE LA MAGNETIZACION DEL NUCLEO

Los transformadores tienen como parte fundamental al núcleo, normalmente compuesto por placas tanto de aleación - -

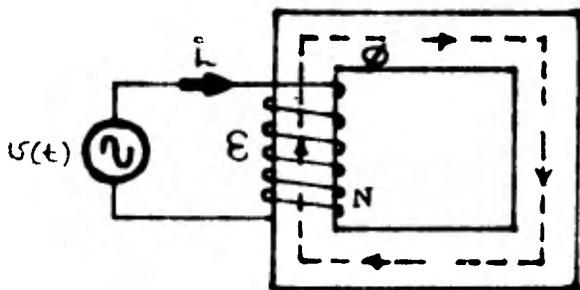
hierro - silicio así como de aleación acero - silicio.

La función principal del núcleo es la de aumentar la inductancia en las bobinas y reducir la corriente de excitación en vacío de los transformadores.

Los núcleos se fabrican con chapas metálicas cuyo espesor para frecuencias industriales va de 0.25 a 0.50 mm. y para frecuencias más altas (audio) de 0.02 a 0.05 mm con el fin de reducir las pérdidas debidas a las corrientes de Foucault.

Es de hacerse notar que las placas metálicas están revestidas con barniz aislante para evitar corrientes excesivas dentro de ellas.

Para hacer un análisis detallado de la forma en como se magnetiza el núcleo, partiremos del análisis del siguiente circuito. (figura 2.1).



N = Número de espiras
 ϵ = Voltaje inducido
 Φ = Flujo magnético
 $U(t)$ = Voltaje alterno
 $= V_{MAX} \text{ sen } \omega t$
 donde: $\omega = 2\pi f$

Fig. 2.1

Por otro lado de la Ley de Faraday tenemos que:

$$\epsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Analizando la malla interior; la suma de voltajes debe ser cero.

$$v(t) = N \frac{d\phi}{dt} \quad ; \quad v(t) - N \frac{d\phi}{dt} = 0$$

Sustituyendo valores:

$$V_{\text{MAX}} \text{sen } 2\pi f t - N \frac{d\phi}{dt} = 0$$

Lo que quiere decir que la tensión aplicada a la bobina en cualquier instante es del mismo valor que la fuerza electromotriz inducida (\mathcal{E}) pero de sentido contrario.

Por ello, si tenemos que la fem es de forma senoidal y si este valor lo igualamos con el de la ecuación (2.1) llegamos a la conclusión de que la densidad de flujo también será de forma senoidal.

Ahora de la ecuación (2.2) despejando a $d\phi$ nos queda que:

$$d\phi = \frac{V_{\text{MAX}}}{N} \text{sen}(2\pi f t) dt$$

Despejando el valor de ϕ por medio de integración tenemos:

$$\phi = \frac{V_{\text{MAX}}}{N 2\pi f t} (-\cos 2\pi f t) \quad ; \quad \text{pero: } V_{\text{MAX}} = \sqrt{2} V_{\text{EF}}$$

Sustituyendo:

$$\phi = \frac{\sqrt{2} V_{\text{EF}}}{N 2\pi f t} (-\cos 2\pi f t) = \frac{V_{\text{EF}}}{4.44 N f} (-\cos 2\pi f t)$$

Ahora, también podemos encontrar una relación entre el flujo y el valor de la corriente que circula en la bobina.

$$B = \mu H = \mu \frac{NI}{L} \quad ; \quad \text{pero: } B = \frac{\phi}{A}$$

$$\therefore \phi = \mu \frac{NI}{L} A$$

Donde:

ϕ = Flujo Magnético

μ = Permeabilidad del núcleo

N = Número de vueltas de las bobinas
 A = Area de la sección del conductor
 L = Longitud de la bobina.

A continuación se muestra un oscilograma mostrando el defasamiento entre V , ϕ y I .

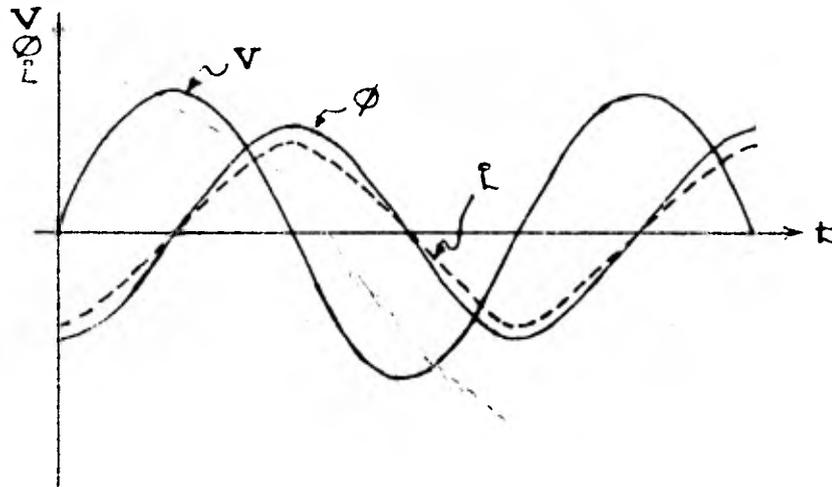


Fig. 2.2

C).- DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL NUCLEO

Como parte fundamental del transformador, el núcleo y su construcción serán objeto de estudio del presente capítulo.

El núcleo está compuesto por chapas metálicas superpuestas las cuales aparte de servir como base a los devanados sirven como conductores de flujo magnético.

Para que dicha conducción sea de una eficiencia alta es necesario magnetizar al núcleo en el mismo sentido en que las placas fueron laminadas ya que con esto la dispersión de flujo se reduce.

En cuanto a las pérdidas por corrientes parásitas, es necesario aislar las placas con esmalte o con papel para poderlas suprimir.

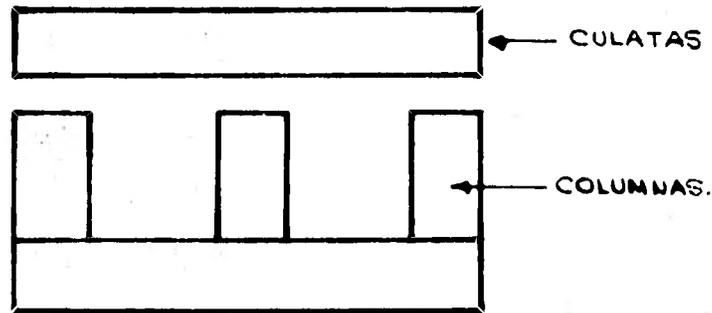


Fig. 2.3

En cuanto a la unión entre núcleos y culatas actualmente se usan dos tipos de juntas:

a).- Junta lisa; se usa en transformadores de gran potencia, esta junta se realiza sólo por contacto entre las partes.

b).- Junta ensamblada; se usa en transformadores de pequeña y mediana potencia, en ésta las partes quedan ensambladas.

Con respecto al tipo de sección del núcleo se dividen en núcleos de sección cuadrada y sección circular.

La sección cuadrada se usa normalmente en transformadores de pequeña potencia (Fig. 2.4) pues en éstos no hay problema de que las bobinas no sean de la misma forma que la sección del núcleo, en el caso de transformadores de mediana y gran potencia la sección del núcleo viene siendo casi circular (Fig. 2.6), esto se logra cortando las chapas en varias secciones escalonadas, pues de otra forma se tendría que todas las chapas deberían ser de distintos tamaños, esto por supuesto sería incosteable.

En las siguientes figuras se presentan ejemplos de uno y otro tipo de secciones y la correspondiente forma de los embobinados.

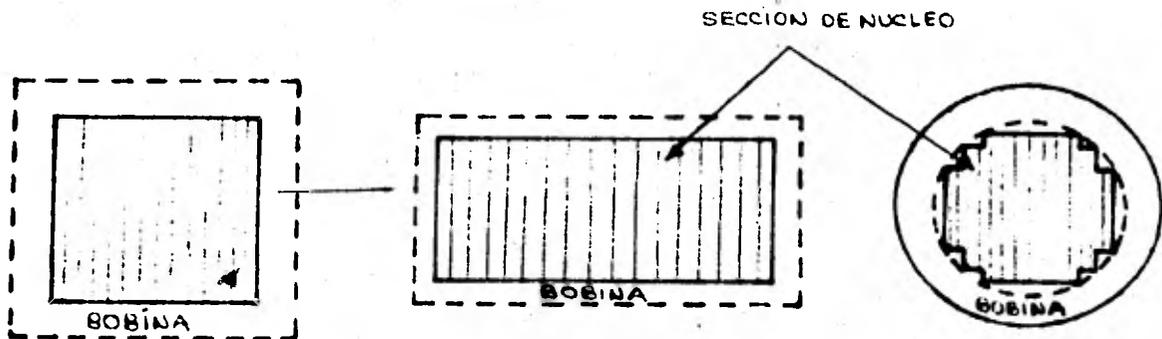


Fig. 2.4

Fig. 2.5

Fig. 2.6

En los transformadores de gran potencia se aumenta la eficiencia de la ventilación utilizando separadores de hierro - entre los distintos niveles de chapas.

En cuanto a las culatas, ya que su forma no afecta a las bobinas se construyen casi siempre con sección cuadrada o rectangular y algunas veces con sección escalonada, pero siempre más sencilla que la sección de las columnas.

Otra modalidad existente en la construcción del núcleo es la de colocar dos columnas exteriores, las cuales no llevan devanados y disminuyen la sección de las culatas, esto se hace con el fin de no tener problemas al transportar el transformador a su lugar de uso, normalmente los transformadores de potencia superior a 30 MVA llevan dispuesto el núcleo de esta forma, debido a que los transformadores de dicha capacidad son de altura considerable como para determinar que habrá problemas al transportarlo.

En la construcción del núcleo se deben tomar en cuenta varias consideraciones:

a).- Sobre el núcleo actuarán fuerzas electrodinámicas provocadas por corrientes de corto circuito.

b).- También actuarán sobre él, vibraciones mecánicas producidas por las pulsaciones del flujo magnético, contribuyendo estas a dañar la estructura del núcleo, además de provocar ruidos molestos.

Para evitar estos problemas, es necesario fijar la estructura del núcleo, esto se logra por medio de remaches y tornillos pasantes aislados totalmente de las placas del núcleo para evitar poner en corto circuito a dichas placas y para que no se induzcan corrientes parásitas debido a el paso del flujo, -- pues de esta forma provocarían calentamientos excesivos lo cual repercutiría en una disminución de eficiencia en el transformador.

A continuación se muestra la dirección que siguen las líneas de flujo en el núcleo cuando a su paso encuentran algún tornillo de fijación lo cual nos indica que se necesita tener cuidado en el diseño, pues como se ve, se desperdicia parte de la sección del núcleo, repercutiendo en una disminución de la eficiencia.

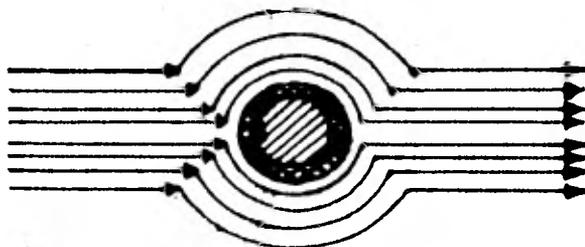


Fig. 2.7

Entrando ahora en cálculos de diseño de las partes -- constitutivas de un transformador tomaremos como base que para transformadores de potencia la densidad de flujo no excederá a los 14000 gausses.

Por otro lado la densidad de corriente en el cobre es tará limitada tanto por la eficiencia como por la elevación de temperatura permisible; en el caso de transformadores de potencia está comprendida entre los siguientes valores: - - - - -
 $2.17 \leq J \leq 2.94 \text{ amp/mm}^2$.

Para encontrar la sección del núcleo se utiliza la siguiente fórmula:

$$A = K \sqrt{\frac{P \cdot W_c \cdot W_k \cdot 10^6}{B \cdot J \cdot f}}$$

K = Constante

P = Potencia (KVA)

W_c = Peso del núcleo

W_k = Peso del cobre

J = Densidad de corriente

f = Frecuencia (cps)

B = Densidad de flujo

El valor de la constante K para diferentes tipos de -- núcleos es el siguiente:

<u>TIPO DE TRANSFORMADOR</u>	<u>CONSTANTE</u>
Núcleo distribuido	0.0548 a 0.0648
Núcleo acorazado	0.0399 a 0.0548
Trifásico tipo núcleo	0.0298 a 0.0498
Monofásico tipo acorazado	0.0798 a 0.0995

Para el cálculo del número de espiras en el devanado

de alta tensión se usa la relación:

$$N_1 = \frac{V}{4.44 f \Phi_{total}}$$

Y para determinar el número de espiras en el devanado de baja - tensión:

$$N_2 = \frac{V_2}{V_1} N_1$$

La corriente en el devanado de alta tensión será: $I_1 = \frac{P}{V_1}$

donde: P = Potencia

La corriente en el devanado de baja tensión:

$$I_2 = \frac{N_1}{N_2} I_1$$

El área de la sección transversal del conductor de la bobina de alto voltaje:

$$A_{c1} = \frac{I_1}{J} \text{ (mm}^2\text{)}$$

Para el devanado de bajo voltaje:

$$A_{c2} = \frac{I_2}{J} \text{ (mm}^2\text{)}$$

En cuanto a la relación alto- ancho de la ventana debe quedar - comprendida en los siguientes límites:

$$2.0 \leq \frac{h_w}{A_w} \leq 4.0$$

donde:

hw = alto de la ventana

Aw = ancho de la ventana

C.1) .- DEVANADOS

Los devanados suelen consistir de bobinas hechas de material conductor y cubiertas de cinta aislante, tratadas al vacío, impregnadas de barniz aislante y cocidas. En los transformadores pequeños para baja tensión se emplea hilo redondo pero en los transformadores grandes los conductores suelen ser rectangulares. Si la acción recta de un conductor macizo es grande o la frecuencia es alta, la resistencia de un conductor a la corrien-

te alterna puede ser apreciablemente mayor que su resistencia a la corriente continua. Para reducir la pérdida adicional debida a la distribución no uniforme de la corriente por el interior del conductor, los conductores grandes suelen subdividirse en hebras ó cabos ligeramente aislados entre sí y traspuestos adecuadamente en el devanado. Si se traspone cabos de igual tamaño de manera que cada uno abrace el mismo flujo total, la corriente total se divide por igual entre los cabos y se reducen a un mínimo las pérdidas en el cobre.

En el transformador de tipo núcleo el primario y el secundario se dividen cada uno en dos partes iguales, colocando una, en una rama vertical del núcleo y otra en la otra rama vertical. El fin de esta subdivisión de los devanados es reducir la fuga magnética entre primario y secundario. Los devanados suelen ser coaxiales con el devanado de baja tensión situado inmediato al núcleo, estando separados del núcleo y del otro devanado mediante barreras aislantes. En los transformadores con núcleo escalonado de sección circular pueden emplearse bobinas de sección circular, las cuales son fáciles de aislar y tienen una gran resistencia mecánica. Cada una de las dos bobinas de baja tensión puede devanarse en forma de hélice continua, pero si la tensión por bobina supera unos miles de volts, suele subdividirse el devanado. En tal caso suelen emplearse bobinas en forma de disco circular. Un devanado completo consiste en un cierto número de estas bobinas apiladas una sobre otra. Los discos suelen llevar entre ellos separadores de madera que faciliten la refrigeración.

En el transformador tipo acorazado distribuido las bobinas suelen ser coaxiales, con el devanado de alta tensión colocado emparedado entre las dos mitades del devanado de baja. Este tipo de devanado rara vez se emplea para tensiones superiores a los 5 KV.

En transformadores grandes de tipo acorazado suelen -

emplearse bobinas delgadas las cuales se disponen apiladas alternándose bobinas de alta y de baja tensión y entre cada dos de ellas se coloca un separador que facilita la refrigeración y el aislamiento.

Asímismo de acuerdo a la disposición de las bobinas, los devanados se dividen principalmente en dos grupos:

C.1).- DEVANADOS CONCENTRICOS.- Los transformadores de este tipo agrupan a sus bobinas una sobre otra, utilizando el mismo centro, dejando entre estas un espacio el cual servirá para aumentar la ventilación en las bobinas y evitar posibles puntos calientes.

C.2).- DEVANADOS ALTERNADOS.- El tipo de distribución en estos transformadores consiste de bobinas delgadas circulares o rectangulares arregladas en grupos de alto y bajo voltaje y colocadas alternadamente unas y otras, para evitar grandes corrientes de remolino las secciones grandes de conductor deberán formarse de varios conductores menores en paralelo.

E).- ESFUERZOS MECANICOS

Durante su vida útil los aislamientos van carbonizándose por la acción prolongada del calor, lo cual los debilita mecánicamente y, como están sujetos a esfuerzos mecánicos constantemente, acaban por fallar e inutilizan el transformador.

Los esfuerzos que soportan los aislamientos en operación normal son de una magnitud despreciable comparados con los que deben soportar durante un accidente; si el transformador se somete a un sobrevoltaje, los esfuerzos eléctricos aumentan en gran forma; si el transformador experimenta un corto circuito, los esfuerzos mecánicos en el aislamiento (y también en la es--

estructura), crecen en razón al cuadrado de la corriente; sin embargo, los esfuerzos producidos en la operación normal, si afectan la duración del transformador; por ejemplo, los esfuerzos mecánicos están cambiando de dirección constantemente en las bobinas. Veamos como tienden a contraer o expandir una bobina y le producen vibración constante. La figura 2.8 representa una bobina en la que Φ es el flujo; dL una parte diferencial de la longitud, I la intensidad de la corriente, dF un vector fuerza.

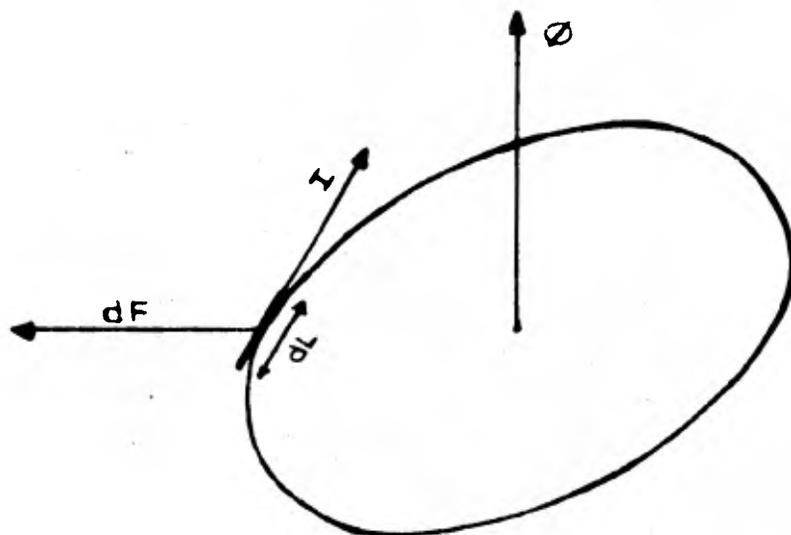


Fig. 2.8

Si en la vuelta de una bobina circular, como la de la figura anterior, se considera una longitud diferencial de valor:

$$dF = BdL \cdot I$$

Conjunto de fuerzas diferenciales que tienen dirección

radial harán que la vuelta experimente una contracción no una expansión, según las direcciones relativas del flujo y la corriente. Esta acción mecánica sobre los conductores, en un campo magnético, no tiene nada de particular, es la que hace funcionar a los motores.

E).- CONSIDERACIONES ECONOMICAS

E.1).- CORRIENTE DE MAGNETIZACION

Con el objeto de reducir las dimensiones de los transformadores y hacer que su fabricación resulte más económica, se adoptan en sus núcleos inducciones elevadas, las cuales tienen influencia preponderante sobre las pérdidas en el hierro y sobre la intensidad de la corriente en vacío. Un valor elevado de la inducción da origen también, a causa de la saturación del hierro a armónicas de orden superior que aparecen en la corriente magnetizante.

A continuación se indica la curva de esta corriente para un valor medio de la inducción y su descomposición en la onda fundamental y en las armónicas superiores (Fig. 2.9)

- a).- Curva de la corriente magnetizante.
- b).- Onda fundamental.
- c).- Armónica de tercer orden.
- d).- Armónica de quinto orden.
- e).- Armónica de séptimo orden.

La que destaca por importancia es la armónica de tercer orden, con respecto a la curva de corriente magnetizante; se ha prescindido de la histéresis magnética ya que causa retraso en el ciclo de imanación y por tal motivo la curva no aparecería simétrica.

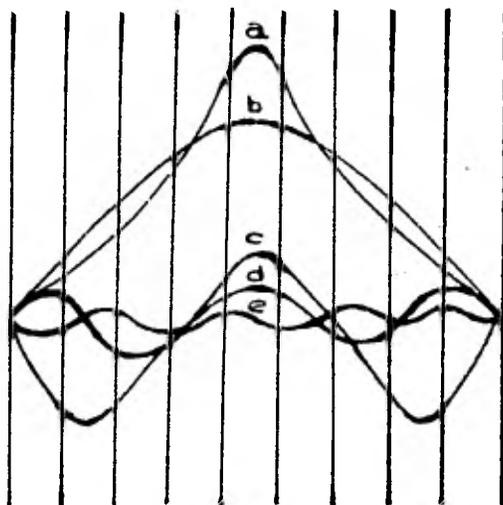


Fig. 2.9

INFLUENCIA DE LA CLASE DE ACOPLAMIENTO SOBRE LA FORMA DE LAS CURVAS.- A continuación se ve un oscilograma (Fig. 2.10), de un transformador monofásico y en el cual, para acentuar la deformación de la corriente de magnetización, se ha adoptado una inducción elevada. En dicha figura se aprecia claramente el valor de la deformación alcanzada; E_0 , I_0 y E_2 representan respectivamente: la tensión primaria, la corriente primaria y la tensión secundaria.

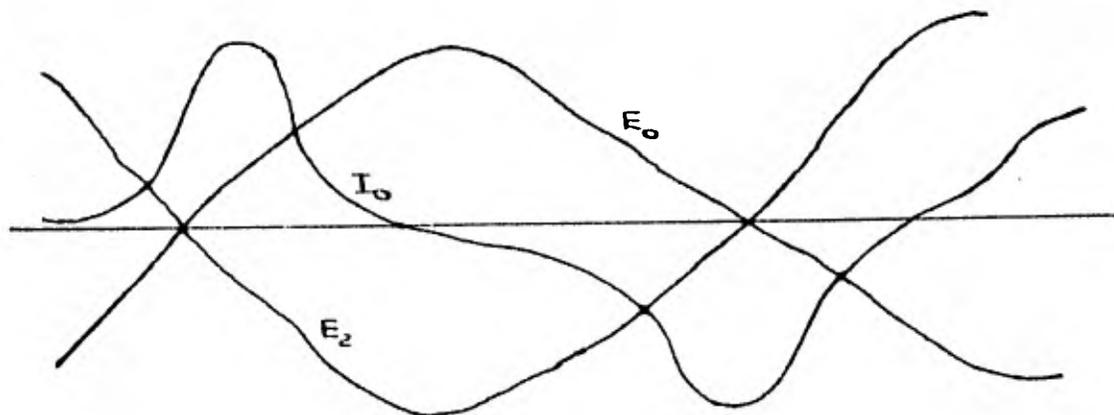
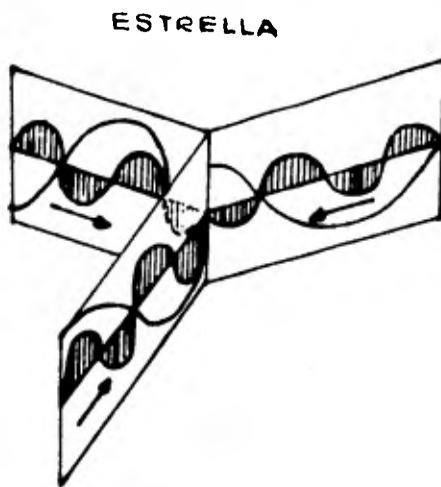


Fig. 2.10

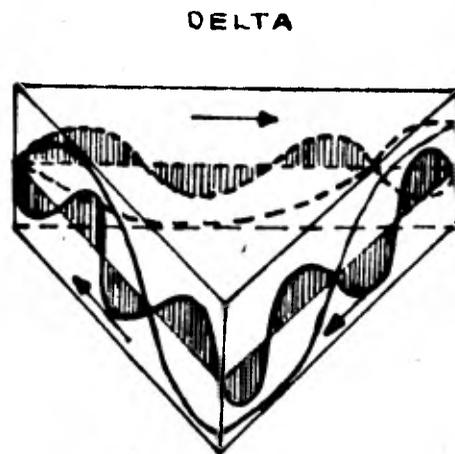
En los transformadores trifásicos según el modo de -- acoplamiento de los arrollamientos, la tercera armónica de la corriente no puede circular por la red.

A continuación se muestra el comportamiento de la tercera armónica en los casos de acoplamiento de estrella o en delta. La tensión y la corriente en las tres fases, están represen tadas por sinusoides que se desplazan con velocidad constante - en el sentido de la flecha.

Los valores instantáneos se miden en la línea de intersección de los tres planos para el acoplamiento en estrella y sobre las aristas del prisma triangular en el acoplamiento en delta.



(Fig. 2.11)



(Fig. 2.12)

La primera figura (2.11) pone de manifiesto que la tercera armónica, en los transformadores montados en estrella, tie nen en el punto neutro y en las tres fases el mismo valor y direc ción. Se observa en ella, también que la tercera armónica de la curva de tensión en dos fases tienen valores que se compensan mutuamente, de modo que no aparecerá en la tensión compuesta - - -

aún cuando se encuentre en la tensión de fase. La corriente de la tercera armónica no podrá, pues, circular más que si se establece un enlace entre el neutro del transformador y la tierra o entre otro punto neutro del sistema y aquélla. Este hecho evidencia que no debe unirse directamente el punto neutro de un alternador con el de un transformador si ambos trabajan sobre el mismo sistema trifásico.

En la segunda figura (2.12) se aprecia que con el acoplamiento en delta las terceras armónicas de las tres fases no se anulan en los vértices del triángulo y que el tren de ondas se cierra sobre el mismo. Si la armónica de tercer orden se forma en la tensión del transformador dará origen a una corriente en la delta y siendo iguales los valores instantáneos de dichas terceras armónicas en los tres vértices del triángulo ésta no podrá aparecer en la tensión compuesta de la red trifásica.

El flujo se comporta en un circuito magnético de tres columnas acopladas en estrella, como la corriente en un arrollamiento trifásico montado también en estrella y en el cual, según se ha indicado, la tercera armónica no puede circular. Las carcadas utilizadas corrientemente en los transformadores trifásicos que llevan tres columnas sobre las cuales van dispuestos los bobinados y dos culatas que reúnen aquéllas, son asimilables a un arrollamiento trifásico en estrella, por lo que la tercera armónica no podrá aparecer más que en el flujo de dispersión que se cierra entre las dos culatas.

La corriente magnetizante en una sola columna y con tensión sinusoidal, exige, según lo expuesto, la armónica de tercer orden, sin embargo la imanación del núcleo de tres columnas puede hacerse por corriente que no contenga más que la onda fundamental, abstracción hecha de las armónicas de 5o, 7o y 13o. orden. Esto se aprecia en la Figura (2.13) que represen-

ta los ampers-vuelta de dos columnas de un transformador trifásico, y por ellas se comprueba que cuando hay pocos amper-vuelta en una de las columnas, se compensan con la de la otra. Esta compensación momentánea del flujo en dos columnas inmediatas, es consecuencia precisamente de la estructura del sistema trifásico. En dicha figura son:

- Curva I Fuerza Magnetomotriz existente en la columna U.
- Curva II Fuerza Magnetomotriz necesaria en la columna U.
- Curva III Fuerza Magnetomotriz existente en la columna V.
- Curva IV Fuerza Magnetomotriz necesaria en la columna V.
- Curva V Fuerza Magnetomotriz de la columna V.

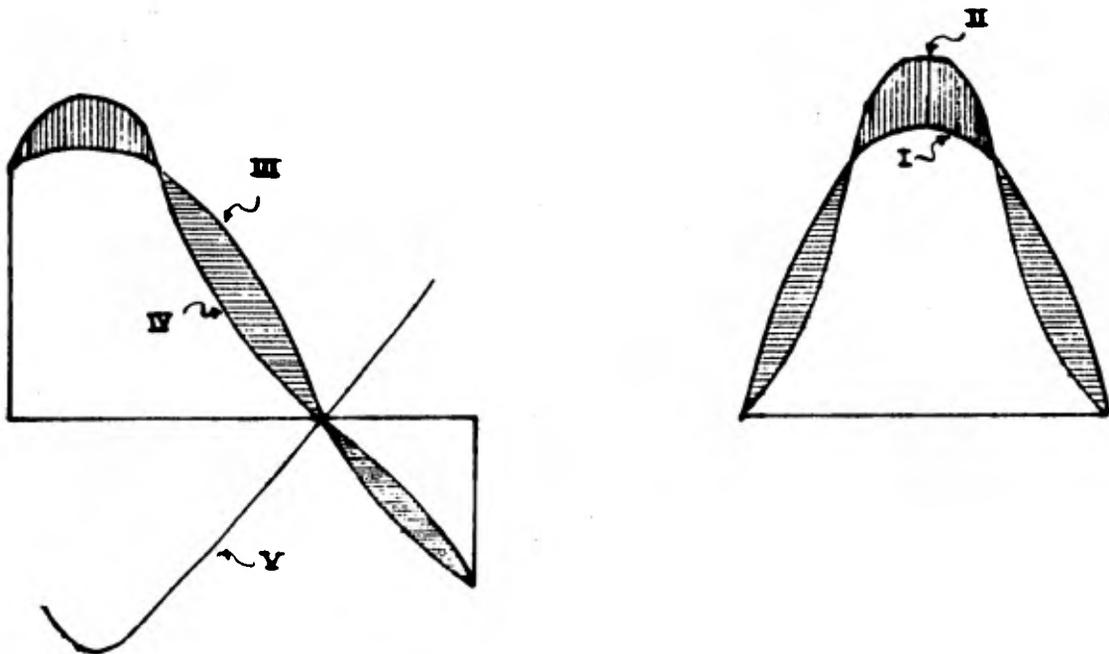


Fig. 2.13

La superficie rayada verticalmente en la figura anterior representa un aumento de flujo en la columna V, y la rayada horizontalmente, una disminución de flujo en la misma columna.

El hecho de que al faltar ampers-vueltas en una columna sean compensados por los de la otra columna, trae como consecuencia que un flujo de dispersión se cierre entre las culatas. Como la compensación de los ampers-vueltas tienen lugar tres veces durante un semiperíodo de la fuerza magnetomotriz aplicada, la dispersión entre culatas se realiza con una frecuencia de 150 Hz, supuesto que el servicio normal con 60 Hz y este flujo, de dispersión a frecuencia triple dá lugar a pérdidas suplementarias en ciertas partes del hierro.

Por otra parte dicho flujo de dispersión produce la tercera armónica en la tensión de fase, como se aprecia en los oscilogramas de la figura (2.14) en la que E_0 y I_0 son respectivamente la tensión y la corriente primaria, y E_3 la tensión secundaria medida entre dos puntas del arrollamiento (abierto) de la delta, por lo que tiene un valor tres veces la tensión simple ya que en la delta abierta las tres fases están en serie.

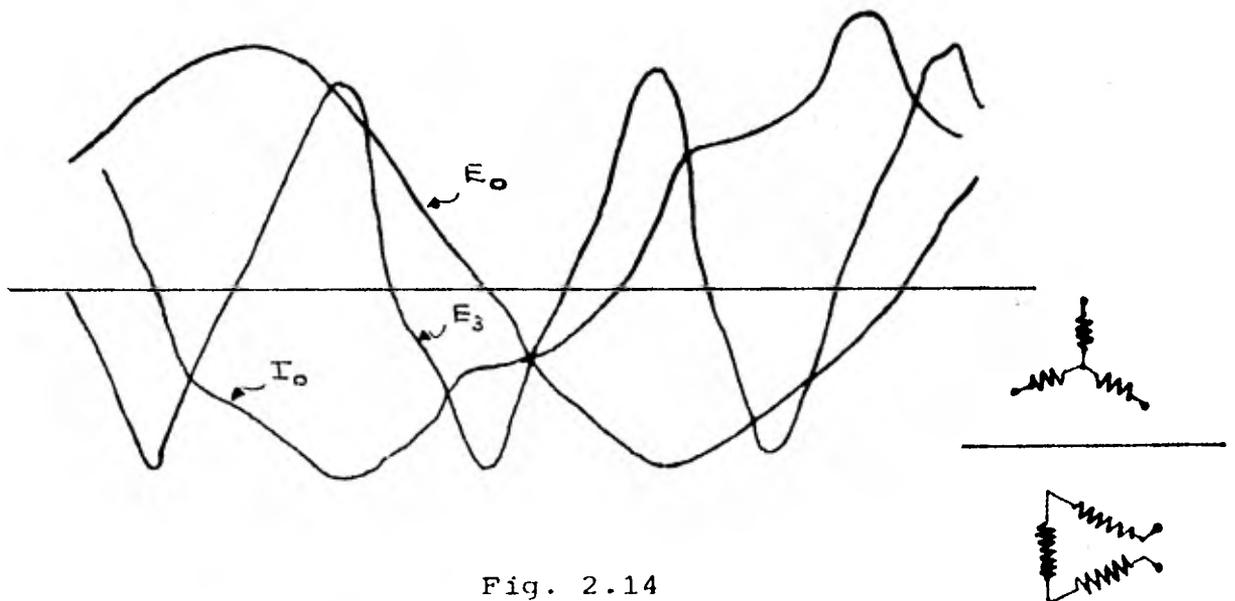


Fig. 2.14

Cuando se cierra la delta y por causas de la diferencia de potencial medida previamente, circula en el secundario - una corriente de frecuencia triple, la siguiente figura (2.15), muestra la tercera armónica en la corriente I_1 del arrollamiento secundario en triángulo, E_0 e I_0 son en la citada figura las curvas de la tensión y corriente primarias. Esta corriente I_1 - puede compensar la falta de magnetización en las diferentes --- columnas suprimiendo con ello casi completamente el flujo de -- dispersión entre las culatas, y puede tambien impedir la formación de la tercer armónica en la tensión de fase.

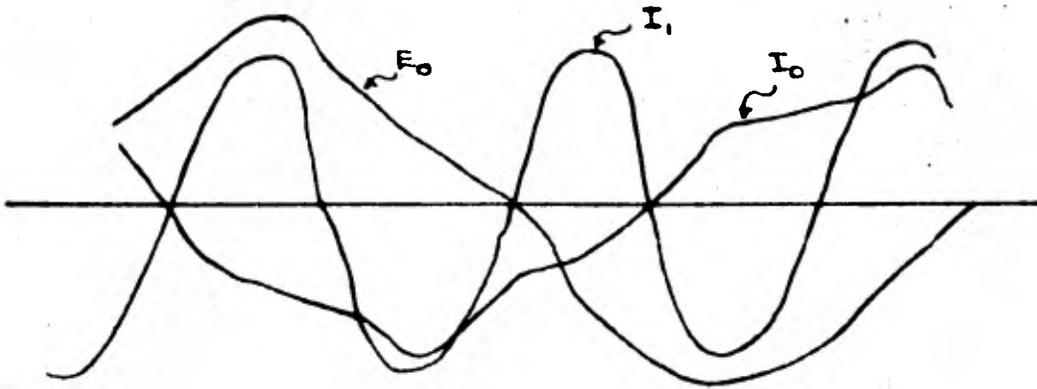


Fig. 2.15

En un grupo trifásico formado por tres transformadores monofásicos, la influencia de la tercera armónica será muy importante, y por ello es necesario conectar el arrollamiento primario o el secundario en delta.

Si fuera necesario, por otra razón, conectar ambos - en estrella, habría que prever un tercer arrollamiento (terciario), auxiliar, de compensación conecta en estrella.

En los transformadores trifásicos de núcleos de tres columnas, la tercera armónica que es producida solamente por el flujo de dispersión tiene una influencia insignificante sobre la forma de la curva de tensión.

Por las razones expuestas y con miras a impedir completamente la dispersión del flujo que origina pérdidas relativamente elevadas los transformadores trifásicos de gran potencia, conectados en estrella/estrella, van provistos de un arrollamiento terciario de compensación, conectado en delta. Los transformadores destinados a elevar la tensión de las centrales eléctricas, deben ser previstos sistemáticamente con acoplamiento delta/estrella, y esto a fin de impedir que las armónicas superiores puedan también causar pérdidas suplementarias en los alternadores.

CAPITULO III

CARACTERISTICAS DE OPERACION DE LOS TRANSFORMADORES

CARACTERISTICAS DE OPERACION DE LOS TRANSFORMADORES

A) .- PRINCIPIOS GENERALES DE OPERACION

Cuando se desprecian las corrientes de desplazamiento (debidas a las capacitancias de los devanados), los principios fundamentales a partir de los cuales se desarrolla la teoría de los transformadores vienen expresados por las ecuaciones;

$$V_1 = R_1 I_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} = R_1 I_1 + e_1 \quad (3.1)$$

$$V_2 = R_2 I_2 + \frac{d\lambda_2}{dt} = R_2 I_2 + e_2 \quad (3.2)$$

donde sabemos que:

- V_1 y V_2 son las tensiones instantáneas terminales.
- I_1 y I_2 son las intensidades instantáneas de las corrientes.
- R_1 y R_2 son las resistencias efectivas.
- λ_1 y λ_2 son los flujos instantáneos que atraviesan todas las espiras de primario y secundario.
- e_1 y e_2 son las tensiones instantáneas inducidas en primario y secundario por los flujos variables con el tiempo.

teniendo en cuenta que los subíndices 1 y 2, se refieren a los devanados primario y secundario respectivamente. - (Fig. 3.1)

Es necesario hallar las relaciones existentes entre los flujos y las intensidades de corriente en los devanados. Si es constante la permeabilidad de núcleo, los flujos serán proporcionales a las intensidades de las corrientes que los crean y, en consecuencia, por superposición, se podrán expresar los flujos totales como una suma de las componentes creadas por cada corriente actuando por sí sola. Es decir,

$$\lambda_1 = L_1 \dot{I}_1 + M \dot{I}_2 \quad (3.3)$$

$$\lambda_2 = L_2 \dot{I}_2 + M \dot{I}_1 \quad (3.4)$$

Los coeficientes L_1 , L_2 y M son las constantes de proporcionalidad que relacionan las componentes de los flujos con las corrientes que las crean, según la teoría clásica de los circuitos lineales acoplados, las ecuaciones (3.1) y (3.2) se pueden expresar de la forma siguiente:

$$V_1 = R_1 \dot{I}_1 + L_1 \frac{d\dot{I}_1}{dt} + M \frac{d\dot{I}_2}{dt} \quad (3.5)$$

$$V_2 = R_2 \dot{I}_2 + L_2 \frac{d\dot{I}_2}{dt} + M \frac{d\dot{I}_1}{dt} \quad (3.6)$$

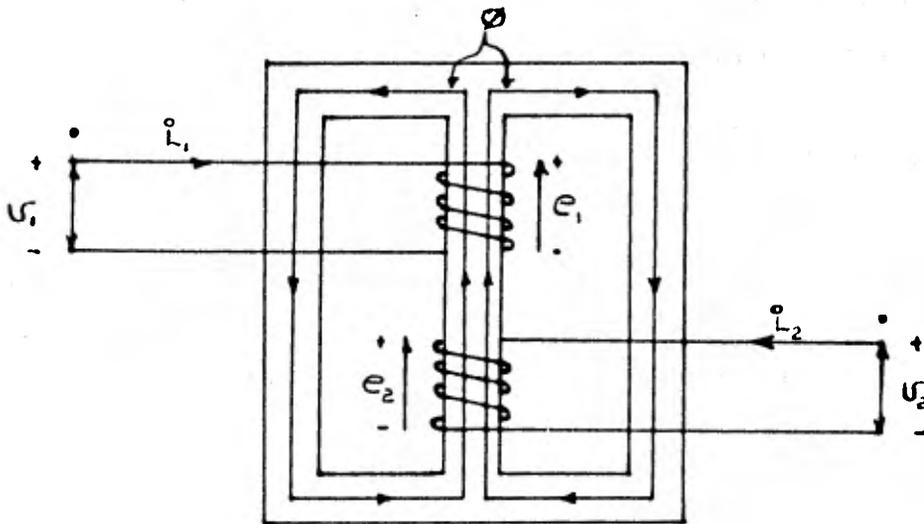


Fig. 3.1

La permeabilidad del núcleo de hierro de un transformador no es constante y por lo tanto sus coeficientes de autoinducción no son constantes; sus valores dependen de las condiciones magnéticas en el núcleo.

Para obtener un concepto físico del comportamiento de un transformador con núcleo de hierro y una primera aproximación a la teoría de su comportamiento, supongamos que todo el flujo se halla confinado en el núcleo magnético de gran permeabilidad y que por lo tanto atraviesan a todas las espiras de ambos devanados. De acuerdo con esta hipótesis, los flujos totales que atraviesan a primario y secundario son:

$$\lambda_1 = N_1 \varphi \quad (3.7)$$

$$\lambda_2 = N_2 \varphi \quad (3.8)$$

donde N_1 y N_2 son los números de espiras de primario y secundario y φ es el valor instantáneo del flujo en el núcleo (o flujo por espira) creado por las fuerzas magnetomotrices combinadas de las corrientes del primario y secundario. Es decir, los flujos de las ecuaciones (3.7) y (3.8), son los flujos resultantes creados por la acción combinada de las dos fuerzas magnetomotrices de primario y secundario actuando simultáneamente, en vez de la suma de las componentes debidas a cada una de las corrientes actuando por separado. En tal caso las ecuaciones (3.1) y (3.2) pueden escribirse en la forma:

$$V_1 = R_1 i_1 + N_1 \frac{d\varphi}{dt} = R_1 i_1 + e_1 \quad (3.9)$$

$$V_2 = R_2 i_2 + N_2 \frac{d\varphi}{dt} = R_2 i_2 + e_2 \quad (3.10)$$

donde e_1 y e_2 son las tensiones inducidas por el flujo variable con el tiempo, en el núcleo.

Primeramente vamos a considerar, las condiciones existentes cuando está abierto el secundario y en las terminales del primario se aplica una tensión alterna de amplitud y frecuencia constantes. Según la ecuación (3.9), el flujo deberá ajustarse por sí mismo de manera que la suma de la caída óhmica en el primario más la fuerza contraelectromotriz inducida por el flujo variable con el tiempo equilibre exactamente a la tensión aplicada y la corriente del primario que crea el flujo debe ajustar su intensidad para satisfacer estas condiciones. Como la caída óhmica en vacío en el primario suele ser muy pequeña, la tensión inducida en el primario será casi igual a la tensión aplicada. El flujo en el núcleo induce también una tensión en el secundario y como la mayoría del flujo está confinado en el núcleo, la razón de la tensión en el primario a la tensión en el secundario es casi igual a la razón del número de espiras del primario al número de espiras del secundario. De esta manera, este sencillo dispositivo estático es capaz de cambiar la tensión a la cual se dispone de la potencia de un generador de corriente alterna.

Si se conecta el secundario a un circuito de utilización, circulará corriente por el secundario. El núcleo se halla ahora accionado por la fuerza magnetomotriz de la corriente del secundario pero, a pesar de esta fuerza magnetomotriz, el flujo en el núcleo quedó prácticamente inalterado, puesto que en virtud de la ecuación (3.9), este flujo debe inducir aún una fuerza contraelectromotriz en el primario que difiera de la tensión a él aplicada solamente en la caída óhmica en el primario, que suele ser pequeña incluso a plena carga. Luego, cuando por el secundario circula corriente, la intensidad de la corriente del primario varía de manera que compense a la fuerza contraelectromotriz de la corriente del secundario.

Suele convenir considerar la corriente del primario - como suma de una componente de excitación i'_q y una - componente de carga i'_L es decir:

$$i_1 = i'_q + i'_L \quad (3.11)$$

La corriente de excitación i'_q es la componente - de la corriente del primario que es suficiente por sí mis - ma para crear el flujo requerido para inducir la fuerza - contraelectromotriz en el primario y es igual a la inten - sidad de la corriente en vacío correspondiente a unas con - diciones en vacío para las cuales el flujo en el núcleo - sea el mismo que en la carga. La componente de carga i'_L de la corriente del primario crea una fuerza magnetomotriz que se opone y equilibra exactamente a la fuerza magneto - motriz de la corriente del secundario. Si se toman en el - mismo sentido respecto al núcleo los sentidos positivos - de las corrientes de primario y secundario, la relación - entre la intensidad de la corriente de secundario i_2 y la componente de carga i'_L de la corriente del - primario es:

$$N_1 i'_L = - N_2 i_2 \quad (3.12)$$

Por lo que concluimos que, cuando se conecta el secun - dario a un circuito de utilización, la corriente consumi - da por la carga origina una variación compensadora en la - corriente del primario.

B).- TRANSFORMADOR IDEAL

El transformador con núcleo de hierro se acerca tanto a la perfección que puede considerarse en muchos proble - mas como un dispositivo transformador perfecto.

En la forma más sencilla de la teoría del transformador se supone que:

- 1).- Son despreciables las resistencias de los devanados.
- 2).- Es despreciable la pérdida en el núcleo.
- 3).- El flujo magnético total atraviesa todas las espiras de ambos devanados.
- 4).- La permeabilidad del núcleo es tan elevada que con una fuerza magnetomotriz despreciable se consigue el flujo necesario.
- 5).- Las capacidades de los devanados son despreciables.

Es decir, se supone que el transformador tiene unas características que se aproximan a las de un transformador ideal, sin pérdidas, sin fugas magnéticas y sin corriente de excitación.

De acuerdo con las hipótesis 1 y 3 tratadas anteriormente, las ecuaciones (3.9) y (3.10) se reducen para un transformador ideal a:

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.13)$$

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.14)$$

donde φ es el flujo resultante creado por la acción simultánea de las corrientes de primario y secundario.

Dividiendo la ecuación (3.13) entre la ecuación (3.14) obtenemos:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.15)$$

Esto es, en un transformador ideal, las tensiones instantáneas entre terminales son proporcionales al número de espiras de los devanados y sus formas de onda son exactamente iguales.

Se puede notar que el funcionamiento de un transformador depende del flujo variable con el tiempo y por lo tanto, en el estado permanente, el transformador funciona únicamente con tensión alterna.

Según las hipótesis 2 y 4, la fuerza magnetomotriz total necesaria para crear el flujo resultante es nula. La fuerza magnetomotriz total es la resultante de los amperes-espiras de primario y secundario y por lo tanto, si se toman los sentidos positivos de las corrientes de primario y secundario en el mismo sentido respecto al núcleo, como en la figura (3.1), tendremos:

$$N_1 \dot{L}_1 + N_2 \dot{L}_2 = 0 \quad (3.16)$$

Es decir, para un transformador ideal, la corriente de excitación es nula y por lo tanto, en virtud de la ecuación (3.11) la corriente del primario coincide con su componente de carga y la ecuación (3.12) se reduce a la (3.19) para un transformador ideal.

$$\frac{\dot{L}_1}{\dot{L}_2} = -\frac{N_2}{N_1} \quad (3.17)$$

El signo negativo de la ecuación (3.17) indica que las corrientes crean fuerzas magnetomotrices de sentidos opuestos. Cuando se emplean las ecuaciones (3.16) y (3.17) como aproximación para un transformador real, no se aplican a las corrientes continuas estacionarias que puedan existir en los devanados debidas a causas exteriores.

Multiplicamos la ecuación (3.15) por la (3.17), se obtiene:

$$\frac{U_1 \dot{L}_1}{U_2 \dot{L}_2} = -1 \quad (3.18)$$

Es decir, para un transformador ideal, las potencias instantáneas en primario y secundario son numéricamente-igual. El signo negativo demuestra que mientras el secundario entrega potencia al circuito de utilización, el primario absorbe potencia del generador.

Dividiendo la ecuación (3.15) entre la (3.17) se tiene:

$$\frac{\frac{V_1}{L_1}}{\frac{V_2}{L_2}} = -\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \quad (3.19)$$

esto es:

$$\frac{V_1}{L_1} = -\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{V_2}{L_2} \quad (3.20)$$

Lo que indica que si se conecta al secundario una carga resistiva R_L como se ve en la figura (3.2), la corriente instantánea que circula por la carga, tiene el mismo sentido que la caída instantánea de potencia de la carga.

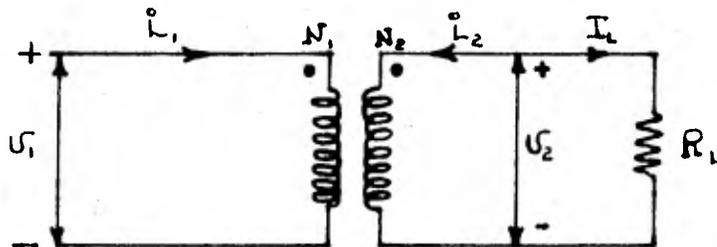


Fig. 3.2

Del análisis hecho anteriormente se concluye que el transformador es un dispositivo que transforma tensiones alternas, intensidades de corriente alterna o impedancias. También puede servir para aislar un circuito de otro o para aislar la corriente continua, manteniendo al mismo tiempo la continuidad de la corriente alterna entre los circuitos.

C).- TRANSFORMADORES CON NUCLEO DE HIERRO

En la teoría mas simple dada en el tema tratado anteriormente, el transformador se consideraba perfecto eléctricamente. Es necesario, sin embargo, desarrollar una teoría mas completa de sus características eléctricas, en la cual se tengan en cuenta, al menos en forma aproximada, - las siguientes imperfecciones existentes en los transformadores con núcleo de hierro:

- 1).- Los devanados tienen resistencias
- 2).- Existen fugas magnéticas
- 3).- Para crear el flujo se precisa una corriente de excitación.
- 4).- En el núcleo se producen pérdidas por histeré³sis y por corriente de Foucault.

En ciertos problemas en los que intervienen frecuencias elevadas es preciso tener en cuenta, también, las capacidades de los devanados.

En el análisis del caso tratado en este tema, para resolver las ecuaciones (3.1) y (3.2), las cuales nos determinan las relaciones existentes entre los flujos y las intensidades de las corrientes, es preciso tener en cuenta las fugas magnéticas y las propiedades magnéticas del núcleo.

C.1) FUGAS MAGNETICAS

Las fugas magnéticas ejercen un efecto importante sobre las características de carga de todas las máquinas de corriente alterna. Aún cuando las fugas magnéticas en un transformador con núcleo de hierro suelen ser muy pequeñas cuando trabaja en vacío, el estudio del campo magnético creado por la corriente que circula por un devanado ayuda a comprender las condiciones mas complicadas e importantes que se tienen cuando circulan corrientes por los dos devanados.

Haciendo un análisis, se encuentra que a pesar de la no linealidad magnética del hierro, el flujo de fuga es casi directamente proporcional a la intensidad de la corriente que lo origina. Esta importante propiedad del flujo de fuga simplifica mucho el estudio analítico de los transformadores con núcleo de hierro.

C.2) EFECTOS DEL NUCLEO DE HIERRO Y APROXIMACIONES SIMPLIFICATIVAS.

Si quiere determinarse analíticamente el funcionamiento de un transformador con núcleo de hierro como relación entre la corriente de excitación y el flujo mutuo resultante, es conveniente tomar una relación más sencilla que la real que la del ciclo flujo-intensidad de corriente. Como la corriente de excitación suele ser débil, frecuentemente podrá realizarse el estudio mediante métodos aproximados. Existen varias alternativas.

- 1).- Puede prescindirse de la forma de onda peculiar de la corriente de excitación y suponer que en las condiciones de corriente alterna permanente la corriente de excitación es sinusoidal. Los componentes de pérdida en el núcleo y magnéticamente de la corriente de excitación sinusoidal equivalente pueden ajustarse con los cambios de frecuencia y flujo en el núcleo de acuerdo con las características reales del transformador. Así, pues, la no linealidad del núcleo puede tenerse en cuenta hasta el punto en que afecte a las intensidades eficaces de las componentes de la corriente de excitación, pero se desprecian las armónicas de la corriente de excitación debidas a la no linealidad del núcleo. De acuerdo con estas hipótesis, para unas condiciones de funcionamiento dadas, se considera que el transformador se comporta como elemento de circuito lineal, si bien los parámetros de circuito que representan sus características de excitación varían sus valores cuando varía el flujo mutuo resultante o la frecuencia.

- 2).- Se obtiene una ulterior simplificación si se formulan hipótesis apropiadas acerca de los parámetros de circuito que representan las características de excitación. Así, a menudo se puede suponer que las características de excitación son representables por una combinación paralelo de una resistencia de valor constante y de una autoinducción igualmente constante.
- 3).- En muchos problemas en que intervienen las características de un transformador como elemento de un circuito puede desprejiciarse la pérdida en el núcleo y suponer que el flujo en el núcleo es, - en cada instante, proporcional a la intensidad - de la corriente magnetizante. Es decir, para unas condiciones de funcionamiento dadas, puede suponerse que las autoinducciones e inducciones mutuas no varían cíclicamente y por consiguiente se podrá aplicar al transformador con núcleo de hierro la teoría clásica de los circuitos acoplados magnéticamente. A pesar de la no linealidad magnética del núcleo, las características de un transformador dependen en última instancia de una fuga magnética esencialmente lineal y de una corriente de excitación no lineal que, no obstante es a menudo tan débil que puede prescindirse de sus peculiaridades. Luego, al principio del análisis, el transformador puede considerarse a menudo como elemento de circuito lineal. Los efectos de la no linealidad magnética pueden tenerse en cuenta parcialmente mediante las variaciones de las inductancias correspondientes a los cambios de las condiciones de funcionamiento.

- 4).- Puede simplificarse aún más la tercera alternativa suponiendo constantes las inductancias ante los cambios de las condiciones de funcionamiento.
- 5).- Como la corriente de excitación es a menudo débil frente a la componente de carga de la corriente del primario, frecuentemente podrá desprejarse por completo la corriente de excitación. Esta es la alternativa más simple y se emplea a menudo en el análisis del comportamiento de los transformadores conectados en redes de potencia.

C.3).- CIRCUITO EQUIVALENTE

Como se ha visto, dentro de los principales factores de la teoría del transformador, tiene gran importancia el aspecto de las fugas magnéticas, así como también el hecho de que las inductancias de fuga son casi constantes y que la no linealidad del núcleo de hierro solo afecta a la forma de onda de la corriente de excitación. Como ésta suele ser débil, frecuentemente se podrá desprejir aquella no linealidad, con lo que la corriente de excitación correspondiente a un flujo sinusoidal puede considerarse a menudo como una onda sinusoidal equivalente. En tal caso podemos hacer uso de métodos vectoriales de cálculo.

Los principios generales anteriores se pueden desarrollar en una teoría cuantitativa que puede representarse mediante digramas vectoriales y circuitos equivalentes y que muchas veces se puede simplificar, como se analiza a continuación.

Consideremos un transformador que suministra potencia a una carga, tal como se indica en la figura (3.2'). Supongamos que la fuerza electromotriz \mathcal{E}_e del generador varíe sinusoidalmente, que el generador tenga una resistencia interna R_e constante y que la carga tenga características lineales.

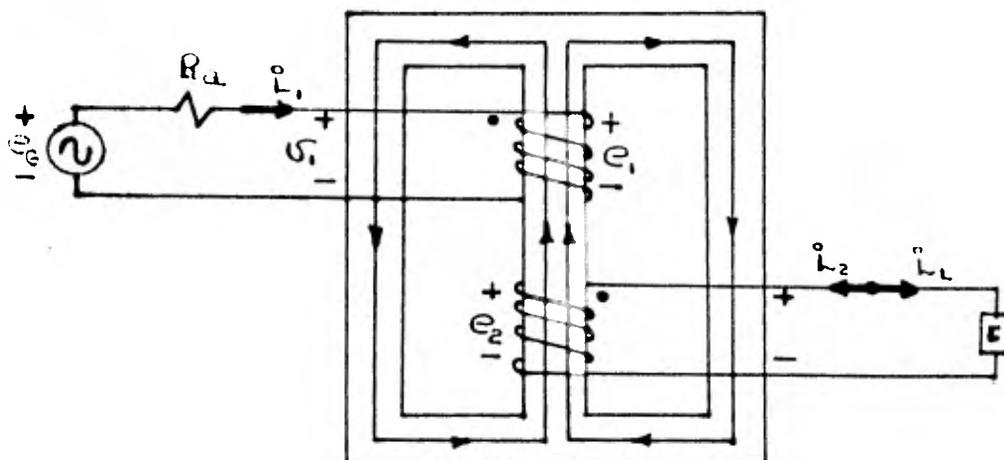


Fig. 3.2'

Las armónicas de la corriente de excitación originan caídas de tensión armónicas en la impedancia interna del generador y en la resistencia e inductancia de fuga del primario del transformador. Luego las armónicas hacen, que las formas de onda de las tensiones inducidas en el transformador sean diferentes de la forma de onda sinusoidal de la fuerza contraelectromotriz del generador. En los circuitos de potencia la corriente de excitación y la impedancia del circuito de primario suelen ser tan insignificantes que las caídas de tensión armónicas son despreciables y las formas de onda de las tensiones suelen ser casi sinusoidales.

Cuando se supone que corrientes y tensiones varían sinusoidalmente, las ecuaciones de las tensiones de primario y secundario (ecs. 3.21 y 3.22), pueden escribirse en forma vectorial (ecs. 3.23 y 3.24):

$$U_1 = R_1 I_1 + L_1 \frac{dI_1}{dt} + e_1 \quad (3.21)$$

$$U_2 = R_2 I_2 + L_2 \frac{dI_2}{dt} + e_2 \quad (3.22)$$

$$V_1 = (R_1 + jX_{L1}) I_1 + E_1 \quad (3.23)$$

$$V_2 = (R_2 + jX_{L2}) I_2 + E_2 \quad (3.24)$$

donde,

V_1 y V_2 son los vectores que representan las tensiones entre terminales.

E_1 y E_2 son los vectores que representan las tensiones inducidas por el flujo mutuo resultante.

I_1 y I_2 son los vectores que representan las corrientes.

R_1 y R_2 son las resistencias efectivas de los devanados.

X_{L1} y X_{L2} son las reactancias de fuga; es decir,

$$X_{L1} = \omega L_{L1} \quad (3.25)$$

$$X_{L2} = \omega L_{L2} \quad (3.26)$$

siendo L_{L1} y L_{L2} las inductancias de fuga.

Un problema que surge frecuentemente en el análisis de sistemas de potencia es el de determinar la tensión que hay que aplicar al primario para mantener entre las terminales del secundario una tensión prefijada, conociéndose la carga del secundario y el factor de potencia.

Supondremos conocidos la tensión entre las terminales del secundario, la corriente que por él circula y el factor de potencia de la carga y habrá que determinar la tensión entre las terminales del primario, la intensidad de la corriente que ha de circular por él, y el factor de potencia del primario, correspondientes a estas condiciones específicas del lado del secundario. También se suponen conocidas las resistencias, -- reactancias de fuga y la razón de los números de espiras y que se dispone de datos que den las pérdidas en el núcleo y la corriente de excitación en función de la tensión inducida.

Los diagramas vectoriales que ilustran las relaciones expresadas en las ecuaciones (3.23 y 3.24), pueden construirse de la manera siguiente:

Como el secundario está entregando potencia a la carga, la corriente en ésta tendrá el sentido de la caída de potencial a través de la carga durante la mayor parte de cada hemiciclo. Si el sentido positivo de la tensión de secundario V_2 es el indicado en la figura 3.2', el sentido positivo de la corriente entregada a la carga en el sentido de la caída de potencial a través de ella es el de I_L de la figura 3.1. Así, si V_2 e I_L son los vectores representativos de U_2 e I_L , su relación de fase es el ángulo que determina el factor de potencia de la carga. Si se toma V_2 como vector de referencia, I_L será de la forma indicada en la figura 3.3 el cual se ha trazado a partir de una carga inductiva de factor de potencia $\cos \theta_L$. Se puede observar que en la figura 3.2', I_L es igual y opuesta a I_2 .

Luego vectorialmente, I_2 será opuesta a I_L . Se observa que I_L representa la corriente en el devanado secundario y que E_2 representa la fuerza electromotriz del secundario (subida de potencial) en el mismo sentido. (fig. 3.3a)

Al escribir las ecuaciones fundamentales del transformador conviene suponer que las corrientes de primario y secundario son ambos positivos. Sin embargo, en el análisis de problemas en los cuales se conoce definitivamente el sentido de circulación de la potencia, puede ser más conveniente tratar con la corriente I_L del secundario (o sea $-I_2$), creada por la fuerza electromotriz del secundario E_2 , puesto que I_L es la corriente suministrada a la carga en el sentido de la fuerza electromotriz E_2 que la crea; según la ecuación (3.24).

$$E_2 = V_2 - I_2(R_2 + jX_{L2}) \quad (3.27)$$

o en función de la intensidad I_L de la corriente suministrada a la carga

$$E_2 = V_2 + I_L(R_2 + jX_{L2}) \quad (3.28)$$

Es decir, la fuerza electromotriz E_2 es la suma vectorial de la tensión entre terminales más la caída de tensión debida a la impedancia interna y a la corriente creada por la fuerza electromotriz, igual que un generador.

En la figura (3.3b) se ha representado vectorialmente la ecuación (3.28), mediante los vectores V_2 , $I_L R_2$ en fase con I_L , $j I_L X_{L2}$ adelantando 90° respecto a I_L y su suma vectorial E_2 .

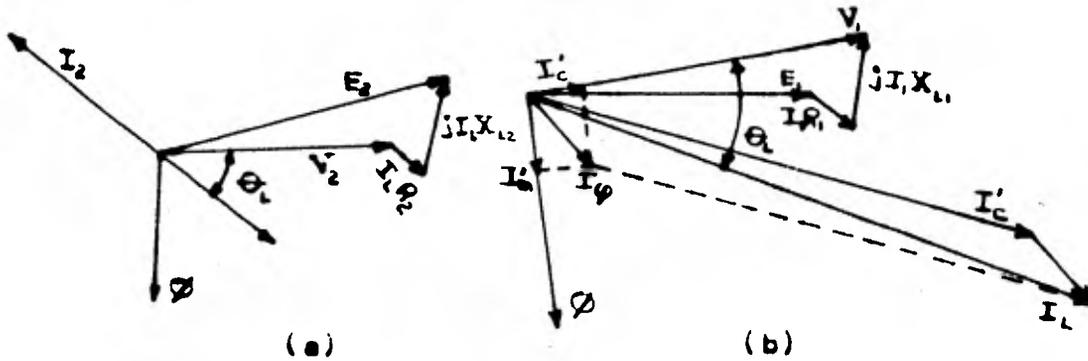


Fig. 3.3

Las tensiones E_1 y E_2 están inducidas por el flujo mutuo resultante, los valores de E_1 y E_2 son proporcionales a los números de espiras de los devanados y cuando los sentidos positivos de estas tensiones inducidas representan ambas fuerzas electromotrices, están en concordancia de fase y adelante al flujo en 90° . En consecuencia, el flujo mutuo resultante está retrasado en 90° respecto a las tensiones inducidas, según el vector Φ de la figura (3.3).

La corriente del primario puede considerarse como suma de la componente de carga que contrarresta la fuerza magnetomotriz del secundario, más una componente de excitación que crea el flujo mutuo resultante requerido. La intensidad de la componente de carga de la corriente del primario y de la corriente del secundario son inversamente proporcionales a los números de espiras de primario y secundario respectivamente y la componente de carga de la corriente del primario tiene sentido opuesto al de corriente del secundario. Asimismo, la corriente de excitación consta de un componente de pérdidas en el núcleo, en fase con la tensión inducida y una componente magnetizante en fase con el flujo. Si se considera la corriente magnetizante como una onda sinusoidal equivalente, se podrá representar vectorialmente.

En la figura (3.3.b) pueden verse la corriente del primario y sus componentes representados vectorialmente. La componente de carga de la corriente del primario es I'_L , opuesta a la corriente del secundario I_2 , o sea en fase con la corriente del secundario I_L . Como en la figura (3.3) la razón N_1 / N_2 es igual a $1/2$, la intensidad de I'_L será el doble de la corriente del secundario. La componente de pérdidas en el núcleo de la corriente de excitación I'_C en fase con la tensión inducida E_1 y la corriente magnetizante es I'_m en fase con el flujo ϕ .

La corriente de excitación es I'_ϕ y la corriente del primario I_1 , es la suma vectorial de la corriente de excitación I'_ϕ y la componente de carga I'_L .

Según la ecuación 3.1, la tensión V_1 entre las terminales del primario es la suma vectorial de la fuerza contraelectromotriz E_1 inducida por el flujo mutuo resultante y la caída de tensión en la impedancia de fuga del primario $I_1(R_1 + jX_{L1})$, según se indica en la figura 3.3b. El factor de potencia del primario $\cos \theta_1$.

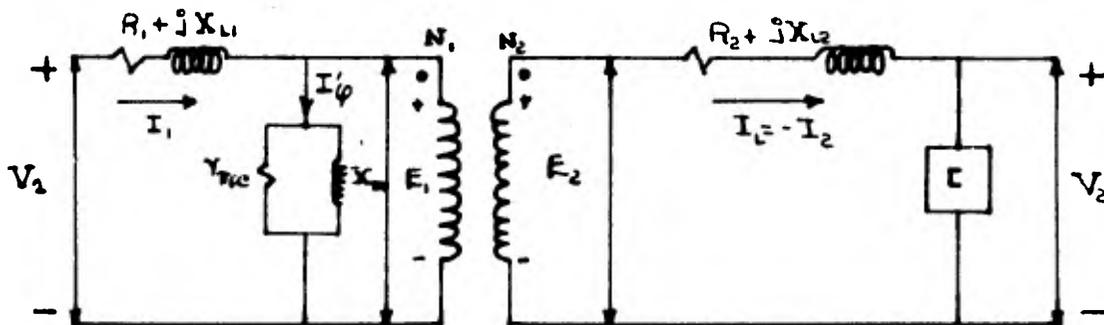
Así pues a partir de las ecuaciones (3.21) y (3.22) y de las características de excitación podrá determinarse el funcionamiento completo del transformador. Cuando se considera la corriente de excitación, como una onda sinusoidal equivalente estas relaciones pueden representarse por los diagramas vectoriales de la figura (3.3).

En la figura 3.2' las tensiones V_1 y V_2 presentan una pequeña diferencia de fase, debida a los efectos de las caídas de tensión en las impedancias de fuga, como también las corrientes I_1 y I_L a causa de los efectos de la corriente de excitación. Sin embargo, en

un transformador para sistema de potencia que funcione a su carga normal, las caídas óhmicas son inferiores - al 1% de la tensión de funcionamiento, las caídas en - las reactividades de fuga suelen ser del 2.4% de la ten- sión de funcionamiento y la corriente de excitación - del 4.8% de la intensidad de la corriente de funciona- miento normal . Por lo tanto, las tensiones V_1 y V_2 entre las terminales de primario y secundario suelen - estar casi en fase, al igual que la corriente I_1 del primario con la I_2 del secundario. Durante la mayor parte de cada hemiciclo, pues, las terminales marcadas en la figura (3.2'), con un punto de primario y secunda- rio tendrán la misma polaridad relativa y, durante la - mayor parte del tiempo en que la corriente penetra por la terminal del primario marcada con punto, la corrien- te está saliendo simultáneamente por la terminal con - punto del secundario y penetrando en la carga por la - terminal correspondiente.

En el circuito equivalente (fig. 3.4), se repre- sentan las características de excitación del transfor- mador por la combinación paralelo de una resistencia y una reactividad.

Se nota que las relaciones fundamentales represen- tadas por las ecuaciones (3.23), (3.24), (3.27) y (3.28) y los diagramas vectoriales son aplicados a este cir- cuito equivalente (fig. 3.4).



X_m = Reactancia de magnetización

$r_{\Pi fe}$ = Resistencia de histéresis

Fig. 3.4

D).- PERDIDAS MAGNETICAS.

Las pérdidas en el núcleo se deben a dos causas:
 a) La tendencia del material a conservar su imanación o a oponerse a una variación de imanación, que ocasiona las llamadas pérdidas por histéresis y b) El calentamiento por efecto Joule que aparece en el material a consecuencia de las corrientes de Foucault que se inducen en él al ser variable el flujo con el tiempo, esto constituye las pérdidas por corrientes de - - - Foucault.

D.1).- PERDIDAS POR HISTERESIS.

La aparición de pérdidas por histéresis está íntimamente asociada al fenómeno por el cual una región atravesada por un campo magnético, absorbe energía. Si la región no es el vacío, tan sólo una parte de la energía tomada del circuito eléctrico, se almacena y recupera totalmente la región, al suprimir el campo magnético. El resto de la energía se convierte en calor a causa del trabajo realizado sobre el material en el medio cuando responde a la imanación.

Cuando la inducción magnética es una región crece de un valor B_1 a otro B_2 la región absorbe energía. (fig. 3.5)

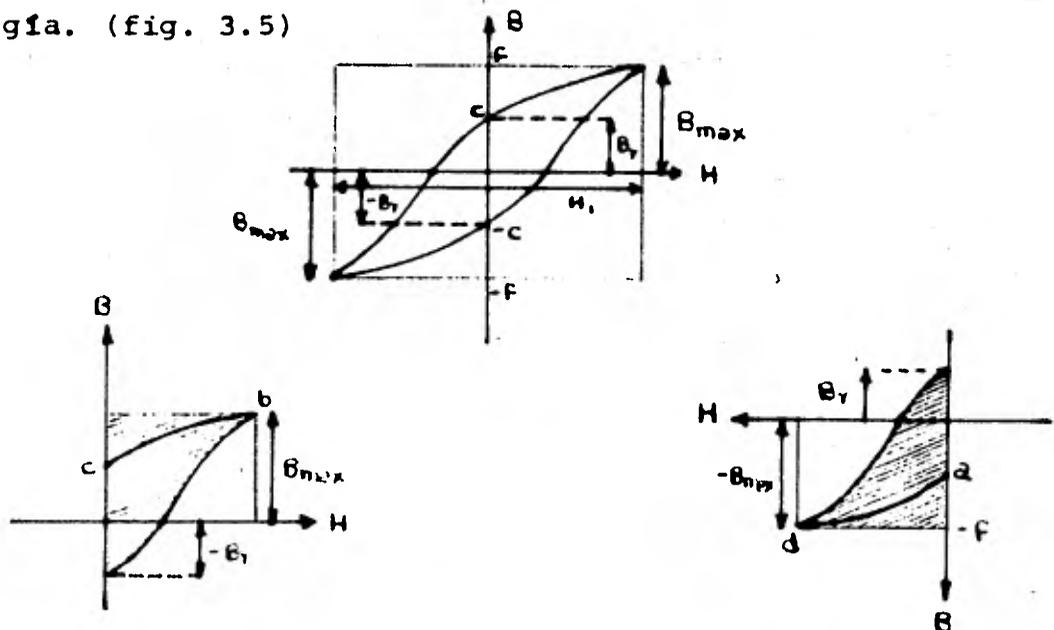


Fig. 3.5

La magnitud de la energía absorbida por una unidad de volumen viene dada por la ecuación (3.29), fig. 3.6.

$$\omega = \frac{1}{4\pi} \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad (3.29)$$

Esta integral es proporcional al área limitada por la curva $B(H)$ de dicha región (las rectas paralelas al eje H representan las constantes B_1 y B_2). - Si se disminuye la inducción magnética desde un valor dado cualquiera a otro valor menor, el signo algebraico de ω es negativo y la energía será cedida por el material.

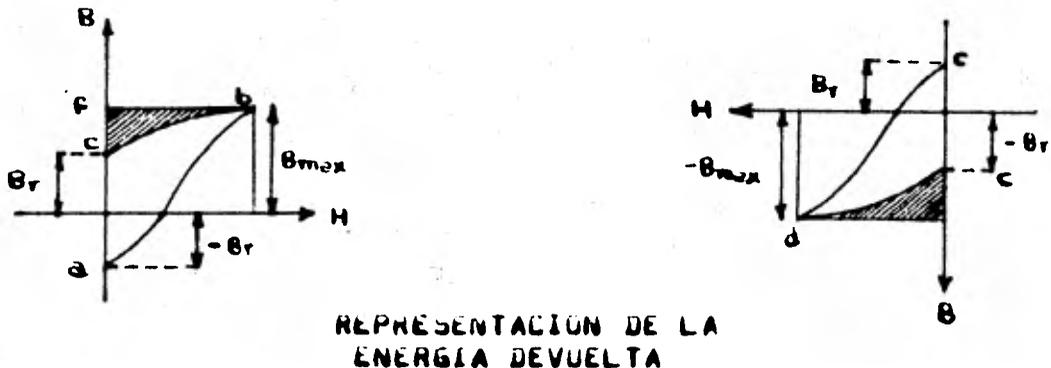


Fig. 3.6

Cuando la región considerada está constituida por material ferromagnético, la curva de magnetización entre dos valores cualquiera B_1 y B_2 correspondiente a valores decrecientes de H es diferente de la curva correspondiente a valores crecientes, los valores de la inducción magnética en un material ferromagnético son mayores, para un campo magnético H dado, cuando H disminuye que cuando crece, si bien, pa-

ra una variación cíclica de H los valores extremos - de B son los mismos para cada ciclo una vez el material ha alcanzado el estado estacionario.

Las diferencias entre las dos curvas que, para la condición cíclica, constituyen realmente las dos ramas de una lazo cerrado, indica que la energía absorbida por el material cuando crece la inducción magnética de B_1 a B_2 es mayor que la devuelta cuando la inducción magnética disminuye de B_2 a B_1 . La diferencia entre estas dos energías es la magnitud de la pérdida por histéresis. El cálculo gráfico de la integral para un ciclo completo de imanación permite determinar la pérdida de energía por ciclo debido a la histéresis magnética.

La pérdida por histéresis tiene una gran influencia sobre el rendimiento, la elevación de temperatura y por tanto sobre los valores nominales de las magnitudes de los dispositivos electromagnéticos.

Aún cuando el área de un lazo de histéresis cerrado indica la cantidad de energía disipada en el núcleo por unidad de volumen, no indica en que parte del ciclo se produce la disipación.

Si un volumen V de material magnético que tiene el flujo distribuido uniformemente en todos sus puntos y del cual se conoce su lazo de histéresis se somete a una variación cíclica de frecuencia f hertz, la disipación de energía en unidad de tiempo debida a la histéresis (pérdida de potencia por histéresis) será:

$$P_h = V f \cdot (\text{área del lazo}) \quad (3.30)$$

donde: P_h [watts]
 V [m^3]
 H [Tesla]
 B [Lenz]

Se entiende que el área de lazo viene expresado como producto de las unidades de H y B empleadas. De la ecuación (3.30) se tiene como pérdida por histéresis en watts:

$$(3.31) \quad P_h = VFK'K'' \times (\text{Área del lazo en cm}^2)$$

donde la inducción magnética viene dada en lenz, el campo magnético en tesla y el volumen en metros cúbicos, la constante K' es el número de lenz correspondiente a 1 cm. de la escala de campos magnéticos y K'' es el número de tesla correspondiente a 1 cm. de la escala de inducciones magnéticas.

Si se conoce el lazo de histéresis para la inducción magnética máxima dada B_{max} , se podrá calcular la pérdida por histéresis por ciclo con ayuda de las relaciones anteriores, pero la manera de variar esta pérdida en función de B_{max} sólo podrá determinarse repitiendo el cálculo para lazos de histéresis de diversos valores de B_{max} . Empíricamente Steinmetz halló, tras un gran número de medidas, que el área del lazo de histéresis normal de muestras de distintos hierros y aceros empleados corrientemente en la construcción de aparatos electromagnéticos de su tiempo era aproximadamente proporcional a la potencia 1.6 de la inducción magnética máxima en el dominio de inducciones comprendido entre 1000 G y 12000 G. Debido a esto han desarrollado numerosos aceros magnéticos, de propiedades ampliamente variables; es por esto, que al exponente 1.6 hoy en día no da el área de los lazos con suficiente precisión. La expresión empírica de la pérdida de energía por unidad de volumen por ciclo viene dada con mayor propiedad por la expresión:

$$\omega_h = \eta B_{max}^{1.6} \quad (3.32)$$

donde n y η tienen valores que dependen del material; el valor puede estar comprendido entre 1.5 y 2.5 para los materiales actualmente existentes. Cuando la expresión anterior no es suficientemente precisa, las constantes se deberán evaluar para un cierto dominio de B_{max} comprendidos en este dominio.

Tomando logaritmo en ambas expresiones de la ecuación (3.32):

$$\text{Log } \omega_h = n \text{ Log } B_{m_{ox}} + \text{Log } \eta \quad (3.33)$$

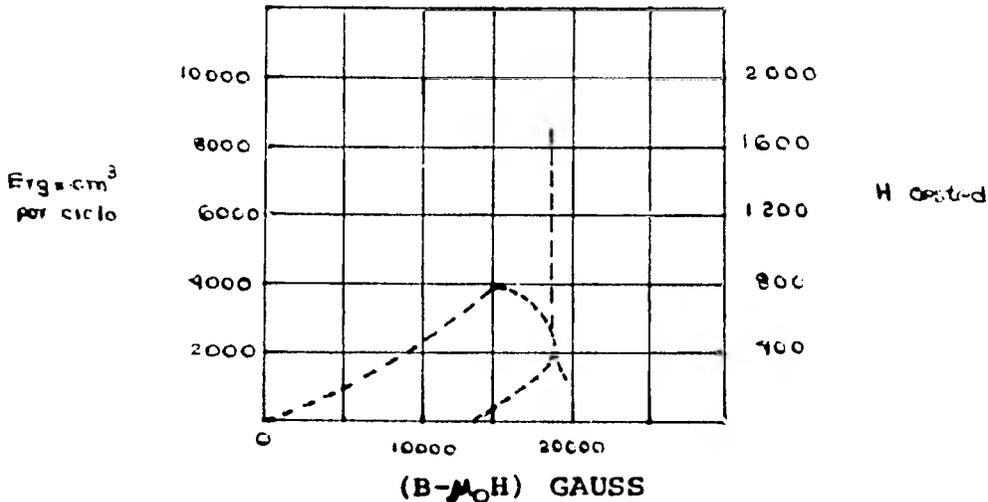
existiendo una relación lineal, como se ve, entre $\text{Log } \omega_h$ y $\text{Log } B_{max}$.

Los valores de ω_h y B_{max} de la ecuación (3.31) puede darse en un sistema cualquiera de unidades, si se toma el valor correspondiente del coeficiente η . La pérdida total por histéresis en un volumen V en el que la inducción magnética sea uniforme en todos sus puntos y que varíe cíclicamente con una frecuencia f se puede expresar como sigue:

$$P_h = \eta V f B_{m_{ox}}^n \quad (3.34)$$

En un transformador la imanación suele estar dirigida aproximadamente a lo largo del núcleo. Su valor crece continuamente en una dirección hasta alcanzar un máximo; luego disminuye, se anula, se invierte y repite la variación en sentido contrario. Esta imanación en un volumen cualquiera está dirigida según un eje fijo en el espacio y la pérdida por histéresis que se produce en este proceso recibe el nombre de pérdida por histéresis alterna.

Sin embargo, puede producirse otra pérdida a causa de otro modo de variación del estado de imanación. - Si se mantiene constante el valor del campo pero se varía su dirección, variando la dirección de H respecto al volumen del material o viceversa, aparece otra pérdida por histéresis llamada pérdida por histéresis rotatoria. La figura 3.7 indica la forma de la variación de esta pérdida con B_{max} para dos calidades típicas de acero.



CURVA DE IMANACION PARA ACERO AL SILICIO PARA TRANSFORMADORES

Fig. 3.7

Para la determinación de estas pérdidas en la práctica se utiliza la siguiente relación:
$$\rho = \frac{\eta \nu f B^{1.6}}{10^7}$$

Valores de η para algunos cuerpos:

Chapa hierro recocida	0.001
Plancha hierro delgada	0.003
Plancha hierro gruesa	0.0035
Plancha hierro ordinaria	0.004
Hierro fundido	0.16

Función gris	0.0183
Acero fundido recocido	0.008
Acero dulce	0.0095

D.2).- PERDIDAS POR CORRIENTES DE FOUCAULT.

Siempre que varíe el flujo magnético en un medio, como consecuencia de la variación del flujo con el tiempo aparece en el medio un campo eléctrico. La integral curvilínea de este campo E a lo largo de un camino cerrado cualquiera que limite la superficie atravesada por el flujo considerado, es igual, en virtud de la ley de Faraday para la inducción, a

$$\oint_{abcd} E \cdot dl = - \frac{d}{dt} \int B \cdot nds \quad (3.36)$$

donde $abcd$ es el camino cerrado que limita la superficie atravesada por el flujo.

Cuando el medio es conductor, este camino es asiento de una corriente generada por la fuerza electromotriz inducida y resultante de la integral del campo eléctrico. Estas corrientes son las llamadas corrientes de Foucault. Su presencia origina una pérdida de energía en el material, proporcional a $i^2 R$, llamada pérdida por corriente de Foucault, absorbiéndose dicha energía del circuito que crea el campo y disipándose en forma de calor en el medio.

Como la inducción magnética en los materiales ferromagnéticos suele ser relativamente elevada y como la resistividad de los materiales no es demasiado grande, las fuerzas electromotrices inducidas, las corrientes de Foucault y las pérdidas asociadas podrán hacerse apreciables si no se proveen los medios para reducir las todo lo posible. Esta pérdida es de gran importancia en la determinación del rendimiento, de la elevación de temperatura y por tanto de los valores de

funcionamiento en general de los aparatos eléctricos - de funcionamiento en los cuales varía la inducción magnética.

Para analizar las condiciones que suelen ocurrir en un núcleo de hierro, partiremos de considerar un -- bloque metálico delgado como se muestra en la figura - (3.8), atravesado por un flujo alterno φ por la ecuación (3.36) la fuerza electromotriz e inducida a lo largo de un camino a b c d a que limita una superficie a través de la cual varía el flujo, vendrá dada por:

$$e = - \frac{d\varphi}{dt} \quad (3.37)$$

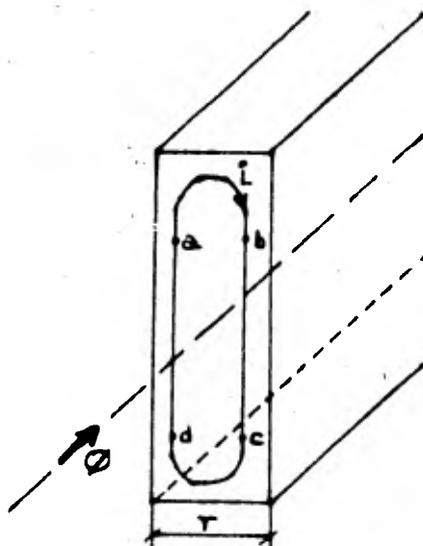


Fig. 3.8

Esta fuerza electromotriz hace que por el circuito a b c d a circule una corriente de intensidad I generando una fuerza magnetomotriz, en un sentido tal que se oponga a la variación de φ . El efecto de estas corrientes es blindar el material del flujo, dando como resultado una inducción magnética menor en la región central del bloque que en su superficie. Dado el flujo total variable periódicamente, la inducción mag-

nética será en el centro menor que la que se obtendría dividiendo el flujo total máximo por el área. Otra manera de describir este efecto, es decir que el flujo total tiende a concentrarse hacia la superficie del bloque. Este fenómeno se conoce como efecto cortical o efecto pelicular.

Un estudio útil, el cual ignore el efecto cortical da resultados que tienen suficiente precisión en la aplicación de los dispositivos que poseen núcleos laminales.

Este estudio se aplica a un bloque delgado plano de material conductor cuyo espesor sea r . Se supone distribuido uniformemente un campo magnético cuyo módulo varía con el tiempo y cuya dirección es siempre paralela a la flecha (fig. 3.8). Esto significa que las fuerzas magnetomotrices de las corrientes de Foucault tienen un efecto despreciable sobre la distribución del flujo y que los recorridos de la corriente tales como $a b c d a$ son simétricos respecto a la recta axial que pasa por O . También, como la altura es mucho mayor que el espesor, el gradiente de potencial es prácticamente uniforme a lo largo de las trayectorias verticales de la corriente, excepto en las partes superiores e inferiores del bloque.

Por esta razón, todo corte horizontal de altura h que no está demasiado próximo a la parte superior e inferior, tiene prácticamente la misma configuración de gradientes de potencial y densidades de corriente que cualquier otro corte horizontal, la cara estrecha que contiene los puntos $a b c d$ es normal a la dirección del flujo. La disminución del módulo de la inducción magnética con el tiempo en la superficie $a b c d$ en el sentido indicado induce una fuerza electromotriz a lo largo del camino en el sentido $a b c d$, como se ve en la figura (3.9):

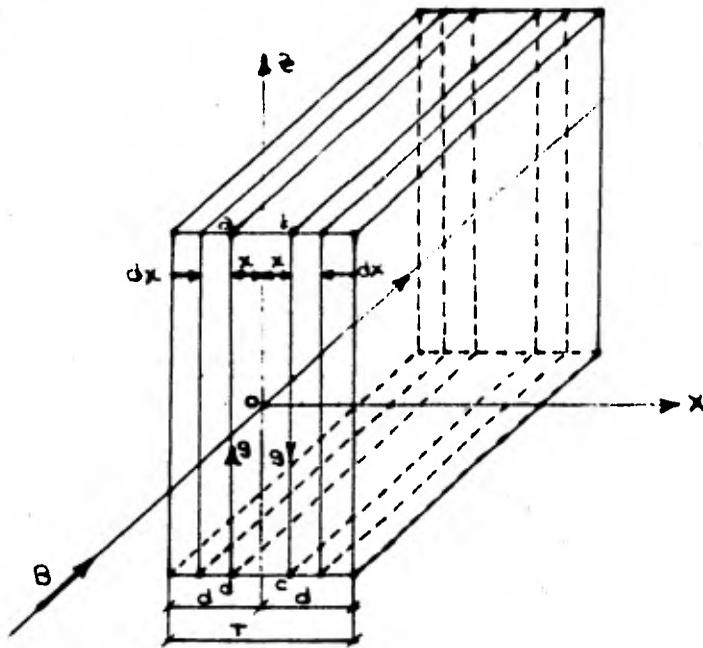


Fig. 3.9

Aplicando la ley de Faraday al camino a b c d - en el plano XZ normal a la dirección de B da:

$$\oint E_x \cdot dL = - \frac{d}{dt} \int B \cdot n ds \quad (3.38)$$

después de la integración obtenemos:

$$2E_x = - \frac{d}{dt} (2Bx) \quad (3.39)$$

Si el material conductor tiene una resistividad ρ la densidad de corriente J_x a lo largo de b-c da es:

$$J_x = \frac{E_x}{\rho} = - \frac{1}{\rho} \frac{d}{dt} (Bx) = \left(- \frac{x}{\rho} \right) \frac{dB}{dt} \quad (3.40)$$

Ya que x no es función de t. La pérdida instantánea de potencia por unidad de volumen es:

$$J_x^2 \rho = \frac{x^2}{\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (3.41)$$

La pérdida instantánea por corrientes de Foucault por cubo unitario de material laminado con aislamiento perfecto entre láminas, con lo que no puede existir corriente a través de la laminación, es:

$$\frac{1}{2d} \left[\frac{2}{3} \frac{d^3}{\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \right] = \frac{d^2}{3\rho} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (3.42)$$

Esta pérdida es originada por la variación de B - con el tiempo, si su valor instantáneo es:

$$b = B_{\max} \cos \omega t \quad (3.43)$$

derivando (3.43) y sustituyendo en la ecuación (3.40), obtendremos:

$$\frac{d^2 \omega^2 B_{\max}^2}{3\rho} \sin^2 \omega t \quad (3.44)$$

Que es la pérdida instantánea de potencia. Como - el valor medio de una función seno al cuadrado para - un número entero cualquiera de ciclos, o para un intervalo de tiempo suficientemente largo es igual a la mitad de su valor máximo, el valor medio de la pérdida de potencia por corrientes de Foucault por unidad de volumen cuando la inducción magnética varía sinusoidalmente con frecuencia F es:

$$p_f = \frac{d^2 2\pi F^2 B_{\max}^2}{3\rho} = \frac{\pi^2 F^2 \tau^2 B_{\max}^2}{6\rho} \quad (3.45)$$

donde τ es el espesor de la lámina.

Para un circuito magnético que contenga un volumen V de material laminado del núcleo, sometido a las mismas condiciones magnéticas anteriores, la pérdida-media de potencia por corrientes de Foucault es:

$$P_f = V_{pf} = \frac{\pi^2 f^2 T^2 B_{m\max}^2}{6 \rho} V \quad (3.46)$$

Donde V se expresa en M^3 , f en Hz, T en m, $B_{m\max}$ en tesla y ρ en ohm-m; P_f vendrá dado en watts.

Para un cálculo más preciso se emplea la siguiente expresión:

$$P_f = \frac{V f B_{m\max}^2}{12 \mu} (\alpha d)^2 \left[1 - \frac{6}{945} (\alpha d)^4 \dots \right] \quad (3.47)$$

donde μ es la permeabilidad estática del material que es contante y viene dada por

$$\alpha d = \pi T \sqrt{\frac{2 \mu f}{\rho}} \quad (3.48)$$

Una deducción importante se obtiene a partir de la expresión (3.41). Para todo núcleo la fuerza electromotriz instantánea e generada magnéticamente en un devanado que rodea al núcleo es proporcional a $-db/dt$. La pérdida instantánea por corrientes de Foucault dada por la ecuación (3.39) es proporcional a $(db/dt)^2$ y por tanto a e^2 . Por tanto la pérdida media por corrientes de Foucault es proporcional al valor medio de e^2 . Ahora bien, el valor medio del cuadrado de la tensión instantánea es, por definición, el cuadrado de la tensión eficaz. Luego, independien-

temente de la forma de onda de la tensión alterna generada, la pérdida P_F es proporcional al cuadrado de la tensión eficaz, dentro de los límites de validez de la ecuación (3.41).

D.3).- PERDIDA TOTAL EN EL NUCLEO.

La pérdida total de potencia existentes en los núcleos de hierro (pérdidas magnéticas) sometidos a un campo magnético de excitación alterna, es la suma de las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault. De las ecuaciones (3.31) y (3.45) la pérdida total de potencia P_m por unidad de volumen está dada por:

$$P_m = P_h + P_F = 10^{-5} f K' K'' (\text{área del lazo}) + \frac{\pi^2 f^2 T^2 B_{m\text{max}}^2}{6\rho} \quad (3.50)$$

donde los símbolos tienen el significado que se les dió anteriormente. Si el material del núcleo es tal que la pérdida por histéresis cumple con la relación empírica dada por la ecuación (3.34), esta pérdida podrá escribirse en la forma:

$$P_m = \eta f B_{m\text{max}}^n + \frac{\pi^2 f^2 T^2 B_{m\text{max}}^2}{6\rho} \quad (3.51)$$

Si la inducción magnética media es la misma en todo el volumen V del núcleo, la pérdida total P_m en este volumen será:

$$P_m = V p_m \quad (3.52)$$

Los dispositivos en los cuales existen materiales ferromagnéticos que transportan flujos alternos tienen casi siempre asociados circuitos eléctricos que abrazan a los circuitos magnéticos.

Los transformadores y las bobinas con núcleo de hierro, por ejemplo, tienen núcleos laminados o de polvo prensado en torno a los cuales están devanadas las espiras de una o más bobinas.

Las pérdidas en el núcleo están relacionadas con la fuerza electromotriz inducida en dicha bobina por el flujo variable.

Como se analizó en el capítulo anterior, el flujo máximo Φ_{max} en función del valor eficaz de la fuerza contraelectromotriz E inducida en una bobina de N espiras viene dada por:

$$\Phi_{max} = \frac{E}{4.44 f N}$$

cuando el flujo y por tanto la fuerza electromotriz, varían sinusoidalmente. Si la inducción magnética es uniforme en toda la sección recta del área A del núcleo:

$$B_{max} = \frac{\Phi_{max}}{A} = \frac{E}{4.44 f N A}$$

Para una bobina o transformador dado, el número de espiras y el área de la sección recta del núcleo vienen fijados por el diseño, entonces se tiene:

$$B_{max} = K \frac{E}{f} \quad (3.53)$$

la cual sustituyendo en (3.50), da

$$P_m = \eta f \left(\frac{K E}{f} \right)^n + \frac{\pi^2 f^2 T^2 K^2 E^2}{6 \rho f^2}$$

$$P_m = K_1 \frac{E^n}{f^{n-1}} + K_2 E^2 \quad (3.54)$$

La ecuación (3.54) sólo es aplicable cuando la forma de onda sea sinusoidal. Aún cuando la pérdida por histéresis depende de la inducción magnética máxima y no de la forma de onda del flujo mientras el ciclo de histéresis sea simétrico y sin lazos, la relación entre el valor máximo de la inducción magnética y el valor eficaz de la fuerza electromotriz generada sí depende de la forma de onda. Luego, cuando se expresa en función de la fuerza electromotriz eficaz, la pérdida por histéresis vendrá dada correctamente por el primer término del segundo miembro de la ecuación (3.54) solamente cuando la forma de onda sea sinusoidal.

En contraste, el segundo término de la expresión para las pérdidas en el núcleo, (ecuación 3.54), da la pérdida correcta por corriente de Foucault, independientemente de la forma de onda con tal que las frecuencias que intervengan en la onda no sinusoidal no sean suficientemente elevadas para producir un efecto cortical considerable.

D.4). - SEPARACION DE LAS PERDIDAS POR HISTERESIS Y POR CORRIENTES DE FOUCAULT.

Aún cuando la pérdida total en el hierro suele ser cuestión de principal importancia en el diseño de aparatos electromagnéticos de corriente alterna, la reducción de dicha pérdida total sólo puede realizarse cuando se conocen los valores relativos de las componentes correspondientes a la histéresis y a las corrientes de Foucault. Si predomina la componente correspondiente a las corrientes de Foucault y se puede disponer de láminas más delgadas, la utilización de éstas reducirá la pérdida total. En cambio si predomina la pérdida por histéresis, es inútil cambiar el espesor de las láminas. Por tanto, convendrá que el primer pa-

so hacia la reducci3n de la p3rdida total sea disponer de un medio sencillo para determinar la divisi3n de la p3rdida total en el hierro entre ambas componentes .

Toda medida directa de la p3rdida de potencia en el hierro d3 necesariamente la p3rdida total, para la divisi3n en las dos componentes puede determinarse de diversas maneras en las cuales ambas est3n relacionadas con las variables.

Las ecuaciones (3.49) y (3.50) indican que cuando la inducci3n magn3tica es funci3n sinusoidal del tiempo, las componentes de la p3rdida son funciones diferentes de la frecuencia y de la inducci3n magn3tica m3xima. Adem3s, la p3rdida por corrientes de Foucault es funci3n del espesor de la l3mina y de la resistividad; pero, como estas cantidades no pueden variarse en una muestra real de material, no se dispone de ellas como variables. Asimismo, un m3todo simple de separaci3n de las componentes correspondientes a las corrientes de Foucault y a la hist3resis, depende de que esta 3ltima componente var3a linealmente mientras la otra lo hace cuadr3ticamente con la frecuencia.

E).- PROPIEDADES GENERALES DE LAS BOBINAS CON NUCLEO DE HIERRO.

Las p3rdidas totales en una bobina con n3cleo de hierro comprenden la p3rdida I^2R en la resistencia efectiva y las p3rdidas por hist3resis y por corriente de Foucault en el n3cleo.

La resistencia efectiva R en corriente alterna supera a la resistencia en corriente continua del devanado a causa del efecto cortial. Cuando se mide la impedancia de una bobina, la parte real de la impedancia (resistencia aparente) resulta ser mayor que la resistencia efectiva del devanado. Por definici3n, la resistencia aparen

te es igual a la potencia total disipada en la bobina dividida por el cuadrado de la corriente y por tanto - deberá siempre ser mayor que la resistencia efectiva - del devanado siempre que haya pérdida en el núcleo.

Al ir aumentando la frecuencia, las ventajas del núcleo van siendo menos marcadas. El aumento con la - frecuencia de las pérdidas en el núcleo pueden hacer excesiva la resistencia aparente.

Al emplear núcleos de hierro en los transformadores de potencia, la gran autoinducción reduce a un valor razonablemente pequeño, la intensidad de la corriente en vacío o de excitación y lo elevado del coeficiente de acoplo dá origen a una pequeña regulación de tensión en el funcionamiento en carga. Sin embargo, el núcleo de hierro introduce pérdidas en el núcleo que tiene un efecto importante sobre el rendimiento y la elevación de temperatura del transformador.

Cuando solo se excita un devanado de un transformador éste se comporta como una bobina con núcleo de hierro. Es por eso que el estudio de la excitación por corriente alterna en bobinas con núcleo de hierro resulta útil en el análisis del comportamiento de un transformador con núcleo de hierro trabajando en vacío.

Al aumentar la corriente de carga suministrada por un transformador, suelen aumentar las pérdidas por corrientes de Foucault y por histéresis en el núcleo y en partes de la estructura próxima a los devanados, aún cuando no varíe el flujo principal del núcleo. Estas pérdidas a las que se les dá el nombre de pérdidas por cargas parásitas están creadas por el incremento de las fugas de flujo que se producen al incrementar la carga. Dependen más de las intensidades de corriente en los devanados que de la magnitud del flujo principal en el núcleo. Como las pérdidas por cargas parásitas varían -- aproximadamente como los cuadrados de las intensidades de corriente en los devanados, suelen quedar consideradas aproximadamente si se supone que los devanados tie-

nen resistencias a la corriente alterna mayores que las resistencias efectivas debidas al efecto cortical y al efecto de proximidad solamente. En un transformador diseñado adecuadamente las pérdidas por cargas parásitas suelen ser pequeñas y las resistencias efectivas de los devanados son frecuentemente muy poco mayores que sus resistencias a la corriente alterna.

F).- PERDIDAS ELECTRICAS.

F.1).- PERDIDAS POR RESISTENCIA

Cuando un conductor transporta corriente alterna, su resistencia efectiva puede ser apreciablemente mayor que cuando transporta corriente continua estacionaria; es decir, la pérdida calorífica, por amper puede ser apreciablemente mayor en corriente alterna. El aumento de la pérdida se debe a la densidad de corriente no uniforme, ocasionada por el campo magnético variable producido en el interior del conductor por su propia corriente.

Las pérdidas de energía debidas al calentamiento del conductor de los devanados, los cuales estarán constituidos por el de alta tensión que es un conductor largo y delgado, debido al número elevado de vueltas y a la corriente baja que circula por él, deberá tener una resistencia apreciable dada por:

$$R = \frac{L}{A} \rho \quad (3.55)$$

donde ρ es la resistividad del conductor, L su longitud y A el área del mismo

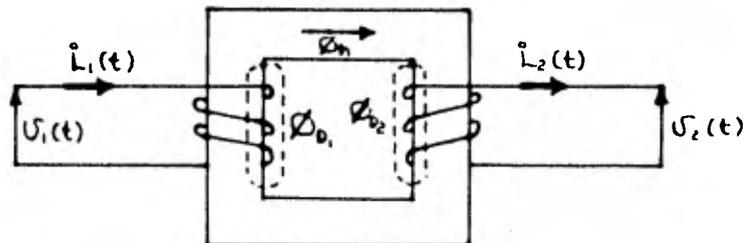


Fig. 3.10

Esta resistencia según el tamaño del transformador puede estar comprendida entre fracciones de ohms y algunas decenas de ohms. El devanado de baja tensión es de menor longitud y más grueso que el de alta tensión, de manera que su resistencia es apreciablemente menor (fig. 3.10).

Por lo tanto para calcular los efectos caloríficos en el conductor debido a la corriente se emplea la siguiente expresión:

$$Q = 0.00024 RI^2 t \quad (3.56)$$

donde:

Q = Cantidad de calor (en kilocalorías)

R = (en ohms)

I = (en amperes)

t = (en segundos)

La combinación de las resistencias y la corriente que circula por ellas, producen el calentamiento en los conductores de acuerdo al efecto Joule, por lo que las pérdidas debido a este efecto se obtienen de acuerdo a:

$$W_c = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 \quad (3.57)$$

donde:

W_c (en watts)

R_1 y R_2 = resistencias del primario y secundario
(en ohms)

I_1 e I_2 = corrientes del primario y secundario
(en amperes).

Estas pérdidas son apreciables en el devanado de alta tensión por su resistencia elevada y en el de baja tensión por su gran corriente.

F.2).- PERDIDAS DE TENSION POR FLUJO DISPERSO.

Aunque el núcleo ferromagnético tiene una permeabilidad elevada, su valor no es lo suficientemente grande para encerrar el 100% del flujo producido por el embobinado primario de manera que algunas líneas magnéticas se cierran a través del aire, es decir por fuera del núcleo. Lo mismo sucede con el flujo de oposición motivado por la corriente del devanado del secundario. Estos flujos actúan como reactancias incluidas en los circuitos (llamadas de dispersión) a través de las cuales hay pérdidas de voltaje, pero no de energía. En casos de un factor de potencia adelantado la pérdida puede ser negativa.

Tomando en cuenta solo la parte izquierda del transformador se tiene:

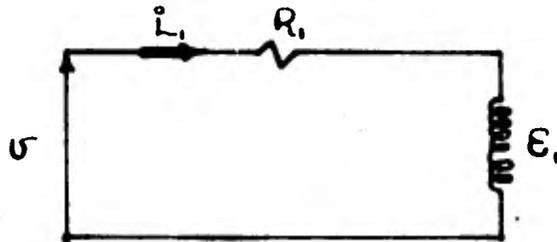


Fig. 3.11

$$U = R_1 I_1 + E_1 \quad (3.58)$$

$$U = R_1 I_1 + N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (3.59)$$

pero:

$$\phi = \phi_n + \phi_{o1} \quad (3.60)$$

Φ_n = flujo en el núcleo.

Φ_d = flujo de dispersión en el primer enbobinado
obteniéndose:

$$U = R_1 \dot{I}_1 + N_1 \frac{d\Phi_d}{dt} + N_1 \frac{d\Phi_n}{dt} \quad (3.61)$$

donde:

$R_1 \dot{I}_1$ = caída de tensión en la resistencia.

$N_1 \frac{d\Phi_d}{dt}$ = caída no aprovechable.

$N_1 \frac{d\Phi_n}{dt}$ = fuerza electromotriz inducida por las condiciones de transformación.

podemos escribir la expresión (3.61), como sigue:

$$U = R_1 \dot{I}_1 + j X_0 \dot{I}_1 + N_1 \frac{d\Phi_n}{dt} \quad (3.62)$$

donde X_0 = reactancia de dispersión.

quedando el transformador de la fig. 3.11 representado por el de la fig. 3.12

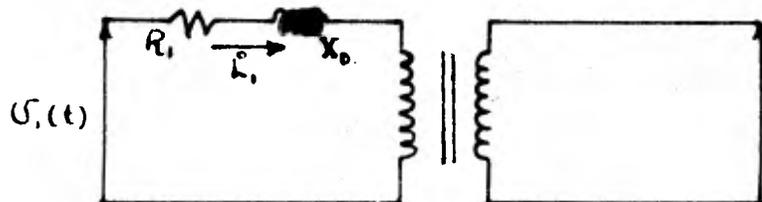
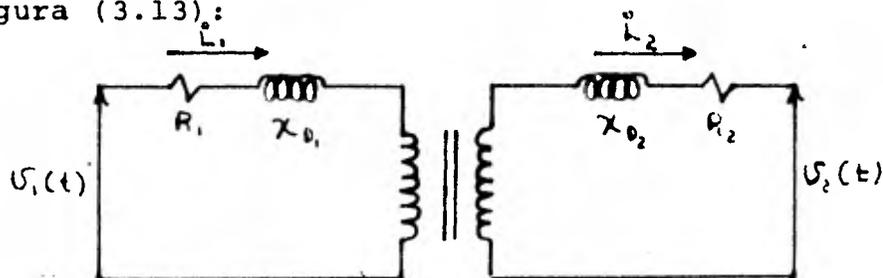


Fig. 3.12

El voltaje que queda después de la resistencia y de la reactancia es el que se va a transformar. De manera semejante, para la parte derecha del transformador sucede lo mismo, por lo que queda como se muestra en la figura (3.13):



$$U_2 \neq U_1$$

Fig. 3.13

G) .- RENDIMIENTO.

El rendimiento de potencia de una máquina cualquiera es, por definición, la razón de la potencia útil de salida a la potencia de entrada, cuando el rendimiento es elevado deberá lograrse mayor precisión si se expresa el rendimiento en función de las pérdidas de potencia; así:

$$\text{Rendimiento} = 1 - \frac{\text{pérdidas}}{\text{salida} + \text{pérdidas}} \quad (3.63)$$

Las pérdidas en un transformador son la pérdida en el núcleo debido al flujo principal en el núcleo, la pérdida en el cobre de sus devanados y las pérdidas parásitas debidas a corrientes de Foucault inducidas por los flujos de fuga en el tanque, sujeciones y partes diversas de la estructura.

G.1) .- PERDIDAS EN EL NUCLEO.

En un transformador cargado, casi todo el flujo mutuo resultante se halla confinado en el núcleo. No obstante, como el camino de retorno de la mayor parte del flujo de fuga está en el núcleo, la inducción magnética verdadera en el núcleo no es exactamente la determinada solamente por el flujo mutuo resultante. Así, pues, el flujo de fuga puede incrementar en ciertas regiones del núcleo a la inducción magnética, mientras la disminuye en otras. Sin embargo, será probablemente muy preciso suponer que, por término medio, la inducción magnética en el núcleo está determinada por el flujo mutuo resultante. Basándose en esto, la pérdida en el núcleo bajo carga es igual a la pérdida en el núcleo en vacío para la misma tensión inducida y frecuencia.

G.2) .- PERDIDAS EN LA CARGA

Las pérdidas debidas a las corrientes que circulan por los devanados son las pérdidas por efecto Joule $I^2 R$ como en corriente continua más las pérdidas adi-

cionales debidas a las corrientes de Foucault inducidas por los flujos de fuga. Cuando estas corrientes de -- Foucault existen en el interior de los propios conductores, dan lugar al efecto cortical. Al producirse en diversas partes estructurales originan las pérdidas parásitas. Como los flujos de fuga que originan estas corrientes de Foucault son proporcionales a las intensidades de las corrientes que circulan por los devanados y como toda pérdida por corrientes de Foucault es proporcional al cuadrado del flujo que las origina, estas pérdidas adicionales son proporcionales a los cuadrados de las intensidades de las corrientes que circulan por los devanados. Podrá interpretarse utilizando resistencias efectivas para corriente alterna mayores que las resistencias a la corriente continua de los devanados. Así, si son R_1 , R_2 las resistencias efectivas a la corriente alterna de los devanados, la combinación de las pérdidas en el cobre y parásitas, conocida como pérdida en la carga es: $I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2$. Como las pérdidas en el cobre de los devanados son las componentes principales de las pérdidas en la carga, y como la pérdida en la carga varía con los cuadrados de las intensidades de las corrientes, como lo hace una verdadera pérdida en el cobre, a la pérdida en la carga se le llama a menudo pérdida en el cobre y puede designarse con el símbolo P_{cu} aún cuando parte de la pérdida en la carga no esté asociada directamente con el cobre. Se observa que se obtiene la misma pérdida cuando se refiere a un mismo devanado las corrientes y las resistencias; así, si la razón de transformación N_1/N_2 es igual a:

$$I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 = I_1^2 R_1 + \left(\frac{I_2}{a}\right)^2 a^2 R_2 = (a I_1)^2 \frac{R_2}{a^2} + I_2^2 R_2 \quad (3.64)$$

CAPITULO IV

ACEITE PARA TRANSFORMADORES

ACEITE PARA TRANSFORMADORES

4.1).- GENERALIDADES Y PROPIEDADES DE LOS ACEITES

Los aceites para usos electrotécnicos deben ser obtenidos por destilación fraccionada del petróleo y oportunamente refinados.

En estado de pureza poseen una elevada rigidez dieléctrica, ofrecen una gran resistencia a alterar se durante el servicio y no modifican sensiblemente la calidad del material aislante que se halle en con tacto con el aceite. Sirven, generalmente, como medio aislante y desempeñan asimismo la función importan tísima de contribuir al enfriamiento como vehículo re- frigerante. En los interruptores, el aceite ayuda a la extinción del arco que se produce en la apertura - del circuito.

Debe tener el aceite una viscosidad que facilite el movimiento convectivo para su eficaz enfriamiento y contribuya en los interruptores al buen funcionamien to de los mismos.

Una característica, de gran importancia de los - aceites destinados a transformadores que deben funcio nar al exterior, es el congelamiento, que ha de tener lugar a la temperatura más baja posible. Los aceites minerales, que son una mezcla de hidrocarburos, no tie nen un punto de congelación bien definido y por ello se ha estimado oportuno considerar la fluidez a baja temperatura, que puede ser valorada por el tiempo que emplea cierta cantidad de aceite enfriado a determina- da temperatura, para recorrer en un tubo en U un espa- cio fijado de antemano con una presión también determi- nada.

La temperatura de inflamabilidad de un aceite, que es la temperatura a la cual emite vapores, los que mezclados con aire arden en presencia de una llama, no es una característica de importancia fundamental, teniendo se en cuenta que si se forma un arco permanente en el aceite, éste podría descomponerse e incendiarse, cualquiera que fuese la temperatura de inflamabilidad.

La aptitud de oponerse a una descarga disruptiva, es otra de las propiedades de los aceites aislantes (rigidez dieléctrica) y que se determina hallando la tensión necesaria para provocar la descarga eléctrica, a través de un cierto espesor de aceite y en determinadas condiciones experimentales. La tensión que produce esta descarga varía en gran manera, según las condiciones en que se haga la prueba, de la forma y dimensiones de los electrodos, etc. La producción de la descarga se facilita con la presencia de materias en suspensión y con la humedad contenida en el aceite.

Las fibras y algunas materias que el aceite contiene en suspensión absorben la humedad y durante la prueba y con la acción del campo eléctrico, se forma una especie de puente entre los electrodos, que puede dar origen a una descarga con una tensión muy inferior a la que correspondería por la efectiva rigidez del aceite.

La influencia de la humedad, sobre la rigidez dieléctrica del aceite es muy grande, aún para una mínima cantidad de aquélla, como se desprende del diagrama de la figura 4.1 y tanto más cuando dicha humedad se encuentra en estado de dispersión coloidal en forma de -pequeñísima subdivisión.

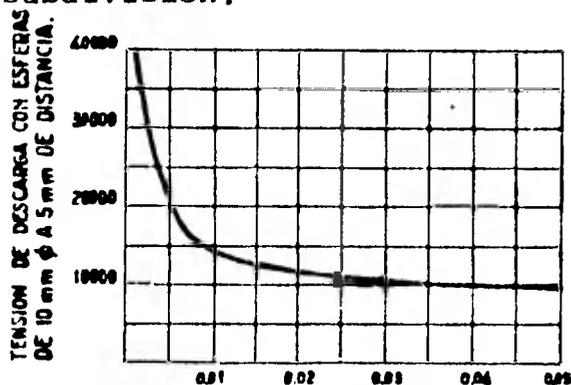


Fig. 4.1

Tensión de descarga en el aceite, en función del contenido en tanto por ciento de agua.

La prueba de la rigidez dieléctrica da, por consiguiente, una idea del estado de pureza del aceite y presta una gran ayuda en la vigilancia cuando se halla en servicio. Su importancia es menor en los aceites nuevos a su recepción, ya que estos poseen una elevada rigidez dieléctrica cuando sale de las refinerías secos y filtrados.

Otra propiedad importante del aceite y fundamental para su buena conservación durante el servicio, es la resistencia que opone a los fenómenos de oxidación y alteración. En los transformadores en servicio, con cualquier clase de aceite mineral, se observa en mayor o menor grado la formación de copos de color amarillo rojizo, que con el tiempo se consolidan en un depósito obscuro y denso (lodo), que obstruye los canales de circulación del aceite, por cuya razón al ser alteradas las condiciones de enfriamiento puede ser causa de calentamientos locales muy peligrosos para la conservación de los aislamientos.

Con la formación de estos depósitos y por la influencia del aire, de la humedad, del calor, de la acción catalítica de los metales y probablemente del campo eléctrico, se verifican, en el aceite procesos de oxidación, condensación y polimerización a consecuencia de los cuales se forman poco a poco compuestos resinosos, ácidos solubles en el aceite caliente, los cuales se transforman a su vez en polímeros de naturaleza asfáltica.

La presencia del aire o del oxígeno, favorece la formación de los depósitos referidos y también el contacto de ciertos materiales, especialmente el cobre, debido a la acción catalítica a que da lugar.

El proceso de la formación de depósitos es muy complejo, siendo la causa de que con el tiempo vaya

aumentando la acidez del aceite y ello, unido al calentamiento experimentado, puede dañar a los aislamientos con los que está en contacto, perjudicando así la conservación de los arrollamientos de los transformadores.

4.2).- METODOS PARA COMPROBAR EL ACEITE.

No se pretende en cuanto sigue, efectuar un análisis cuantitativo completo del aceite; para esto sería preciso disponer de un laboratorio en condiciones adecuadas. Solamente se persigue, la determinación de las diversas características fundamentales del aceite, a fin de comprobar si reúne las condiciones exigidas para el trabajo encomendado.

4.2.1).- COLOR.

Se observa a contraluz el aceite, contenido en un tubo de ensayo de 15 mm. de diámetro interior. El aceite deberá aparecer claro y limpio. Si aparece algo turbio es posible que sea debido a que contiene humedad o parafina. Calentando el tubo aproximadamente a 45°, la impureza debida a la parafina tenderá a desaparecer y aproximadamente a 100°C, la que tenga como origen la humedad.

4.2.2).- IMPUREZAS EN SUSPENSION

Se disuelven 5 gr. de aceite en 100 cm³ de benzol caliente y se filtra la solución con un papel Schleicher and Schull núm. 589 (el tipo de papel de filtro indicado, es fabricación alemana, pero existen en el país papeles similares de fabricación nacional, que pueden sustituir al mencionado), desecando previamente en estufa a 110°C y tarado. El filtrado se efectuará con un embudo calentado previamente. Antes de tomar la cantidad de aceite destinada a la prueba, se deberá agitar energicamente la muestra. Terminado el filtrado y lavado el fil

tro con benzol caliente, se seca dicho filtro en estufa a 110°C , dejándolo enfriar en un desecador de cloruro de calcio. Después se pesa y la diferencia de peso dará el de las impurezas contenidas en suspensión.

4.2.3).- PESO ESPECIFICO

Para esta determinación, se emplea el "pienómetro" (fig. 4.2), constituido por una ampolleta de vidrio provista de tapón esmerilado, la cual lleva una marca que corresponde a su tarado con agua a 15°C . Se llena el -pienómetro de aceite, hasta dicha marca, pesándolo después y tomando nota con el correspondiente termómetro de la temperatura a la que se efectúa el pesado. La diferencia entre los pesos de los recipientes lleno y vacío, dividida por el peso del agua del pienómetro a 15°C da el peso específico del aceite examinado.

Si la temperatura a la cual se ha hecho la determininación es distinta a 15°C , se deberá hacer la corrección con el coeficiente 0.0007 valedero para aceites de peso específico comprendido entre 0.85 y 0.92.

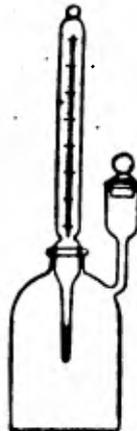


Fig. 4.2

4.2.4).- VISCOSIDAD.

Se emplea el viscosímetro de Engler (Fig. 4.3), constituido por dos calderas metálicas colocadas una denun

tro de la otra. La caldera interna lleva en el fondo un orificio cerrado por una aguja de madera. En la caldera interna se introduce el aceite y la externa sirve para contener el agua necesaria al calentamiento. El aparato está apoyado en un trípode que lleva el dispositivo de calentamiento (un mechero de gas, con corona perforada para la salida de éste). En el trípode se coloca un matraz tarado para 200 cm^3 ; se vierten 240 cm^3 de aceite en la caldera interna y se calienta el baño hasta que, el termómetro inmerso en el aceite señale la temperatura deseada. Después que esta temperatura permanece constante durante algunos minutos, se abre la válvula y se mide con un cuenta segundos el tiempo necesario para llenar el matraz hasta la señal correspondiente a los 200 cm^3 .

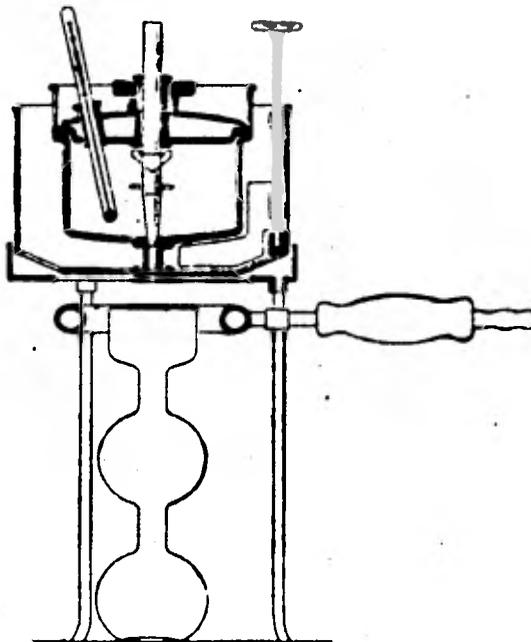


Fig. 4.3

El tiempo empleado por el aceite para pasar al matraz dividido por el necesario para la misma cantidad de agua a 20°C , nos da el grado de viscosidad.

4.2.5).- TEMPERATURA DE INFLAMABILIDAD

Para hallar esta temperatura, se recurre al aparato Pensky-Martens (fig. 4.4). El aceite se calienta en un vaso cerrado, agitando el contenido con un dispositi

vo apropiado . De cuando en cuando, se abre la tapa - que cubre un agujero practicando en la cobertura del citado vaso y se introduce durante dos segundos una - pequeña llama de ignición, cuya longitud no debe ser - superior a 2 ó 3 mm. Hacia al final del ensayo se in - troduce la referida llama en el recipiente por cada - grado de elevación de temperatura. El punto de infla - mabilidad es señalado por un resplandor repentino, - - que se propaga de la pequeña llama de ignición a toda la superficie del aceite.

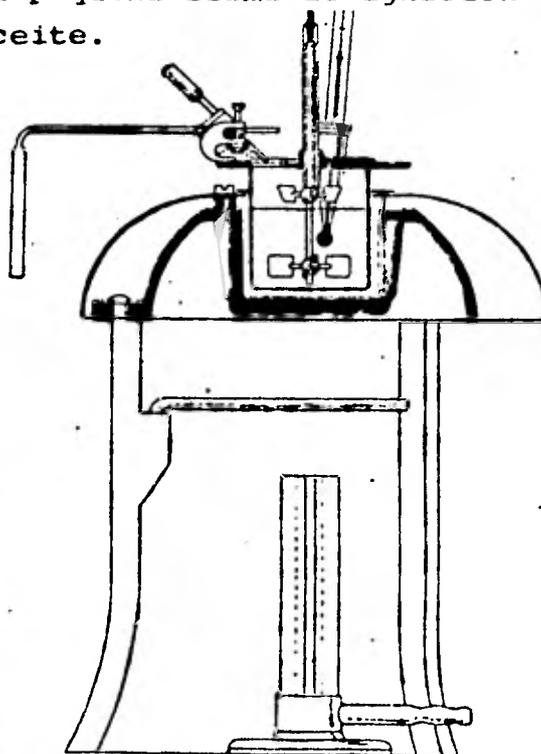


Fig. 4.4

4.2.6).- ACIDEZ INORGANICA.

Se determina mezclando 10 gr. de aceite con 100-
cm³ de agua destilada y calentando la mezcla después
de agitarla convenientemente. Se deja reposar y cuan-
do los dos líquidos se han separado se extraen 30 cm³
de agua en la que se vierten algunas gotas de una so-
lución de naranja de metilo (0.3 gr. de naranja de me-
tilo en 1000 cm³ de agua destilada). En presencia de
ácidos el naranja de metilo se vuelve rojo.

4.2.7).- ALCALINIDAD.

Se determina como en el caso anterior, sólo que en vez del naranja de metilo, se vierten algunas gotas de fenolftaleína (solución alcohólica 1%). En -- presencia del álcali se produce una intensa coloración violácea.

4.2.8).- ACIDEZ ORGANICA.

Se determina como sigue. En una probeta de vidrio neutro graduada de 100 cm³, se vierten 10 gr. - de aceite y 90 cm³ de una mezcla formada de dos partes de benzol y una parte de alcohol etílico al 95%, neutralizado con sosa cáustica decinormal, hasta obtener un color rojo de vino, usando como indicador - algunas gotas de una solución alcohólica de azul alcalino 6B. Se agregan 2 cm³ de la citada solución de azul alcalino, se agita hasta que el aceite se haya disuelto completamente y se titula con una solución decinormal de sosa cáustica hasta obtener la coloración rojo de vino. Se multiplican por 0.282 los centímetros cúbicos de sosa cáustica decinormal empleados y de esta forma se expresa directamente la acidez en tanto por ciento de ácido oleico.

4.2.9).- ASFALTO.

Para la determinación del asfalto contenido en el aceite, se procede como sigue. Se disuelven 2 gr. de aceite en 80 cm³ de bencina normal. Se deja en reposo durante 16 horas, después se filtra empleando - un filtro Schleiche and Schull núm. 589, banda blanca, de 90 mm. de diámetro previamente desecado a 110° y tarado en pesafiltros; se lava con bencina normal hasta que ésta pase por el filtro perfectamente incolora. La parte insoluble desecada a 110°c se considera como asfalto duro.

4.2.10).- RESINA.

Se determina cualitativamente mezclando 10 cm^3 de aceite con 10 cm^3 de alcohol de 70° . Se pasa la mezcla a través de un filtro embebido en alcohol y se calienta en una cápsula de porcelana hasta la evaporación a sequedad. Si existe residuo, tendrá una consistencia y se disolverá en 1 cm^3 de anhídrido acético, agregando después una gota de ácido sulfúrico de 1.35 de peso específico. En presencia de resina, el líquido tomará un color violeta, que al cabo de poco tiempo se oscurecerá.

4.2.11).- AZUFRE.

Para su determinación cuantitativa, se utiliza una plancha de cobre brillante sumergida en aceite a 80 a 90°C , debe permanecer lúcida y limpia después de 20 horas de inmersión.

Para su determinación cuantitativa, se utiliza la bomba Mahler que es empleada asimismo para hallar el poder calorífico de los combustibles.

4.2.12).- CENIZAS.

Se pesan unos 20 gr. de aceite en una cápsula tarada calentada previamente. Se coloca la cápsula en un cartón de amianto provisto de un orificio correspondiente al fondo de la cápsula y se calienta con pequeña llama de modo que, el aceite destile sin inflamarse y sin que rebose por los bordes de la cápsula. Cuando todo el aceite se ha destilado, se calienta con llama fuerte en un triángulo de porcelana hasta que todo el carbón se haya quemado. Si después que se ha destilado el aceite se nota una fuerte cantidad de álcali en las cenizas (lo que se vé fácilmente por un residuo de

fusión característico), se deja enfriar la cápsula antes de calcinar a fuerte llama. El residuo carbonoso se extrae con agua destilada hirviendo. Se pasa la solución a través de un filtro exento de cenizas y se lava. Se deseca la cápsula con el filtro, se incinera y se calcina fuertemente. Después del enfriamiento, se lleva la solución alcali a la cápsula, se deseca a 105°C y continuando la operación hasta que se mantenga la constancia en el peso.

4.2.13).- RIGIDEZ DIELECTRICA.

La rigidez dieléctrica está asociada a la tensión de ruptura dieléctrica del aceite aislante y es una medida de su habilidad para soportar un esfuerzo eléctrico.

Básicamente existen dos métodos para establecer la tensión de ruptura dieléctrica, una por medio de electrodos planos y otra por medio de electrodos semi-esféricos.

En lo referente a la rigidez dieléctrica, cada país ha dictado sus normas publicadas en los reglamentos redactados a este objeto, que si bien son análogos en principio, difieren en lo que concierne a la forma, dimensiones y separación de los electrodos. Hay tendencia a emplear pequeña separación entre éstos, para que las instalaciones de alta tensión no sean muy costosas.

A continuación se describen los datos pertinentes a esta cuestión y relativos a diversos países:

FRANCIA.- Esferas de latón de 12.5 mm. de diámetro, separadas 5 mm.

INGLATERRA.- Esferas de latón o bronce fosforoso de 12.7 mm.

ITALIA.- Esferas de 10 mm. de diámetro, separadas 5 mm.

E.U.A.- Esferas de 12.7 mm. de diámetro y una separación de 5.08 mm.

HOLANDA.- Discos de 12.5 mm. de diámetro, separados 5 mm.

ALEMANIA.- Casquete esférico de cobre de 25 mm. de radio. Los bordes de este casquete están redondeados, la altura es de 13 mm. y su diámetro de 36 mm.

BELGICA.- Esferas de 10 mm. de diámetro, con separación de 2 mm.

MEXICO.- Discos de bronce pulido de 2.54 cm. de diámetro y cuando menos 0.32 cm. de espesor con arista a 90° y separación de 2.54 ± 0.01 mm.

Diversas experiencias han demostrado cierta superioridad de los electrodos esféricos sobre otras formas de éstos. Dan cifras más constantes en los ensayos, en el supuesto de que existe igualdad en las demás condiciones y las líneas de fuerza constituyentes del campo electrostático se distribuyen conforme a la figura 4.5, dando a éste, un valor uniforme como en el caso analizado, la distancia entre las superficies de los electrodos es menor que el diámetro de los mismos.

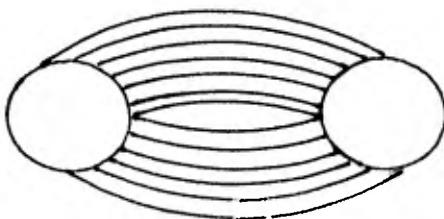


Fig. 4.5

Líneas de fuerza del campo electrostático entre dos esferas.

En los ensayos que se efectúen y para obtener resultados sensiblemente iguales, es necesario proceder a una temperatura igual en todos ellos, porque ésta tiene influencia sobre la rigidez dieléctrica, en la forma que se desprende del diagrama de la figura 4.6:

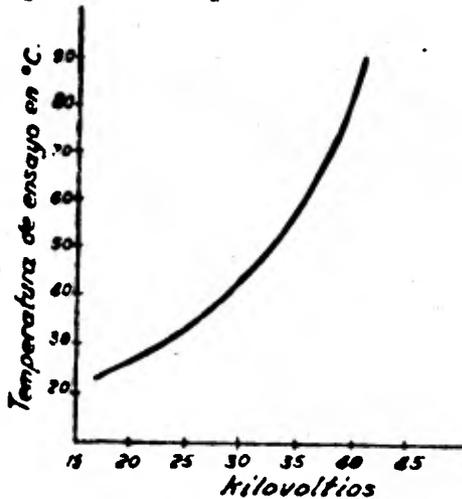


Fig. 4.6

Fig. 6.3. — Rigidez dieléctrica del aceite en relación con la temperatura del ensayo.

La rigidez dieléctrica del aceite se expresa también, por el número de KV que soporta (sin descarga), con una distancia entre electrodos de 1 cm., es decir, viene dada en Kv/cm.

Conocida la rigidez dieléctrica acusada por el aparato de prueba (electrodos), es fácil referir el resultado obtenido a KV/cm. Para ello se emplea la fórmula de Baur, aplicable a toda clase de aislantes, que es:

$$\frac{V}{\delta} = \frac{C}{\sqrt[3]{\delta}}$$

donde:

V = voltaje aplicado en KV

δ = espesor del aislante en mm.

C = constante, variable con la naturaleza de los aislantes.

Si se prescribe que el aceite ensayado debe resistir una tensión de 30 000 volts con electrodos separados a la distancia de 5 mm., de la fórmula anterior se deducirá el valor de C, ésto es:

$$C = \frac{V \sqrt[3]{\delta}}{\delta} = \frac{30 \sqrt[3]{5}}{5} = 10.26$$

por consiguiente para $\delta = 1 \text{ cm} = 10 \text{ mm}$

tendremos:

$$V = \frac{C \delta}{\sqrt[3]{\delta}} = \frac{10.26(10)}{\sqrt[3]{10}} = 47.7 \text{ KV}$$

es decir, la rigidez dieléctrica del aceite considerado será de 47.7 kv/cm.

4.2.14). - TENDENCIA A LA GASIFICACION.

Los aceites con un contenido adecuado de ciertos componentes de aromáticos (carbonos), al ser sometidos a un campo eléctrico tienen la cualidad de reabsorber el gas eventualmente formado, mientras -- que los aceites con un contenido menor de dichos aromáticos, se caracterizan por una emisión continua de gas. Esta cualidad se vuelve crítica tratándose de equipos herméticos, como en el caso de los transformadores de potencia.

Para conocer la cantidad de gases emitidos y absorbidos y poder establecer la tendencia a la gasificación de los aceites aislantes eléctricos, cuando éstos están sometidos a la ionización producida por un campo eléctrico se puede recurrir al método que a continuación se describe.

1.- Descripción del equipo utilizado:

- a) Celda "Siemens-Pirelli".- Es una celda de vidrio resistente al fuego, que consta básicamente de dos cilindros concéntricos de vidrio entre los cuales, se coloca el aceite a probar. El cilindro interior se llena con agua a 80°C y el exterior debe tener colocada una armadura metálica en la parte exterior. Esta se conecta a un polo del elevador de tensión y el regreso se realiza por medio del agua del recipiente interior, que está puesto a tierra.
- b) Elevador de tensión de 10 kv a 400 Hz, control de tensión y sistema de protección.
- c) Termómetro.- Un termómetro de alcohol para sumergir en el agua de la celda y controlar su calentamiento así como el aceite.
- d) Manómetro.- Un manómetro diferencial con escala - 40 a + 40 o similar.
- e) Válvulas.- Una válvula V_2 por donde se introduce el aceite y otra V_2 que es la conexión del manómetro.
- f) Control de temperatura.- Un baño de agua circulante con control de temperatura a $80 \pm 1^{\circ}\text{C}$.
- g) Bomba de vacío capaz de proporcionar una presión absoluta de 1 mm. de Hg. y que cuente con indicador de presión.

El volumen del aceite debe ser tal que llegue justamente al nivel AB de la figura 4.7. El volumen de aire por encima del aceite, se mide desde el nivel cero del manómetro.

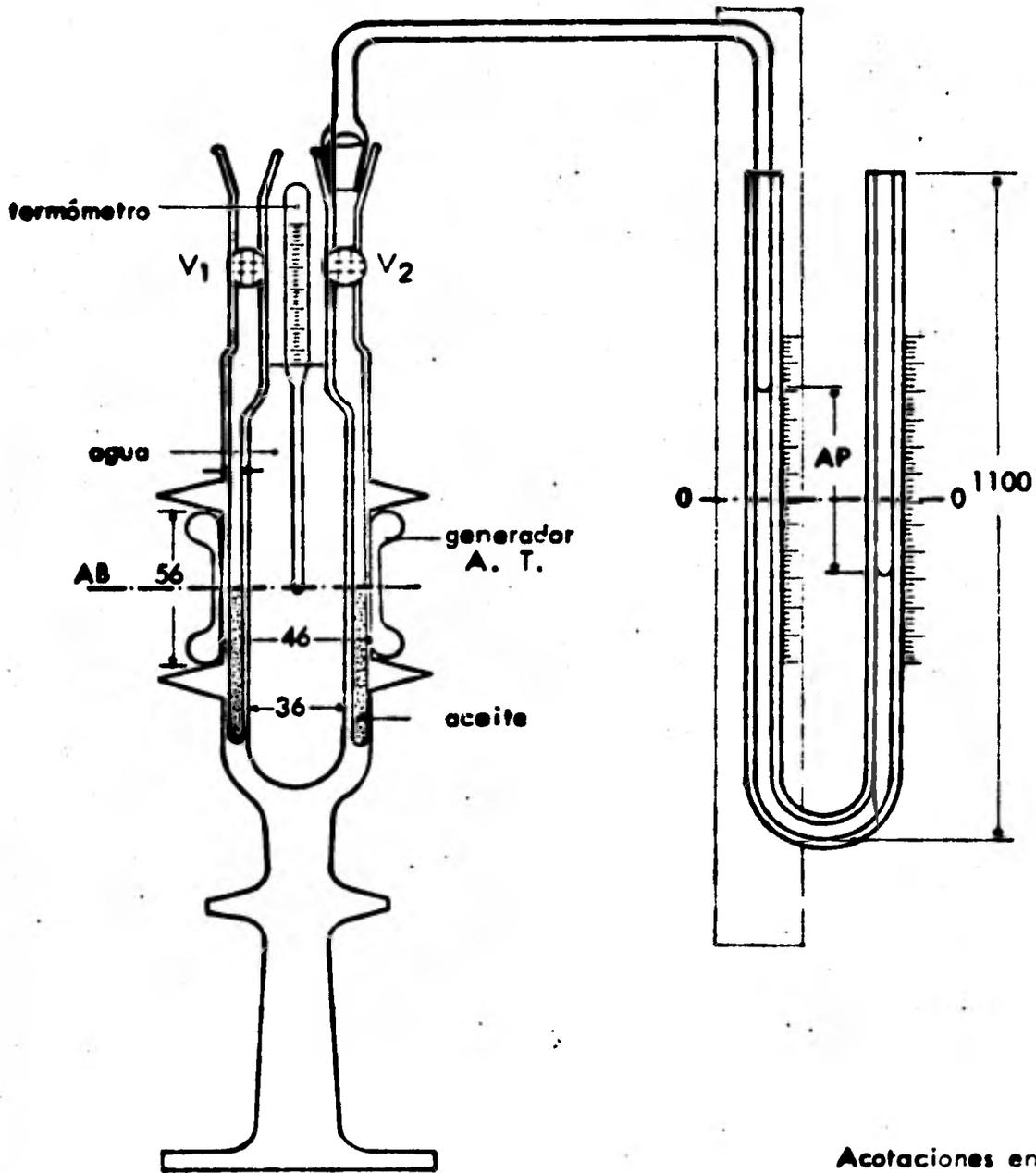


Fig. 4.7

El volumen de la muestra varía según la celda - - que se use, de tal manera que la relación entre el vo - lumen de aire encima del aceite y el de la muestra - - sea constante.

A continuación se mencionan los pasos a seguir - para desarrollar este experimento:

- a) Se limpia la celda con metanol, tetracloruro de carbono o mezcla crómica, para eliminar -- cualquier depósito que se hubiere formado por pruebas anteriores.
- b) Se seca la celda.
- c) Se fijan los tubos para circulación de agua - con el tapón de hule y se revisa el nivel de agua del baño termostático, se coloca el si - fón, el termómetro y la manguera para circula - ción de agua, de tal manera que la alimenta - ción quede conectada al tubo de vidrio más -- corto centro de la celda y la de retorno al - tubo más largo de la misma.
- d) Se introduce la muestra de aceite por la vál - vula V_1 . Este aceite debe introducirse sin - ningún tratamiento.
- e) Se hace un vacío por V_1 de por lo menos 1 mm. de Hg. durante 30 m. en la celda a temperatu - ra ambiente. Mientras se efectúa el vacío de - be permanecer cerrada la válvula V_2 y el manó - metro de aceite desconectado.
- f) Se rompe el vacío admitiendo aire seco a tem - peratura ambiente por V_1 , ésto se logra ha - - ciendo pasar el aire por un cartucho de gel - de sílice.
- g) Se hace funcionar la bomba de circulación de - agua.

- h) Se cierra V_1 , se conecta al manómetro y se --- abre V_2 . Se ajusta el manómetro a cero abriendo V_1 y logrando ésto se cierra.
- i) Se aplica una tensión a los electrodos de 8500 volts a 400 Hz., protegiendo debidamente al -- operador.
- j) Se deja durante 6 horas anotando las variaciones de presión y graficándose, en un par de -- ejes, presión contra tiempo asignándose signo positivo a las depresiones y signo negativo a los incrementos de presión.

2.- Interpretación de la Gráfica.

La pendiente de la curva de gasificación obtenida entre las horas 5a. y 6a., dá la indicación de la tendencia del aceite como sigue:

Para pendientes positivas, el aceite tiende a no-gasificarse, por lo que se considera que tiene un contenido apropiado de aromáticos deseables (por ejemplo curva A figura 4.8).

Para pendientes nulas, el aceite tiende a gasificarse quedando neutralizado por su propiedad de - absorción, denominándolo, aceite neutro (por ejemplo curva B, figura 4.8).

Para pendientes negativas, la tendencia del aceite es a gasificar y se considera que tiene un contenido pobre de aromáticos deseables (por ejemplo curva figura 4.8).

GRAFICA DE LA PRUEBA DE GASIFICACION DE ACEITES

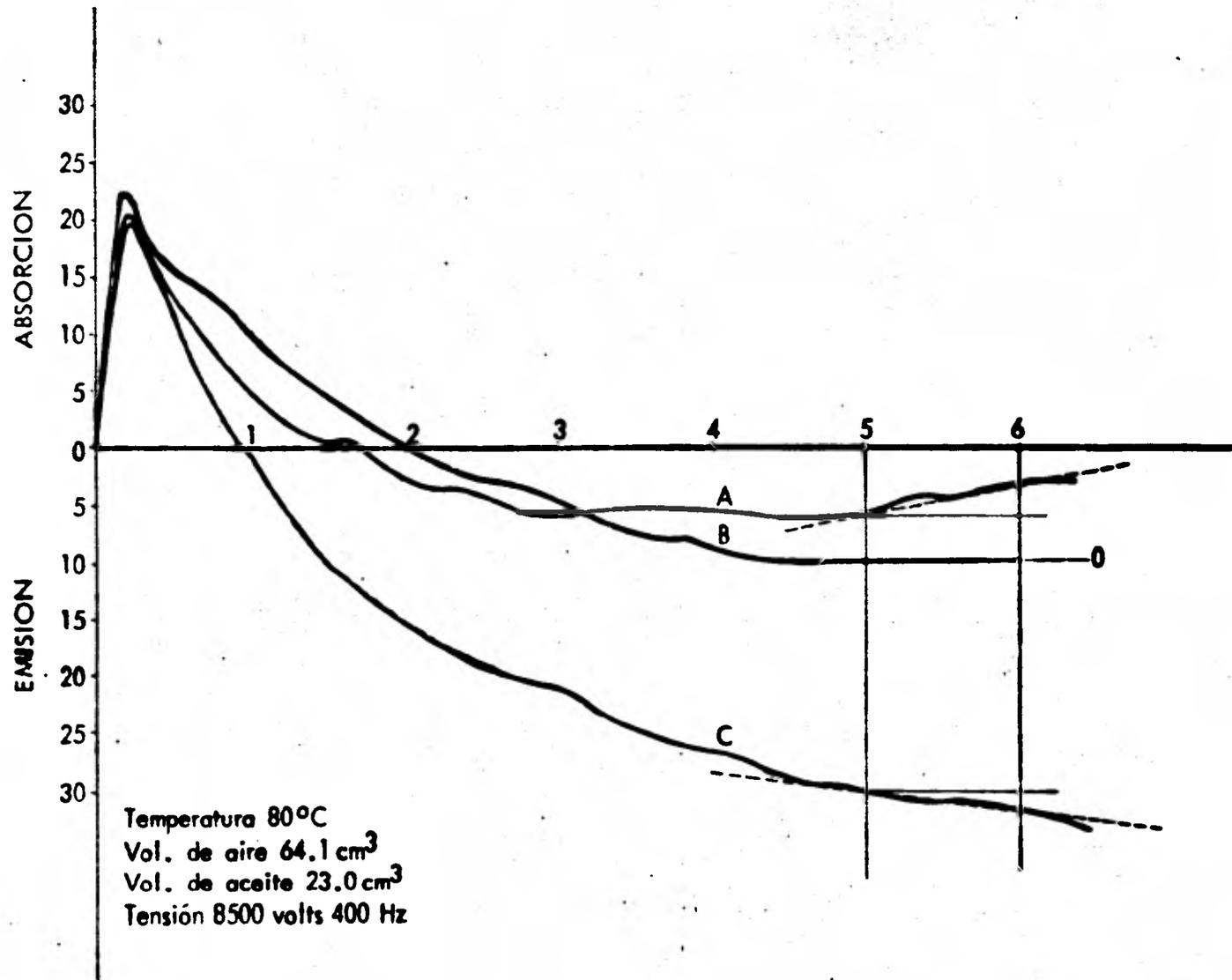


Fig. 4.8

C A P I T U L O V

PROTECCION DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

5.1).- GENERALIDADES

Los transformadores de potencia, como se ha mencionado anteriormente, son uno de los más importantes enlaces en un sistema de potencia; su construcción relativamente sencilla los convierte en unidades altamente integrales y seguras. Esta integridad sin embargo, depende de un diseño adecuado, de una cuidadosa instalación, de un mantenimiento correcto y de la confiabilidad en la previsión de cierto equipo de protección.

El diseño adecuado, incluye el aislamiento de los bobinados, laminaciones, núcleos, etc., fijación de los conductores contra esfuerzos de corto circuito y buenas conexiones eléctricas.

La instalación implica un cuidado especial para evitar daños físicos, dejar dentro del tanque objetos extraños (herramientas, tuercas, etc.), tener la seguridad de que el aceite está limpio y seco, efectuar buenas conexiones, etc.

El mantenimiento, como se verá más adelante, incluye un chequeo del aceite y de la temperatura en los bobinados, -- inspección del nivel de aislamiento del aceite y análisis de gases que se pueden acumular en la parte superior del tanque.

El equipo de protección, que será objeto de estudio en este capítulo incluye relevadores de gas y eléctricos, Los relevadores de gas son particularmente importantes puesto que dan un aviso anticipado al iniciarse una falla, permitiendo efectuar -- una interrupción y reparar el daño antes de que sea de mayores consecuencias.

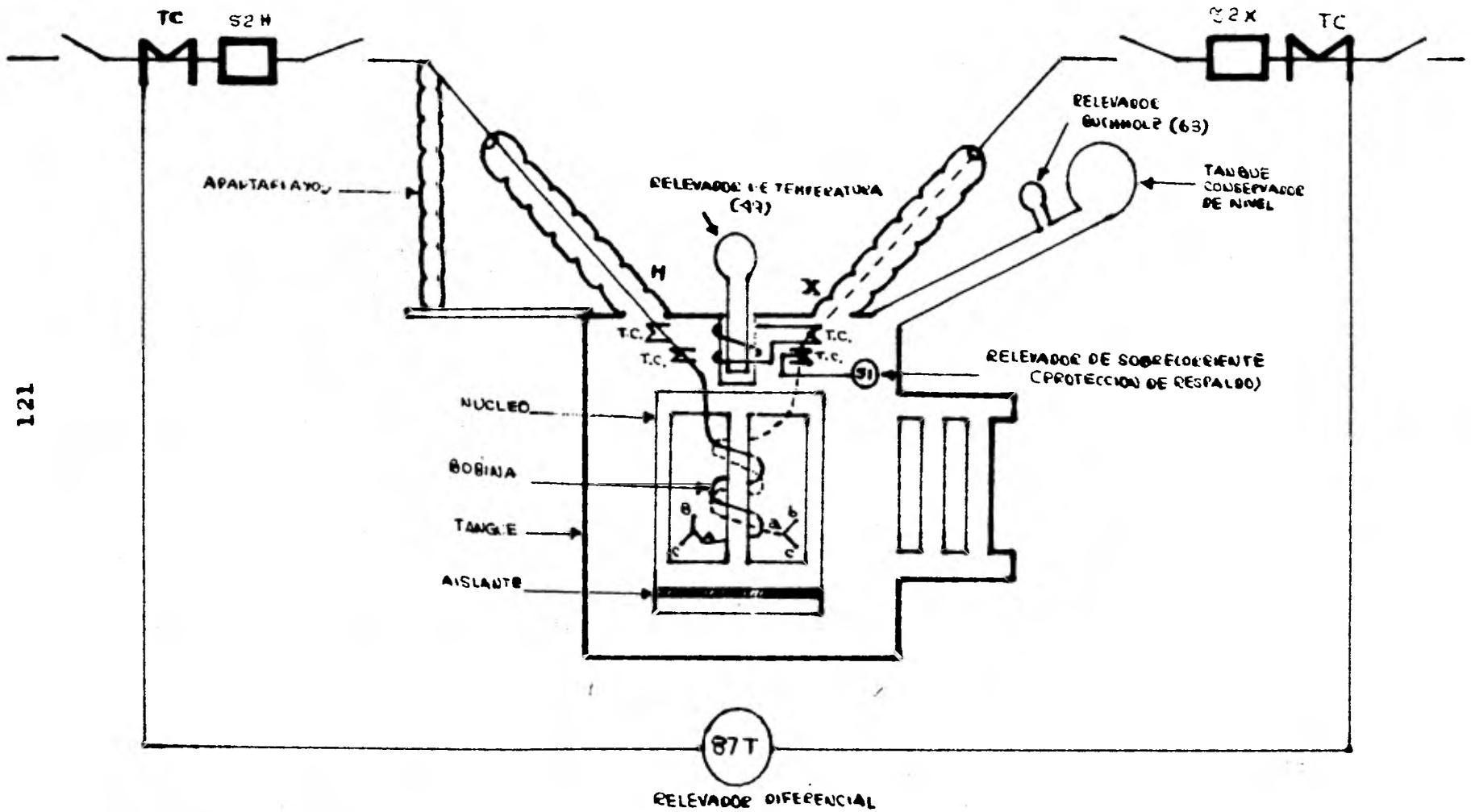
5.2).- DESCRIPCION GENERAL DE LAS PROTECCIONES DE UN TRANSFORMADOR

Los transformadores de potencia se encuentran expuestos a dos tipos de fallas: fallas internas, que incluyen todas aquellas que se producen dentro del tanque y fallas externas, que incluyen aquellas que se producen en las boquillas terminales. Las fallas internas son muy graves y hay siempre el riesgo de incendio, aquí las clasificamos en dos grupos:

- 1.- Fallas eléctricas que causan inmediatamente graves daños, pero son, generalmente detectables por desbalanceo de corrientes o voltajes como:
 - a) Falla de fase a tierra o de fase a fase en los embobinados de alta y baja.
 - b) Falla de fase a tierra o de fase a fase en las terminales externas de alta y baja.
 - c) Cortocircuito entre espiras de los embobinados de alta y baja.
 - d) Falla a tierra de un embobinado terciario.

- 2.- Fallas eléctricas que son en un principio insignificantes, pero que causen lentamente el desarrollo de daños considerables. Estas no son detectables en las terminales de los embobinados por desbalanceo, y en ellas se pueden incluir:
 - a) Una mala conexión eléctrica de conductores o una falla del núcleo debida a una avería en el aislamiento de la laminación causando arcos bajo el aceite.
 - b) Fallas en el enfriador, producen una elevación de temperatura bajo operación de carga completa.
 - c) Relacionada con el inciso b), hay la posibilidad de bajo contenido de aceite u obstrucción en el flujo de aceite -- que puede originar el calentamiento local de los embobina-

Fig. 5.1 Corte transversal de un transformador trifásico mostrando sus protecciones más importantes.



121

Después de haber descrito en forma general los tipos de protección del transformador, nos enfocaremos a continuación a -- analizar cada una de ellas.

5.3).- PARARRAYOS

A los aparatos cuyo objeto era limitar la amplitud de las sobretensiones y que fueron empleados desde que se iniciaron las instalaciones eléctricas, se les denominó pararrayos, y con este nombre son conocidos comúnmente; pero los dispositivos empleados respondían a un criterio empírico, por la imposibilidad entonces existente de estudiar a fondo el funcionamiento de los mismos.

Algunas centrales eléctricas conservan como en museo todos los aparatos que fueron instalando con este objeto y que iban sustituyendo sucesivamente, por creer que el más reciente era el mejor. A principios de siglo se utilizaban aparatos de rodillos, de cuernos, un tipo llamado "Gola", los de funcionamiento por medio de óxido de aluminio, válvulas "Giles", condensadores, etc., ninguno de los cuales respondía al fin propuesto por no reunir -- las condiciones que reclamaba la eficacia de su funcionamiento.

Los pararrayos deben estar conectados permanentemente a las líneas, pero han de entrar en funcionamiento únicamente cuando la tensión alcance un valor conveniente y superior, como es natural, a la de servicio. Esto se consigue por medio de un explorador, uno de cuyos electrodos está conectado a la línea y el otro puesto a tierra, en el que salta la chispa cuando la sobretensión alcanza el valor requerido y para la cual debe ser graduado el explorador. Por el arco producido se conducirá a tierra la onda móvil de corriente origen de la sobretensión, pero en esta forma sería permanente la derivación de la corriente de la línea aunque la sobretensión hubiera desaparecido. Para evitar este grave inconveniente, pueden emplearse tres procedimientos:

- a) Aumentar la separación entre electrodos, con objeto de que cuando el arco quede alimentado por la sola corriente de ejercicio, esto es, cuando haya cesado la sobretensión que lo excitó, el explosor no pueda mantenerse por lo insuficiente de la tensión, pero si la separación entre electrodos ha aumentado, el descargador entrará en función solamente para una tensión de amplitud mayor que la que corresponde a menor intervalo y quedará insensible para sobretensiones de menor amplitud, es decir, se hallará falto de la sensibilidad necesaria.
- b) Otro procedimiento consiste en intercalar una resistencia desprovista de autoinducción para que presente también admitancia a las perturbaciones oscilantes, de suficiente valor para limitar la corriente de ejercicio que sigue al primer momento de la descarga y compatible con la potencia de la instalación, es decir, que no produzca disturbios sensibles en el servicio.

Aumentando la resistencia, se puede disminuir la distancia entre electrodos y obtener así descargadores sensibles, que entrarán en acción con un aumento de tensión reducida en relación con la de servicio. No obstante, esta solución, y tratándose de resistencias de valor permanente, resta eficacia al limitador de sobretensiones.

- c) Otro medio para evitar el circuito a tierra permanente, consiste en interrumpir rápidamente con aparato mecánico o electromagnético la corriente que sigue a la descarga antes de que el cortocircuito se manifieste de manera sensible, lo cual permite emplear resistencias reducidas, y ello sin tener que disminuir la distancia entre los electrodos del explosor, conservando así la sensibilidad necesaria. Pero este medio puede dar origen a sobretensiones de apertura y convertir la protección en un generador de oscilaciones.

Las condiciones que debe satisfacer un pararrayos para realizar su cometido rindiendo la utilidad que se precisa, son pues muy-

variadas, y por ello la solución hallada con los aparatos actualmente empleados, ha requerido estudios minuciosos hasta conseguir que todas ellas pudieran ser cumplidas en el funcionamiento correcto de los pararrayos. La figura 5.3, muestra la forma de conectar un pararrayos sobre la línea que se ha de proteger.

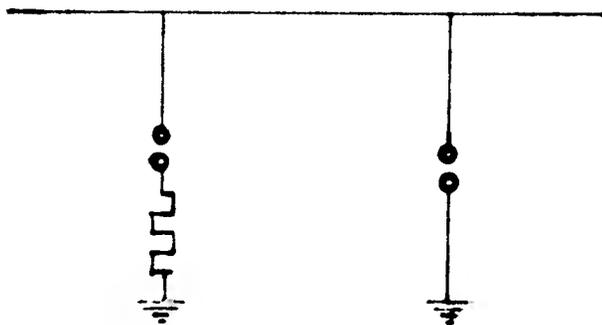


Fig. 5.3.- Esquema de la forma de conectar un pararrayos sobre la línea que se ha de proteger.

El pararrayos sirve para proteger a nuestro transformador contra las sobretensiones resultantes de las descargas atmosféricas.

El pararrayos para su máxima eficacia, debe ser instalado lo más próximo a nuestro transformador. En subestaciones convencionales del tipo abierto, se considera un buen sistema de acorazamiento contra descargas directas, el utilizar hilo de guarda-

que se prolongue hasta una distancia de 600 a 800 mts., fuera de la subestación; si el secundario de nuestra subestación se distribuyó en línea expuesta larga, es también conveniente contar con el acorazamiento antes mencionado.

5.3.1).- GUIA PARA LA SELECCION DE PARARRAYOS.

1.- Pararrayos para circuitos con neutro no aterrizado: Los pararrayos para servicio en circuitos con neutro no aterrizado, son normalmente utilizados cuando el neutro está aislado o está aterrizado a través de un neutralizador de falla a tierra o a través de resistencia o reactancia de alto valor.

Estos pararrayos se conocen también como pararrayos "100 %", pues ellos deben soportar el voltaje nominal de línea a línea cuando hay una falla a tierra o en una fase.

2.- Pararrayos para circuitos con neutro aterrizado: Se dice que un circuito tiene su neutro sólidamente aterrizado a través de una impedancia, cuando se tienen las siguientes relaciones.

$$\frac{X_0}{X_1} \text{ varía de 0 a 3}$$

$$\frac{R_0}{X_1} \text{ varía de 0 a 1}$$

en donde:

X_0 = Reactancia de secuencia cero.

X_1 = Reactancia de secuencia positiva.

R_0 = Resistencia de secuencia cero.

En estos circuitos y bajo cualquier condición de operación, el pararrayos siempre estará permanentemente y sólidamente aterrizado.

5.4).- RELEVADOR BUCHHOLZ

En las averías de los transformadores en baño de aceite se alcanzan temperaturas alrededor de unos 350°C, que causan la descomposición del aceite y de los materiales aislantes dando origen a la formación de gases. Este fenómeno es aprovechado para el desenganche del dispositivo de protección, que aísla al transformador averiado. El estudio e investigación de este principio, fué realizado por M. Buchholz creando un relevador que lleva su nombre. Según la clase de avería, se produce gas en forma lenta, como por ejemplo, por arcos voltáicos de gran energía. El relevador reaccionará al almacenarse en él, suficiente gas haciendo sonar una alarma o encendiendo una luz de aviso, o bien desconectará el transformador si a causa de una falla fluye el aceite aislante hacia el depósito de expansión, con una velocidad mayor a aquella para la cual fué ajustado el elemento de desconexión. El relevador Buchholz vigila, además de lo anterior, el nivel del aceite.

Como se mencionó, las irregularidades en el funcionamiento de los transformadores dan origen a calentamientos locales en los arrollamientos, y consiguientemente a la producción de gases de aceite, cuya cantidad y rapidez en su desarrollo crecen -- sensiblemente a medida que se extienda la avería. Los accidentes producidos en los transformadores dan lugar siempre a la producción de gases o vapores, indicándose a continuación diferentes casos que suelen presentarse en la práctica:

a) En casos de ruptura de una conexión, se produce un arco que se

alarga rápidamente por la fusión de los conductores o que, encabándose seguidamente con otra parte del bobinado, dará lugar a un cortocircuito con todas las consecuencias perjudiciales.- Este arco volatiliza el aceite, y defectos de este género se señalan, por los humos de aceite que se escapan de la cuba o tanque del transformador.

- b) Cuando existe una falta de aislamiento con la masa, se produce un arco entre este punto del bobinado y la cuba u otra parte del cuerpo del transformador, el cual volatiliza el aceite, y fluye a este lugar del bobinado, provocando serias quemaduras. Esta perforación a la masa es a menudo por las sobretensiones.
- c) En caso de cortocircuito o de sobrecarga brusca, se producirá un aumento fuerte de temperatura y principalmente en las capas interiores del arrollamiento. El aceite contenido en las bobinas se volatiliza y descompone rápidamente; los gases resultantes son lanzados bruscamente como por una explosión al exterior de los arrollamientos y en forma de pequeñas burbujas.
- c) A causa de la modificación de las propiedades químicas del aceite que reducen su rigidez dieléctrica, es posible que ciertas partes del arrollamiento estén sometidas a sobretensiones muy altas, y ello da origen a descargas cuya repetición puede dañar seriamente al transformador. Estas descargas descomponen el aceite y provocan la formación de gas.
- e) Si las juntas entre los núcleos y las culatas no están bien establecidas, o si el aislamiento de los bulones que comprimen los paquetes de planchas es defectuoso, pueden producirse corrientes de Foucault intensas. Este accidente provoca igualmente un aumento local de la temperatura, vaporizando el aceite con producción de gases.

Se ve, pues, que en todos los casos señalados hay formación de gases, y éstos son utilizados para accionar el relevador-Buchholz, que debe intercalarse en el tubo que une la cuba del transformador al tanque conservador de aceite, como se muestra en el esquema representado por la figura 5.4.

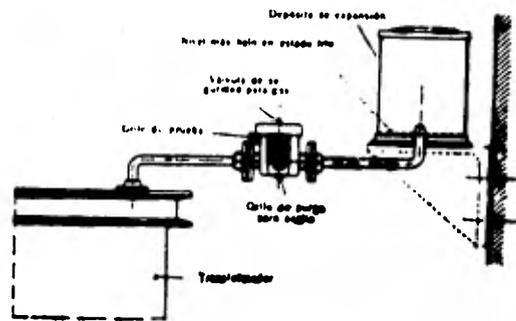


Fig. 5.4.- Disposición de montaje de un relé Buchholz en un transformador de potencia que tiene el tanque conservador - colocado separadamente de la caja.

La disposición esquemática del relé Buchholz aparece en la figura 5.5; la caja a , que esta llena normalmente de aceite, - contiene los flotadores b_1 y b_2 móviles alrededor de sendos ejes-fijos.

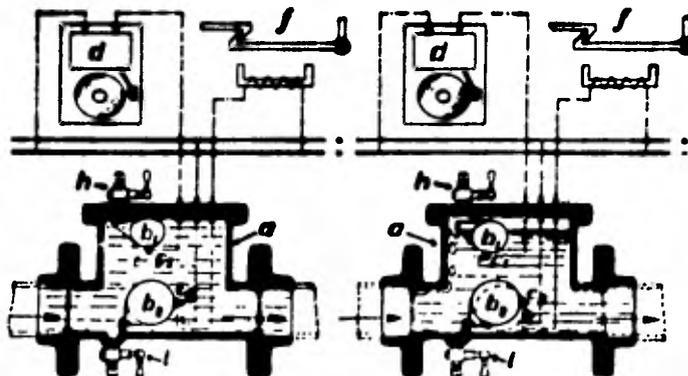


Fig. 5.5.- Esquema de funcionamiento de un relé Buchholz.

Cuando por causa de un defecto poco importante se producen pequeñas burbujas de gas, éstas se elevan en la cuba hacia el conservador de aceite y son captadas por el aparato y almacenadas en la caja, cuyo nivel de aceite baja progresivamente. El flotador superior b_1 se inclina y cuando la cantidad de gas es suficiente, cierra los contactos c_1 que alimentan el circuito de alarma d . Si continúa el desprendimiento de gas, el nivel del aceite en la caja baja más, de forma que los gases pueden alcanzar el conservador de aceite.

Una mirilla que contiene la caja a permite observar la cantidad y color de los gases captados. Del color de los gases se deduce el lugar de la producción del defecto, así: los gases blancos provienen de la destrucción del papel, los gases amarillos se producen con el deterioro de las piezas de madera, y los humos negros o grises son provocados por la descomposición del aceite. El flotador inferior b_2 conserva su posición de reposo si el desprendimiento de gas es lento.

Si el defecto se acentúa, el desprendimiento se hace violento y se producen gruesas burbujas, de modo que el aceite es enviado bruscamente por choque a través del tubo y hacia el conservador de aceite. Esta corriente rodea al flotador b_2 , arrastrándolo, y ello provoca el cierre de sus contactos c_2 que accionan el mecanismo f de desconexión de los interruptores de los lados de alta y baja tensión del transformador, poniendo así a ésta fuera de servicio.

El mismo resultado se obtiene en caso de sobrecarga peligrosa para el transformador. Las numerosas pequeñas burbujas expulsadas de todo el bobinado a causa del calentamiento de los bobinados, actúan como si se tratara de gruesas burbujas a modo de choque, que lanza bruscamente el aceite y arrastra el flotador b_2 . Esta acción es tan rápida que la desconexión se produce antes que el transformador pueda ser averiado por la sobrecarga.

Hay que observar que la aparición de las pequeñas burbujas gaseosas no se manifiesta más que cuando, la temperatura de los bobinajes se eleva de tal modo que el aceite se volatiliza en su interior; dicha temperatura no puede, pues, ser inferior a 150°C , a la cual la volatilización se produce. Ahora bien, esta temperatura puede ser soportada pasajeraamente por los bobinajes sin inconveniente alguno, y a partir de ella el relé Buchholz pondrá el transformador fuera de servicio.

Los contactos c_1 y c_2 son asimismo accionados cuando el nivel del aceite desciende por debajo de un límite determinado, bien por defecto de vigilancia, o por causa de una fisura en la cuba. El aire que se encontrase en el transformador será igualmente captado por el relé y la señal de alarma funcionará. Sobre la tapa del relé van fijados los bornes de contactos, que cuando se trata de instalaciones a la intemperie se protegen por medio de una apropiada cubierta. Un grifo h permite la salida de los gases acumulados en la caja, a los cuales se inflama para apreciar si se trata de gases de aceite o de aire que hubiese penetrado en el transformador. Otro grifo de ensayo i permite comprobar, haciendo funcionar el aparato por medio de una bomba auxiliar, que los contactos, flotadores, conexiones, etc., se hallan en buen estado. Este ensayo debe realizarse terminado su montaje y durante el servicio después de cada vez que haya funcionado el dispositivo. La figura 5.6 muestra un relevador Buchholz de fabricación A.E.G.

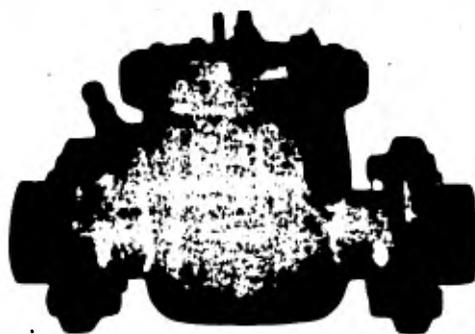


Fig. 5.6.- Vista exterior de un relevador Buchholz.

La figura 5.7 corresponde a la acción de dicho relé, siendo en ella: d_1 y d_2 las bolas de contrapaso, y c los contactos tope de los flotadores.

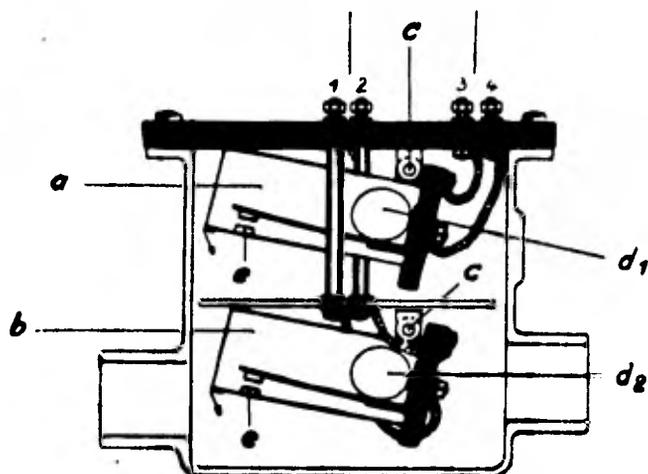


Fig. 5.7.- Disposición interior de un relevador Buchholz.

La figura 5.8 muestra el interior del relé en cuestión. De la propia A.E.G. es el esquema de conexiones de una protección completa Buchholz representado en la figura 5.9.



Fig. 5.8.- Vista interior de un relevador Buchholz.

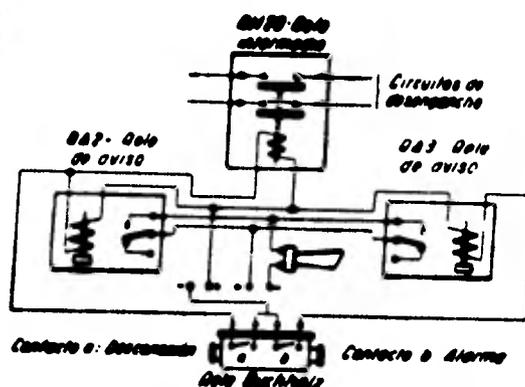


Fig. 5.9.- Esquema de conexiones de una protección completa con relé Buchholz según la casa constructora A.E.G.

El relé RA3, que es de aviso para los flotadores de alarma, va provisto de tres placas de señal y cuyo funcionamiento es - es siguiente: en estado normal ostenta la placa negra; al actuar - el relé Buchholz conecta la bocina y al mismo tiempo presenta la - placa roja. Si se quiere cortar el sonido de la bocina se aprieta - el pulsador del relé RA3 y al mismo tiempo aparece la señal blanca que indica que la señal de alarma subsiste. Cuando, pasado cierto - tiempo, el flotador de alarma abre su contacto, volverá a aparecer la placa negra que corresponde al estado normal es decir, la bocina está preparada para dar la nueva señal de alarma.

Es usual que el interruptor del transformador esté, además, bajo la influencia de otros relés secundarios, y en este caso la desconexión del interruptor puede dar lugar a dudas sobre la -- causa de la misma. Por esta razón, se aconseja colocar el relé RA2 con dos placas de aviso, negra y roja. Cuando actúa el relé Buch--

holz cambia la placa negra (estado normal) por la roja y al mismo tiempo conecta la bocina de alarma, como en su caso realiza el relé RA3, que se desconecta por apropiado pulsador. El relé RA2 no lleva placa blanca.

Si el transformador recibe energía por ambos lados, es preciso colocar el relé RH-20 con dos contactos de trabajo, que es excitado por el relé Buchholz y aquél actúa sobre las bobinas de desganche de los dos interruptores del transformador instalados en el primario y en el secundario.

En la figura 5.4, aparece el tanque conservador de aceite separado de la tapa del transformador, porque se trata de una unidad de gran potencia. En los transformadores de menor capacidad, el conservador va colocado sobre la tapa y el relé Buchholz se monta igualmente en el tubo de unión de la tapa y del conservador, tal como lo indica la figura 5.10.

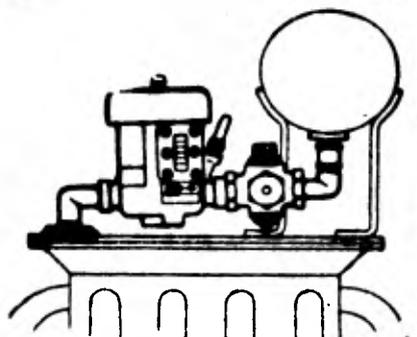


Fig. 5.10.- Dispositivo Buchholz tal como se monta en transformadores de potencias reducidas.

Refiriéndonos ahora a las limitaciones del relé Buchholz diremos que ajustes demasiados sensibles de los contactos de mercurio pueden dar lugar a falsas operaciones con choque o vibraciones causadas por condiciones de temblores de tierra, impactos mecánicos de tuberías, cambiador de toma (taps) y fallas externas demasiado fuertes. Estas condiciones se suman a las vibraciones mecánicas normales causadas por la alternación de los flujos magnéticos. Las dificultades anteriores han sido contrarrestadas en cierta forma con el empleo de bulbos de contacto de mercurio. No se ha llegado a un acuerdo referente a las pruebas de choque para este tipo de relevadores, pero los fabricantes de los relevadores Buchholz chequean sus relevadores hasta comprobar que no operan con choques sísmicos hasta .16 g. de aceleración y 60 mm de amplitud horizontal o vibraciones verticales inferiores a los valores especificados en la tabla siguiente:

Vibraciones máximas permitidas para asegurar estabilidad.

<u>Frecuencia</u>	<u>Amplitud</u>	<u>Aceleración</u>
25 c.p.s.	2.3 mm	3 g.
100 c.p.s.	0.6 mm	12 g.
150 c.p.s.	0.4 mm	16 g.

El tiempo mínimo de operación de un relevador Buchholz es alrededor de 0.1 segundos y un tiempo promedio de 0.2 segundos; que es un poco lento.

5.5.) - PROTECCION DIFERENCIAL

Al empezar esta sección estableceremos el principio fundamental de la protección diferencial, y después la aplicaremos a la protección particular del transformador.

El método de protección diferencial es conocido desde hace mucho tiempo, no obstante, en la protección moderna de siste

mas de potencia es indispensable pues constituye un importante principio de protección. La gran ventaja de esta protección estriba, en el amplio margen de aplicación, pues lo mismo se puede emplear para proteger un alternador, que un transformador, que una línea o un elemento cualquiera del sistema y en todos ellos, opera con el máximo de selectividad y el menor tiempo de desconexión.

El principio de funcionamiento de la protección diferencial se basa en la comparación de las corrientes a ambos lados de la parte de la instalación a proteger. El tramo protegido se limita en cada extremo por transformadores de corriente, cuyas corrientes secundarias son comparadas en magnitud y fase en un relevador diferencial. Cuando la parte de la instalación a proteger, esta exenta de averías, las intensidades primarias que circulan a ambos lados están entre sí, en una determinada relación y las corrientes secundarias deben concordar en magnitud y fase para poder ser comparadas, en caso necesario, ésta concordancia se logra por ejemplo, en el caso de protección de transformadores de potencia por medio de transformadores intermedios, como se explicará más adelante al tratar la protección de transformadores de potencia. En el caso de que el tramo protegido esté exento de averías, la diferencia de intensidades en la parte secundaria es nula y por el relevador diferencial, conectado en la unión transversal de los dos transformadores, no pasa intensidad. En la figura 5.11 se muestra el esquema simplificado de la protección diferencial para el caso de servicio normal.

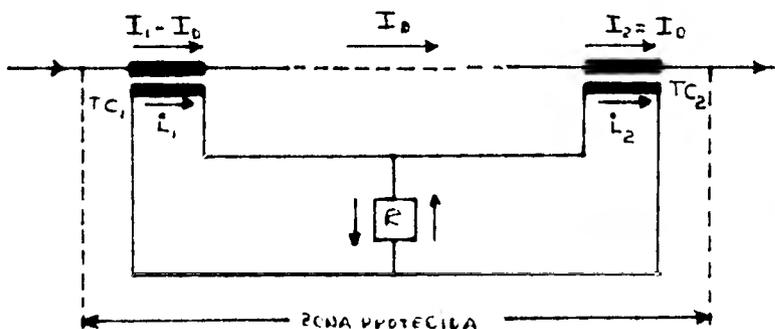


Fig. 5.11.- Protección diferencial para el caso de servicio normal.

Ambos transformadores de corriente TC1 y TC2 modifican las intensidades primarias I_1 e I_2 en las intensidades secundarias i_1 e i_2 . Bajo condiciones normales de operación o de cortocircuito exterior, la relación $I_1 : I_2$ permanece constante. Si se utilizan buenos transformadores de corriente, las intensidades secundarias también son prácticamente iguales entre sí y por consiguiente, la diferencia que recibe el relevador colocado en la diagonal es nula. En un cortocircuito exterior, a la zona protegida, con intensidades de cortocircuito elevadas, se puede presentar una corriente de falla i en el circuito secundario, a pesar de persistir la misma relación entre I_1 e I_2 . Esto se debe a la saturación de alguno de los dos transformadores de corriente, pues más allá del punto de saturación las corrientes secundarias cesan de crecer en proporción a la elevación de la magnitud de las corrientes primarias. Consideramos por ejemplo, que el transformador TC2 se satura, desde ese momento, i_2 permanece aproximadamente constante, mientras que i_1 sigue aumentando, ya que el transformador TC1 aún transforma correctamente, La corriente secundaria i_1 consta por lo tanto, de una parte en igualdad de fase con i y del exceso, que como diferencia $i_1 - i_2 = i_d$ circula por la diagonal.

La corriente en fase se designará como i_f . En el caso de que el transformador TC1 sea el que se satura, las condiciones serán las mismas, excepto que la corriente de balanceamiento i_d será proporcionada por el transformador TC2. Para el presente análisis se supondrá que el transformador TC2 es el saturado. Puesto que lo más probable, es que la corriente de balanceamiento y la corriente circulante no estén en fase, tomaremos un ángulo entre i_f e i_d y lo designaremos ϕ . En la figura 5.12 se muestra el diagrama vectorial de las corrientes de una conexión diferencial suponiendo que i_2 es más pequeña que i_1 pues como dijimos anteriormente el transformador TC2 es el saturado.

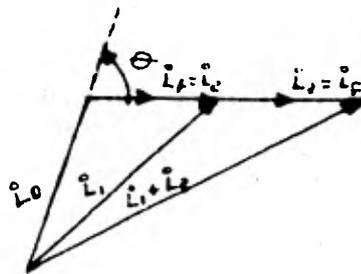


Fig. 5.12.- Diagrama vectorial de las corrientes de una conexión diferencial.

Del diagrama obtenemos que:

$$i_2 = i_f$$

$$i_d = i_1 - i_2$$

$$i_2 = i_f + i_d$$

$$|i_1 + i_2| = |i_d + 2i_f|$$

Para discutir el problema de la estabilización de la - protección diferencial deberá tenerse en cuenta lo siguiente:

1).- Para el caso de fallas externas, la suma geométrica de $i_1 + i_2$ será siempre más grande que la diferencia $i_1 - i_2$. Esta diferencia es la provocada por disturbios o por la saturación de alguno de los transformadores de corriente y es designada por i_d .

$$|i_1 + i_2| > i_1 - i_2$$

$$|i_1 + i_2| > I_d$$

2).- Para el caso de fallas internas, prescindiendo de la corriente de carga, la corriente real de falla I_d será siempre mayor, o por lo menos igual si el circuito es alimentado solamente por un extremo, a la suma de las corrientes secundarias $i_1 + i_2$, es decir:

$$|i_1 + i_2| \leq |i_1 - i_2|$$

$$|i_1 + i_2| \leq I_d$$

Por lo tanto, sólo se necesita comparar entre sí, la suma geométrica de las corrientes secundarias con la diferencia geométrica de las mismas para obtener un criterio definido, que permita determinar si la falla se encuentra dentro o fuera de la zona protegida.

La comparación se efectúa por medio de un relevador del tipo de porcentaje mecánicamente balanceado, que es el más sencillo utilizado para este objeto, y cuya construcción es similar al de una balanza.

En cada brazo cuelga una bobina electromagnética, actuando una de ellas en sentido de bloqueo por la suma geométrica de las corrientes, y la otra, en sentido de disparo, por la diferencia geométrica. Es práctica actual simular el relevador de porcentaje mecánicamente balanceado por medio de un circuito, en el cual las corrientes alternas son primeramente rectificadas y las corrientes directas resultantes, son comparadas eléctricamente por medio de un relevador de corriente continua polarizado, como se muestra en la figura 5.13.

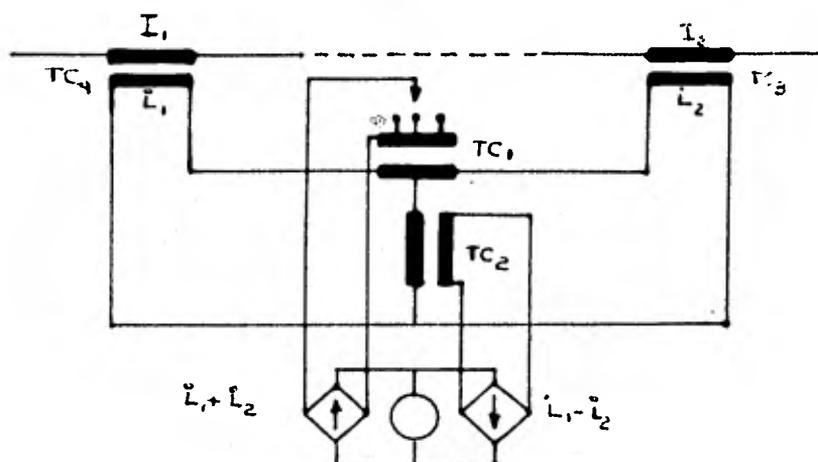


Fig. 5.13.- Simulación del relevador de porcentaje mecánicamente balanceado por medio de un circuito.

En el transformador de corriente TC1 se forma la suma geométrica, mientras que por el TC2, situado en la diagonal de los TC3 y TC4 pasa la diferencia $i_1 - i_2 = id$. Según sea mayor la suma o la diferencia, circulará por el relevador una corriente de diferencia en distinta dirección. Este relevador está también equipado de un resorte o muelle de retención, que permite el ajuste de su sensibilidad determinándose el valor de reacción del mismo. La fuerza de retención es introducida a los cálculos con su valor C. También se introduce en el cálculo el factor de reducción "K", que denota la relación en la cual el efecto de polarización es reducido y en la conexión de la figura 5.13 está representada por los cambiadores de derivaciones.

Hasta el momento hemos descrito el principio fundamental de la protección diferencial. A continuación aplicaremos ésta protección al caso particular de los transformadores de potencia que es nuestro objetivo.

La protección diferencial de transformadores se emplea, como protección contra fallas interiores y exteriores situadas den

tro del margen de protección de los transformadores de corriente. Utilizándose además para detectar ciertas fallas, como por ejemplo, descargas eléctricas en los bornes del transformador que no son detectadas por la protección Buchholz. En general, para decidir sobre la instalación de una protección diferencial, se debe considerar los siguientes puntos de vista: tamaño del transformador a proteger, disponibilidad de transformadores de reserva, - - tiempos de cambio y reparación, conexión del transformador a la red, etc.

Como criterio fundamental para el empleo de la protección diferencial se puede indicar, que para grandes transformadores con una potencia de 8 a 12 MVA siempre se debe prever una protección diferencial. Transformadores medios desde aproximadamente 1 MVA tienen muchas veces protección diferencial, por razón de los puntos de vista antes mencionados.

En especial la protección diferencial se emplea, cuando se conectan transformadores en paralelo, para que en el caso de falla se desconecte selectivamente el transformador averiado, en general para transformadores pequeños no se preve ninguna protección diferencial.

Un relevador diferencial para transformadores, compara las corrientes que entran y salen en la zona protegida por intermedio de transformadores de corriente cuyas relaciones de transformación, son tales que sus corrientes secundarias son iguales en condiciones normales de operación. La figura 5.14, muestra el arreglo esquemático de la protección diferencial para transformadores de potencia. La polaridad de los transformadores de corriente es tal, que la corriente circula normalmente sin pasar a través del relevador durante condiciones de carga normales y fallas externas. La bobina del relevador recibe el vector suma de las corrientes secundarias de los TC'S, la cual es normalmente cero. No obstante, el principio tan sencillo en que se basa la protección-

diferencial para transformadores, presenta en la práctica tres -
desventajas.

La primera está relacionada con las características de los transformadores. En virtud de que los relevadores diferenciales reciben magnitudes de los secundarios de los transformadores de corriente, es necesario, que dichos transformadores reproduzcan exactamente las intensidades primarias, incluso con las intensidades máximas que circulen en el caso de cortocircuitos externos. Esta condición es difícil de conseguir por una serie de dificultades, entre las cuales podemos citar: la dificultad de encontrar dos relevadores con la misma curva de saturación, ya que ésta depende de la calidad de hierro con que se hayan construido -- sus núcleos. Por lo tanto, si se tienen dos transformadores con diferentes curvas de saturación, se presenta el problema de que uno de ellos alcanza la zona de saturación primero que el otro. -- Desde ese momento, deja de transformar la intensidad primaria permaneciendo la secundaria casi constante, mientras que el otro -- transformador sigue transformando correctamente. Esta intensidad circulará por el relevador haciéndolo operar erróneamente.

Lo anterior hay que evitarlo y se logra en la actualidad estabilizando la protección diferencial. Por otro lado, como los TC'S son requeridos en circuitos de diferentes voltajes (alta y baja tensión del transformador protegido), pueden surgir diferencias apreciables en las respectivas corrientes secundarias cada vez que ocurra una falla, aunque esas corrientes tengan valores iguales con cargas normales.

La segunda desventaja está relacionada con los derivados (taps) de los transformadores. Todos los grandes transformadores están provistos de cambiadores de relación para poder operar en vacío y tener posibilidades de cambiar la relación de transformación para operar satisfactoriamente con diferentes exigencias. -- Como la relación del transformador varía al cambiar los taps, la-

relación entre las corrientes del lado primario y secundario de los TC'S pueden estar hechas para un solo punto del rango del cambiador de taps. En otros puntos de desbalance de corrientes circulará en el relevador diferencial.

La tercer desventaja se refiere a la corriente magnetizante. La intensidad de magnetización se presenta como si fuera una averfa, pues al energizarse un transformador la corriente de conexión alcanza valores que son varias veces la corriente del transformador a plena carga y decae muy lentamente. Estas corrientes, circulan sólo en un lado del relevador conectado diferencialmente y tenderá a hacerlo operar si no se prevee una retención. La práctica antigua consistía en desensibilizar los relevadores por un corto tiempo hasta que la corriente magnetizante sobre cada fase decaía suficientemente, prácticas modernas tienden a estabilizar la protección diferencial contra todas estas dificultades.

A continuación se ilustra en la figura 5.14, la representación esquemática de la protección diferencial para transformadores de potencia, y en la figura 5.15, se ilustra la conexión del diferencial a un transformador delta-estrella.

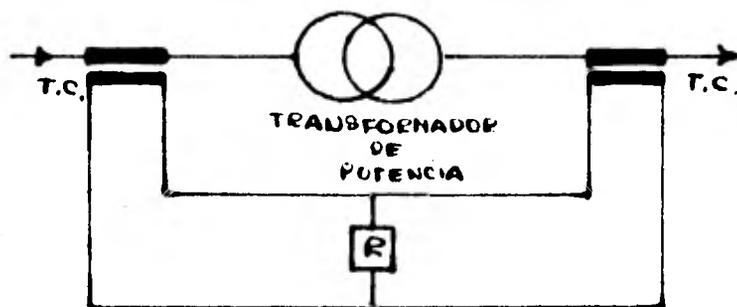
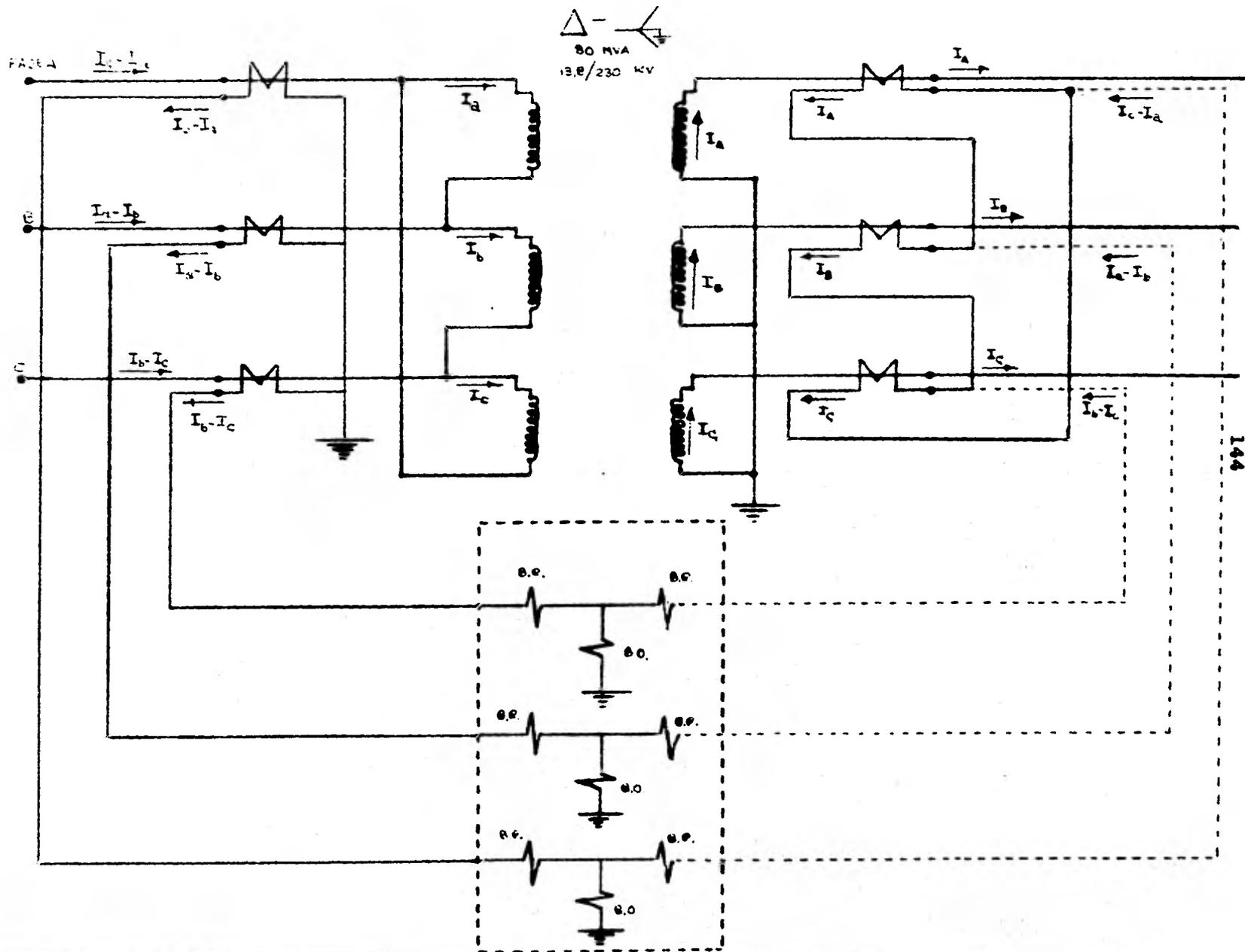


Fig. 5.14.- Representación esquemática de la protección diferencial para transformadores de potencia.

Fig. 5.15 Representación de la conexión de la protección dife
rencial a un transformador delta-estrella.



5.6).- RELEVADOR DE IMAGEN TERMICA

Es sabido que una máquina será más económica cuanto mayor sea el tiempo que funcione sin sufrir averías, y que la vida de la misma está determinada esencialmente por la duración del aislamiento de los conductores.

Ahora bien, la mayor parte de los aislantes se deterioran con más rapidez, si su temperatura sobrepasa constantemente el límite admisible; por ello es necesario evitar los calentamientos nocivos de los conductores. Como la elevación de la temperatura es aproximadamente proporcional al cuadrado de la intensidad de la corriente, se comprende que aún una pequeña sobrecarga puede dar lugar con el tiempo a la producción de averías, y los relés de máxima intensidad, por su forma de trabajo, no protegen eficazmente los transformadores contra las sobrecargas.

Por ello, en las estaciones transformadoras se emplean dispositivos como los de imagen térmica o los relés térmicos, los cuales evitan que las máquinas y los aparatos se hallen sometidos a cargas inadmisibles.

La medida de la temperatura de los arrollamientos puede hacerse por medio del termómetro. Sin embargo, en los transformadores es de suma importancia la medida de la temperatura del cobre, puesto que de ella depende la vida más o menos larga de aquellos.

Con este objeto se emplean elementos de resistencia que pueden ser montados en los arrollamientos y que permiten la medida de la temperatura del cobre. Esta medida se basa en la variación de resistencia de un elemento (Fig. 5.16) inserto en un puente de Wheatstone, en el cual va colocado el instrumento indicador.

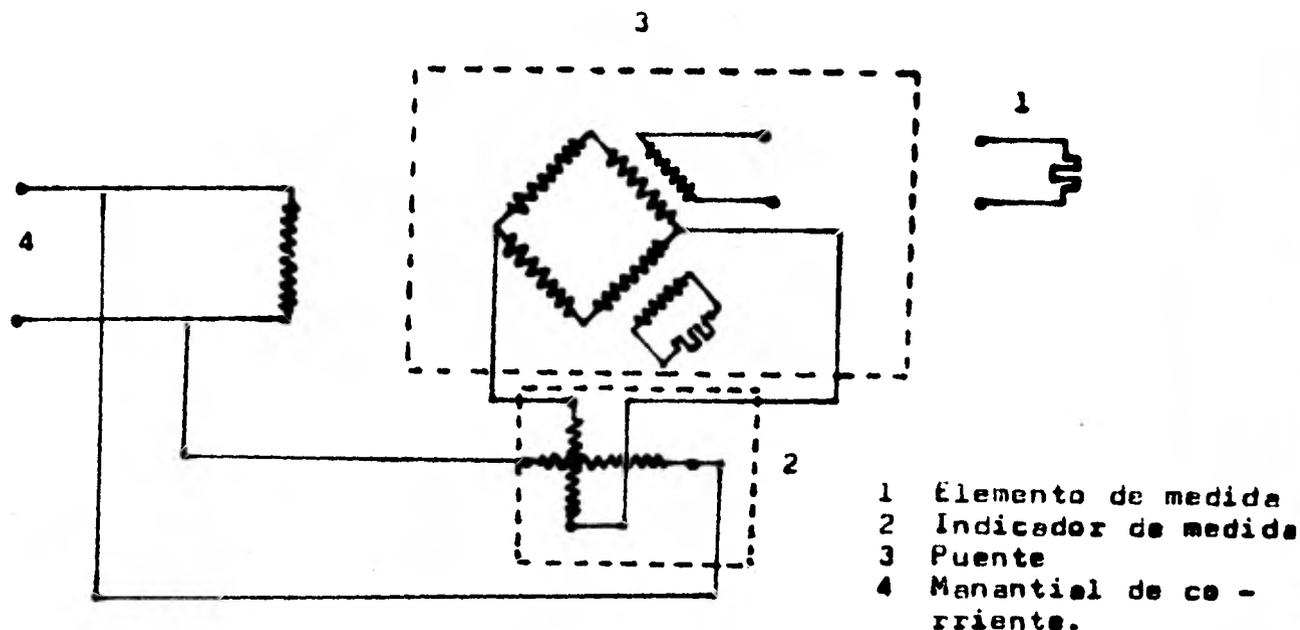


Fig. 5.16.- Elementos de resistencia que se colocan en los conductores de los arrollamientos para determinar la temperatura de éstos.

El elemento se conecta al puente por medio de un transformador de tensión, con lo cual el aparato no recibe el voltaje de servicio. El esquema del principio de este sistema de medida se representa en la figura 5.17, en la cual se muestran los siguientes elementos.

- | | |
|-------------------------|-----------------------------|
| 1.- Elemento de medida. | 2.- Indicador de medida. |
| 3.- Puente. | 4.- Manantial de corriente. |

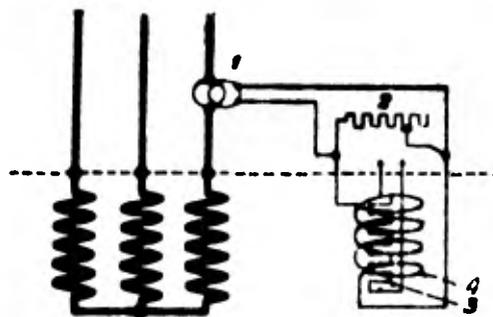


Fig. 5.17.- Esquema del sistema de medida empleado en los elementos de resistencia, para determinar la temperatura de los arrollamientos.

Este método presenta grandes ventajas porque permite alejar a voluntad, el puesto de observación del punto de medida y - - efectuar la determinación de varias resistencias con el mismo aparato.

Presenta, por el contrario, el inconveniente de que el montaje de los elementos en los arrollamientos es difícil, sobre todo a causa de las conexiones que deben atravesar el aislamiento de dichos arrollamientos. El debilitamiento inevitable de este - - aislamiento impide utilizar tal método para las tensiones superiores de 100 KV.

Por esta causa es empleado, en los transformadores de regular capacidad, el dispositivo llamado de imagen térmica, que es en suma un elemento de resistencia con cuerpo de caldeo. Partiendo del hecho de que la temperatura del cobre depende de la que tiene el aceite y de la cantidad de calor producido por las pérdidas, es posible reproducir en imagen las mismas condiciones de temperatura que en el transformador. Para ello es preciso que la resistencia se halle sumergida en el aceite y que el cuerpo de caldeo esté alimentado por una corriente proporcional a la de carga del transformador. La constante de tiempo debe ser la misma que la del transformador, y las constantes de enfriamiento en relación -- con la masa.

El dispositivo de imagen térmica, está constituido en la forma siguiente: Fig. 5.18.

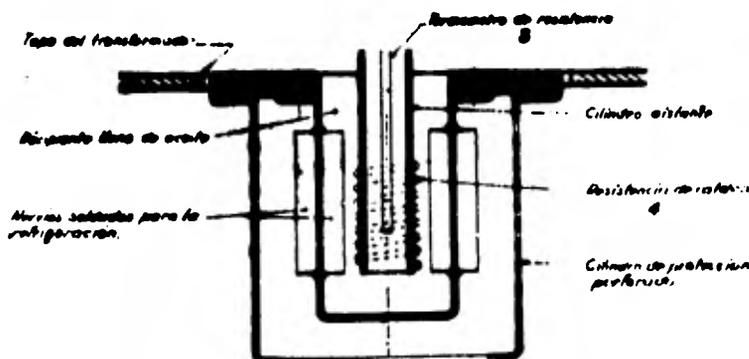


Fig. 5.18.- Esquema del dispositivo de imagen térmica .

El termómetro de resistencia 3 propiamente dicho, se encuentra en la parte del aparato que se halla sumergida en el aceite del transformador y en el interior de un tubo perforado de material aislante. Este tubo sirve de soporte a la resistencia de caldeo 4, que es atravesado por una parte de la corriente secundaria de un transformador de intensidad I , situado en el circuito de alimentación del transformador de potencia protegido. La resistencia de caldeo está alojada, en un recipiente metálico provisto de nervios interiormente y exteriormente que se estancó y llenó también de aceite, va sumergido en el aceite del transformador de potencia. Las partes del aparato que se encuentran abajo de la tapa de aquél y rodeadas de aceite, se protegen con una envolvente cilíndrica de plancha perforada.

En la parte superior del aparato, encima de la tapa del transformador, se coloca una resistencia ajustable 2, conectada en paralelo con la resistencia de caldeo. Los conductores de las resistencias y del termómetro de resistencias se conectan en una placa de bornes.

Una cofia metálica protege esta parte del aparato, contra las gotas de agua y al propio tiempo permite su aireación para refrigerarlo. (Ver fig. 5.19)



Fig. 5.19.- Montura del dispositivo de imagen térmica con la cofia de protección para su colocación en la caja del transformador.

El recipiente metálico puede ser construido con un número de nervios diferente, lo cual permite adaptar la constante de tiempo del termómetro de resistencia a la del bobinado del transformador.

Si no pasara corriente por la resistencia de caldeo, el aceite del recipiente tendría la misma temperatura que el del transformador de potencia; pero esta resistencia se alimenta por un transformador de corriente y es, por lo tanto, recorrida por una intensidad proporcional a la que da el transformador de potencia, resultando de ello un calentamiento del aceite del recipiente que corresponde a la diferencia entre, la temperatura del arrollamiento y la del aceite de la cuba.

El instrumento indicador es de cuadro móvil con escala dividida en grados centígrados. Si las dos constantes de tiempo están bien coordinadas, el instrumento indica de una manera bastante precisa las variaciones de temperatura en el arrollamiento del transformador.

El instrumento puede también ser reemplazado, por un dispositivo metálico, que actúe directamente sobre uno o dos contactos independientes que correspondan a temperaturas regulables.

5.7).- PROTECCION DE RESPALDO

Para cubrir una posibilidad de falla de los relevadores primarios, se prevé una protección de respaldo, cuyos relevadores se arreglan de tal manera que no pueden ser afectados por las mismas causas que pudieran producir fallas de operación en los relevadores primarios. Para considerar una protección de respaldo pueden seguirse dos criterios: es necesario o proveer dos tipos de relevadores con características tales que, los relevadores en un lugar respalden aquéllos en el otro lugar que fallen a la hora de disparar, o duplicar algunos o todos los equipos de -

protección de la localidad. La primer solución (protección de respaldo remota), ha sido usada por muchos años; en sistemas de potencia modernos puede algunas veces ser inefectivo debido al efecto de avance entre el relevador de respaldo y la falla que puede reducir la corriente, y aumentar el voltaje en el relevador de -- tal forma que evitan su operación. La segunda solución (duplicación de relevadores, transformadores de corriente, etc.) implica gastos y complicaciones extras. La mejor solución consiste en tomar primero aquellas precauciones que reduzcan los riesgos de falla a un riesgo calculado muy pequeño, y entonces emplear una protección de respaldo local o remota aplicada a una extensión justificada por la importancia del circuito.

5.7.1).- PROTECCION DE RESPALDO REMOTA

Esta es la forma más barata y simple de respaldo ya que es enteramente independiente del abastecimiento local de energía y es esencial donde no hay protección de barras colectoras. Para ésta forma de protección, se utilizan relevadores de sobrecorriente o de distancia como se muestra en la figura 5.20.

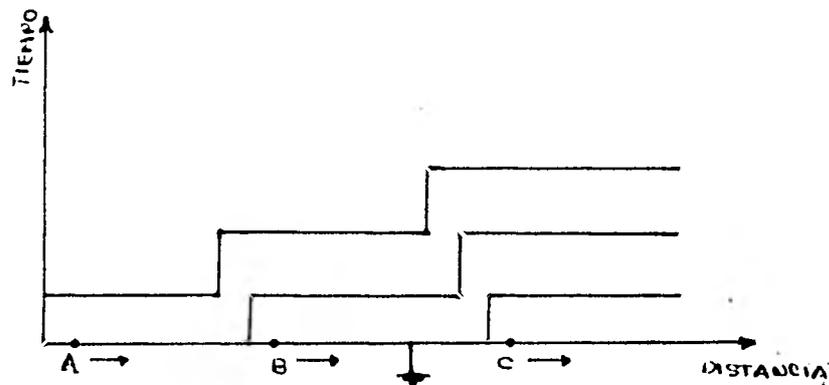


Fig. 5.20.- Protección de respaldo remota con relés de sobrecorriente o de distancia.

Donde el alcance de respaldo de los relevadores de distancia se encuentra limitado por la longitud de la línea, un mejoramiento puede obtenerse por la localización de la unidad de la zona 3 en el otro extremo de la sección de la línea e invirtiendo su dirección. Refiriéndonos a la figura 5.21 el tercer escalón del relevador de distancia en A normalmente, provee respaldo remoto para fallas en la sección BC si el interruptor en B falla al disparar. Este respaldo puede igualmente ser previsto invirtiendo la unidad de la tercer zona en B de tal manera, que cubra la sección BC. Donde la limitación de respaldo se alcanza, se debe al avance normal de la potencia en el bus afectado, la excesivamente alta impedancia del relevador de respaldo puede provocar disparos indeseables en sobrecargas. Para evitar lo anterior debe procurarse:

a). Proveer la zona de respaldo del relevador de distancia A con una característica de impedancia no lineal.

b). Proveerla con característica elíptica, la cual la habilitará para tener un alcance más corto de impedancia a lo largo del eje R que a lo largo del eje X.

c). Donde las barras colectoras están divididas, un relevador detector de falla, puede conectarse para dividir las barras durante una falla y reducir el aumento local de la falla.

5.7.2).- PROTECCION DE RESPALDO LOCAL

Esta solución implica, gastos y complicaciones extras y el valor de duplicar cada componente depende de su responsabilidad, por eso convenimos no tratarla en este tema.

C A P I T U L O VI

DESCRIPCION Y ANALISIS DE LA EXPLOSION DE UN
TRANSFORMADOR DE POTENCIA

6.1).- GENERALIDADES

Como se ha visto en el desarrollo de los capítulos anteriores, son varios los aspectos que se deben tomar en cuenta para lograr el correcto funcionamiento de un transformador de potencia.

A pesar de que para la mayoría de los transformadores se sigue un riguroso control, tanto en su diseño, construcción, puesta en servicio y mantenimiento preventivo, se han presentado en la práctica algunos casos de fallas severas en los mismos, en las cuales se ha llegado a la destrucción parcial e incluso a la explosión del transformador en falla.

Sin ser estos fenómenos que se presenten frecuentemente, debido a la importancia que tiene un transformador de potencia en la industria en cuanto a su confiabilidad, así como - - también la explosión de un transformador trae implicaciones en cuanto a la seguridad de la vida humana y la preservación de la propiedad, hacen que este tipo de fenómenos resulten sumamente peligrosos y de un gran costo económico por lo cual se deben -- tratar de evitar completamente.

El objetivo de este capítulo es el de mostrar antecedentes y descripción de la explosión de un transformador de potencia ocurrido en una industria el año pasado, con el fin de analizar las características que se presentaron en dicho fenómeno, así como también mostrar las opiniones y conclusiones del peritaje efectuado en el accidente mencionado anteriormente.

6.2).- ANTECEDENTES Y DESCRIPCION DE LA EXPLOSION DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA OCURRIDA EN LA INDUSTRIA MEXICANA DE METALES S.A.

Se describe a continuación el accidente ocurrido en -- una industria situada en Tlanepantla, Edo. de México, en donde a raíz de una serie de fallas en un transformador de potencia, las cuales no fueron completamente detectadas por su equipo de protección, aquel quedó semidestruido, producto de su explosión.

6.2.1).- ANTECEDENTES DE OPERACION DEL TRANSFORMADOR

- 1.- Fué fabricado en 1972 por la Industria H.V. de México S.A. siendo sus características nominales:

Capacidad	-----	22320/25000 KVA
fases	-----	3
Tensión: A.T.	-----	20 KV
B.T.	-----	0.460 KV
% Z	-----	3.94/4.78
Conexión: A.T.	-----	Δ/Y
B.T.	-----	Δ/Δ
Tipo	-----	Horno
Enfriamiento	----	FOW en aceite
Cambiador de derivaciones	----	MR No. 90755
Serie	-----	24-6532-1

- 2.- El transformador fué adquirido en 1973 por la Industria Mexicana de Metales S.A..
- 3.- El transformador fué asegurado contra incendios, teniendo en cuenta que la póliza de la aseguradora excluyó el hecho de que se produjera el incendio producto de un arco eléctrico dentro del transformador..
- 4.- El 22 de julio de 1974 se le realizó la prueba de rigidez dieléctrica al aceite del transformador, encontrándose en buenas condiciones.

- 5.- El 27 de marzo de 1975 se realizó otra prueba de rigidez dieléctrica al aceite encontrándose en buenas condiciones.
- 6.- En 1975 técnicos de una compañía de mantenimiento eléctrico acudieron a la Industria Mexicana de Metales - - S.A. e inspeccionaron el cambiador de derivaciones, de operación desenergizada, MR-No. 90755 montado en el -- transformador serie 24-6532-1 reportando haber encontrado el alambrado de control en el mando a motor MA2d (motor del cambiador de derivaciones) completamente mo dificado y con 28000 operaciones registradas. Recomendaron a la Industria Mexicana de Metales S.A. el susti tuir el mando a motor por otro nuevo, (lo cual no se llevó a cabo).
- 7.- El 18 de julio de 1979 la Industria Mexicana de Metales S.A. solicitó al Departamento de Servicio de Campo de la Industria H.V. de México S.A. la hoja de micarta que separa los compartimiento del cambiador y del trans formador, así como la boquilla para la aplicación en la fase "B" de alta tensión pues habían tenido una falla - en el mencionado mecanismo y este había roto la micarta (ver esquema mostrando falla del MR.90755, figura 6.1)
- 8.- El 26 de julio de 1979 la Industria H.V. de México S.A. proporcionó la boquilla y envió al Ing. Juan Estrada pa ra supervisar el montaje correcto de la boquilla, la mi carta pasamuro (proporcionada por otra industria) y rea lizar las pruebas eléctricas al transformador en refe-- rencia cuyo cambiador le había sido reemplazado; El nue vo cambiador tenía el No. 90919 y características idénticas al anterior.

NOTA.- Debido a causas que son de comprenderse, los nombres originales de las industrias y compañía de seguros que se -- vieron involucrados en el accidente, se cambiaron para -- los fines de este trabajo, llamándoles H.V. de México S.A., Industria Mexicana de Metales S.A. y Compañía de Seguros - Oriente S.A.; a la industria que fabricó el transformador, a la industria que lo compró y a la compañía de seguros -- que lo aseguró respectivamente.

A continuación se reproduce el informe presentado a la - Industria H.V. de México S.A. por parte del Ing. Juan Estrada:

Industria H.V. de México. S.A.
Dpto. de Control y Mantenimiento
México, D.F.

Anexo al reporte de aceptación del cliente Industria Mexicana de Metales S.A. con fecha 27/VII/79 del servicio realizado al cambiador sin carga Reinhausen localizado en el transformador No. de serie 24-6532-1 tipo FOW en aceite, 22.32/25 MVA, 20/0.46 KV, 50/60 HZ.

Se supervisó el montaje de la micarta que sirve de pasamuro entre el cambiador sin carga y el transformador.

Se desconectó el cabezal del cambiador sin carga con la finalidad de colocar la brida que sostiene al cambiador del gabinete del mismo, colocando luego el cabezal a su lugar.

Se supervisó el montaje del cambiador sin carga Reinhausen serie 90919 al gabinete del mismo.

Se supervisó la colocación de los pernos que van en el pasamuro y conectan las guías derivadoras del transformador y -- las guías del cambiador sin carga.

FECHA DE FALLA: 18-VII-1979

INDUSTRIA H.V. DE MEXICO S.A.

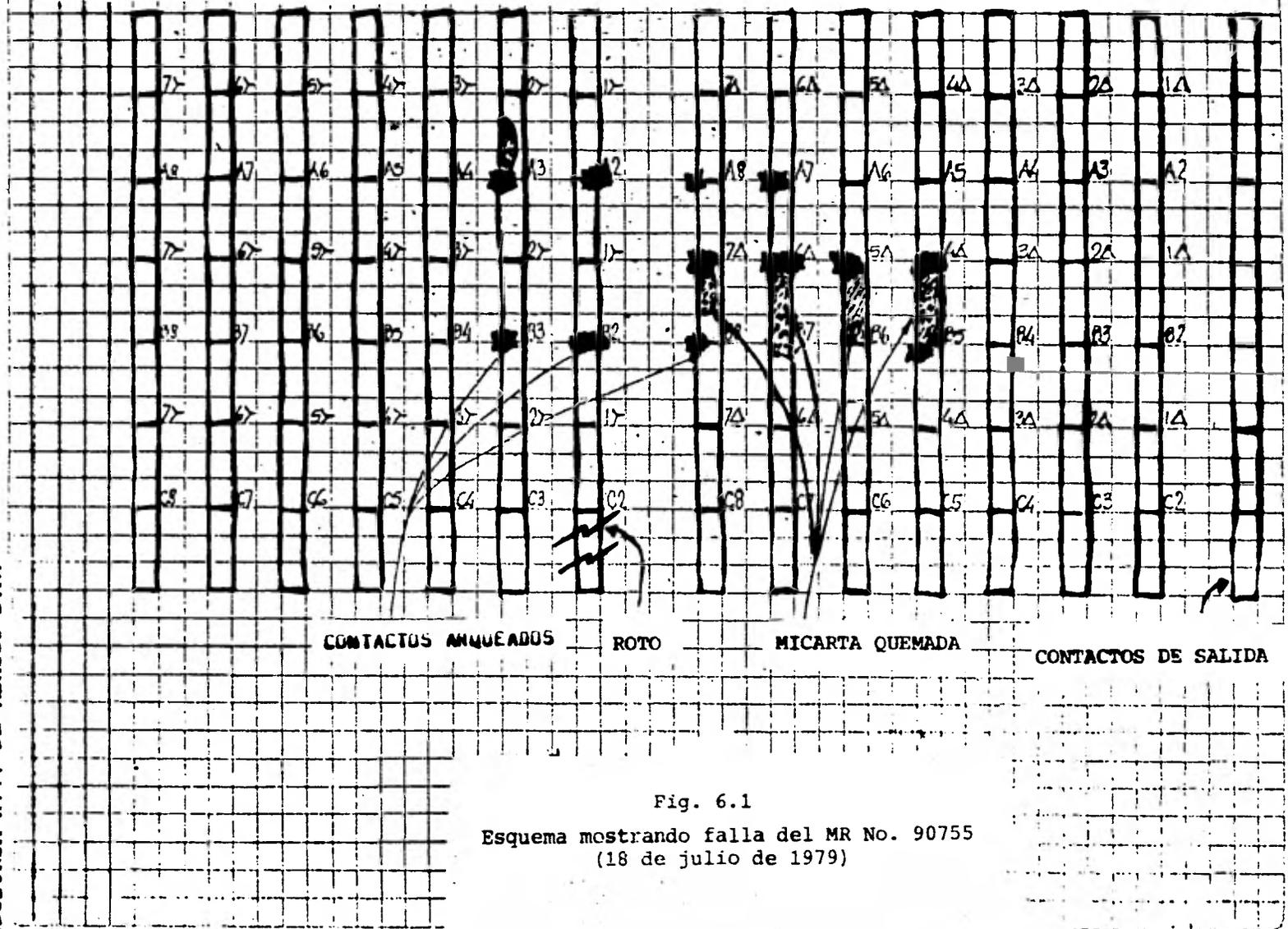


Fig. 6.1

Esquema mostrando falla del MR No. 90755
(18 de julio de 1979)

Se supervisó la conexión de las guías derivadoras del transformador a los pernos del pasamuro y de aquí al cambiador sin carga.

Se supervisó la colocación de tres bloques de micarta dispuestos en forma radial (a 100° cada uno) con la altura necesaria para soportar al cambiador sin carga.

Se sustituyó la boquilla H₂ del transformador, colocando un carrete por que la boquilla nueva era más larga en su parte inferior que la dañada.

Se conectó la flecha del mando a motor MA2-d al cambiador sin carga, practicando cambios en todas las posiciones en forma manual y eléctrica.

Se realizó una prueba de relación de transformación TTR en todas las posiciones.

Se inspeccionó el relevador Buchholz localizado entre el tanque del cambiador y el tanque de expansión encontrándose todo correctamente.

Se efectuó el llenado de aceite, con personal, equipo y responsabilidad de la compañía "S. E." de México".

Se efectuó prueba de resistencia de aislamiento encontrándose el megger bajo, por lo cual se recomendó limpiar bien boquillas de alta tensión y barras de baja tensión.

Se efectuó prueba de rigidez dieléctrica del aceite, encontrando tanto para el aceite del transformador como para el del conmutador sin carga una rigidez dieléctrica mayor de 35KV.

Terminado lo anterior se observó el comportamiento del transformador primero en vacío y luego bajo carga, dando con esto por terminado el servicio.

Atentamente,

Ing. Juan Estrada.

- 9.- El 2 de agosto de 1979, la compañía "S.E.de México", realizó un análisis cromatográfico de gases disueltos al aceite contenido en el transformador, encontrándose este en buenas condiciones (ver reporte de resultados en la siguiente hoja).
- 10.- El 12 de agosto del mismo año, es nuevamente energizado el transformador y puesto en operación, anotándose el hecho de que en el servicio de mantenimiento descrito anteriormente tanto la micarta como el cambiador No. 90919 fueron montados en el transformador sin un proceso de secado.
- 11.- El 28 de agosto técnicos de Industria Mexicana de Metales S. A. sustituyeron la unidad de energía almacenada (figura 6.2 parte No. III) del sistema de control del cambiador de derivaciones, siendo ésta la segunda ocasión en que la Industria Mexicana de Metales S.A. realizó este cambio y no existen registros del cambio anterior.
- 12.- No existen registros correspondientes de los servicios de mantenimiento al cambiador desde la puesta en servicio en 1973, ni el registro del contador de operaciones.

S.E. de México S.A. de C.V.

Sonora 278-145
México 2, D.F.

Tels. 550-0102
550-0103

Reg. SEM 812101-001
I.M. 798321
Reg. CANAMEX 25431

Agosto 2, 1979

Industria Mexicana de Metales S.A.
Ave. Morelos # 231
Tlanepantla, Edo. de México.

RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANALISIS DE CROMATOGRAFIA DE GASES DISUELTOS CORRIDO AL ACEITE CONTENIDO EN SU TRANSFORMADOR TRIFASICO, MCA, INDUSTRIA H.V. DE MEXICO S.A., SERIE No. 24-6532-1, DE 25000 KVA.

GASES DISUELTOS	P.P.M.	% COMBUSTIBLES
OXIGENO	1908.810	
NITROGENO	8344.900	
MONOXIDO DE CARBONO	1.913	32.363
DIOXIDO DE CARBONO	44.300	
ETILENO	0.700	11.842
ETANO	0.096	1.624
ACETILENO	2.943	49.788
PROPANO	0.259	4.381

CONTENIDO TOTAL DE GASES DISUELTOS....10303.921 P.P.M.

CONTENIDO TOTAL DE GASES COMBUSTIBLES. 5.911 P.P.M.

PORCENTAJE DE BASES DISUELTOS 0.057 %

DIAGNOSTICO: Transformador en BUENAS CONDICIONES.

RECOMENDACIONES: Establecer secuencia de la generación -
de los gases.

Atentamente,
Ing. Lázaro Blázquez G.
DIRECTOR GENERAL.

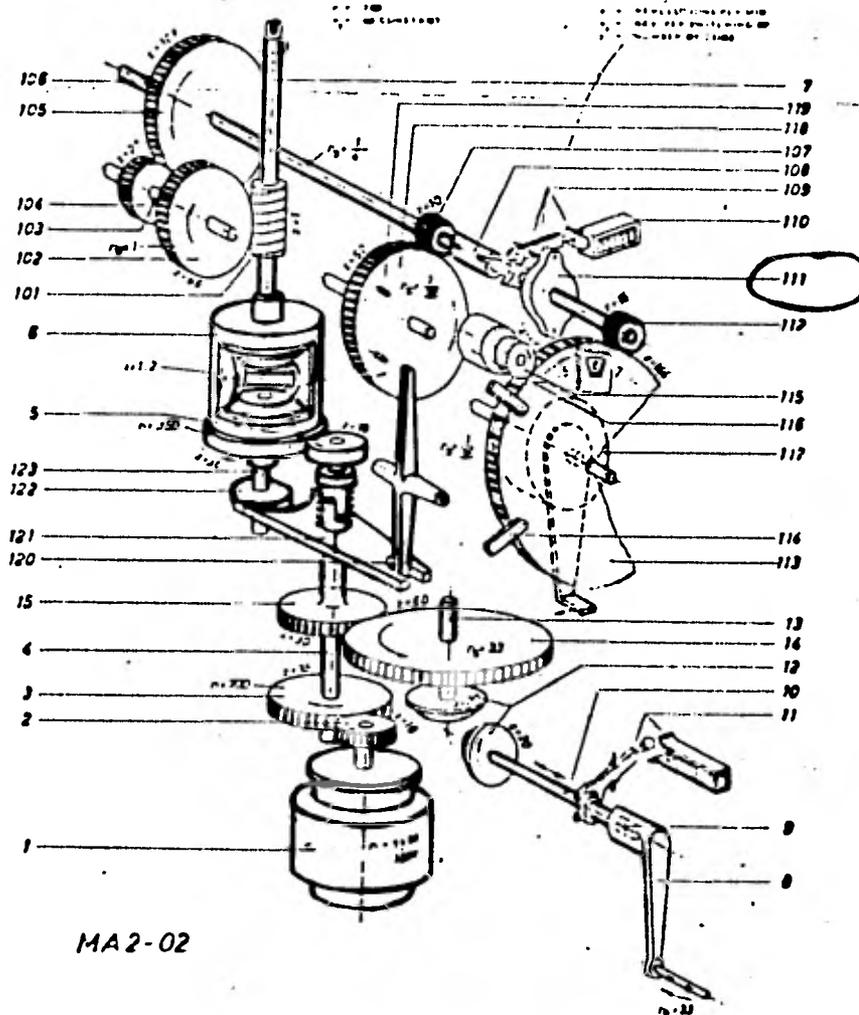


Fig. 6.2.

Sistema de Control del cambiador de derivaciones, mostrando la parte que se tuvo que cambiar (III)

6.2.2).- DESCRIPCION DE LA EXPLOSION

El 6 de enero de 1980 a las 5.08 a.m. reportó el operador del horno 3 de la Industria Mexicana de Metales S.A., que al meter el interruptor para empezar a fundir, se provocó una explosión en el transformador, incendiándose el aceite, quemando todo el equipo e instalaciones del horno.

1).- REPORTE SOBRE LA EXPLOSION DEL TRANSFORMADOR POR PARTE DE LA INDUSTRIA H.V. DE MEXICO S.A. (FABRICANTE DEL MISMO.

El día 8 de enero de 1980 la Industria Mexicana de Metales S.A. reportó a nuestro Departamento de Servicio de Campo una falla en el transformador serie No. - 24-6532-1 de 25000KVA vendido por nuestra compañía. Por conducto de nuestro Departamento, el Ing. Pedro Adame, - se enteró de la falla y visitó las instalaciones de la - Industria Mexicana de Metales S.A. En esta ocasión hubo una explosión en el compartimiento del cambiador habiéndose desprendido la placa del registro lateral derecho - de inspección provocando un incendio de importancia.

a).- INSPECCION DE LOS DAÑOS

La falla ocurrió el domingo 8 de enero de 1980 y el día 8 en que reportaron la misma a la Industria H. V. de México, S.A., se visitó el cuarto donde estaba -- instalado el transformador inspeccionando la unidad, -- apreciándose las boquillas de alta tensión con sus porcelanas destrozadas, las boquillas en baja tensión con sus epóxicos agrietados, los cobres de las mismas reco-

cidos, el transformador con rastros de incendio en las paredes del tanque, el gabinete de control del mismo -- destrozado por la acción de corto circuito, el compartimiento del cambiador completamente vacío y con la mica quemada, del mando a motor MA2d, sólo se encontraron fragmentos de la carcasa, del mecanismo de operación y del tablero de control. Los contactos del cambiador y sus guías de conexión al pasamuro habían sido ya removidos por el cliente.

En el cuarto de control localizado inmediatamente abajo del cuarto del transformador se encontraron depósitos de carbón en todas las paredes. El alambrado de control y el panel del operador se encontraron destrozados completamente.

Una vez que el transformador fué enviado a la planta de la Industria H.V. de México S.A. se probó la relación de transformación de la unidad encontrándose la fase B en corto circuito. El cabezal del cambiador -- fué desensamblado y encontrado entre las posiciones 3 y 4 delta. En el interior del transformador la cámara de gases se encontró con depósitos de carbón, sin embargo las bobinas se apreciaron en buen estado.

b).- ANALISIS DE LA FALLA DEL 6 DE ENERO DE 1980

Por los antecedentes arriba mencionados resulta difícil explicar la causa precisa que ocasionó la falla, más aún si sabemos que se destruyó la evidencia. La Industria Mexicana de Metales S.A. nos reportó que la unidad fué disparada de servicio por la operación de un relevador de sobrecorriente el cual accionó el interruptor principal. No fueron reportadas accionadas las protecciones de :

- i).- Relevador Buchholz del compartimiento del cambiador.
- ii).- Válvula mecánica de alivio de presión.
- iii).- Termómetro Hottest-Spot
- iv).- Interruptor de seguridad B-8 en el mando a motor, etc.

Por los depósitos de carbón encontrados en la cámara de nitrógeno del transformador sabemos que hubo una explosión en el compartimiento principal. De haber estado montado en el transformador el relevador de presión súbita, la unidad pudo haber sido disparada de servicio por el mismo relevador. De la observación de los apartarrayos, capacitores, restos del mando a motor MA2, gabinete de control principal, suponemos que estos daños fueron causados por la acción de corto circuito. Además de la inspección a las bobinas una vez ensambladas, concluimos que la falla no involucró deterioración gradual de la celulosa. Lo anterior nos lleva a suponer que la - falla, fué ocasionada por un agente externo. Los diferentes análisis expuestos nos conducen a la siguiente hipótesis:

La falla se originó por un corto circuito en el cuarto de control mismo que envió pulsos de accionamiento al mando a motor MA2d para accionar estando el - transformador energizado y al gabinete de control principal bloqueando las protecciones:

Válvula mecánica de alivio de presión y relevador Buchholz.

La operación del cambiador en condiciones bajo carga ocasionaría la explosión, el incendio, la falla en las bobinas de la fase B y la operación del relevador de sobrecorriente que dispararía la unidad fuera de servicio.

RECOMENDACIONES

Por lo anterior se recomienda a nuestro cliente:

- 1°.- Que consulte a Reinhausen o a la Industria H.V. de México S.A. para cualquier menor problema encontrado en sus equipos.
- 2°.- Que vigile que el transformador tenga en todo momento las protecciones proporcionadas por el fabricante y se cerciore que las mismas estén siempre en buen estado y correctamente alambradas.
- 3°.- Que verifique periódicamente la operación del interruptor principal mediante el accionamiento de las diversas protecciones como son: relevador, Buchholz, relevador de presión súbita, válvula mecánica de alivio de presión, interruptor de seguridad B 8 del MA2, interruptores de fin de carrera, etc. y que guarde registros de las fechas en que éstas se realizan.
- 4°.- Que revise periódicamente el alambrado en el cuarto de control del horno y que guarde registros de los mismos.

Preparó:

Ing. Gerardo Actos Y.
Gerente Depto. de Servicio
Industria H.V. de México S.A.

2).- PRESUPUESTO DE REPARACION DE LA INDUSTRIA H.V. DE MEXICO S.A.

Industria H.V. de México, S.A.
Ave. Morelos # 231
Tlalcoligia, Méx.

At'n.: Ing. Rafael Galán Paéz
Dir. de Abastecimiento

Ref.: Su pedido 84134-L
Reparación del transformador de horno serie --
24-6532-1

Muy señores nuestros:

Tomando como base las pláticas que se han venido sosteniendo sobre los elementos que desean ustedes - se tomen en consideración para la reparación del transformador de referencias y de acuerdo también a lo tratado en el viaje que se realizó a Houston, Texas, presentamos a su consideración 3 alternativas para la reparación de este aparato como sigue:

1a. ALTERNATIVA

Reparación en la fábrica de Industria H.V. de México S.A., cubriendo los 3 devanados de alta tensión.

De acuerdo con los reportes de nuestro Departamento de Seguramiento de la Calidad e Ingeniería, será necesario cambiar totalmente los siguientes elementos:

- a). Los 3 devanados de alta tensión tomando en cuenta que se encuentra destruido el devanado de la fase B y hasta el momento se desconoce el estado --

que guardan las fases A y C que a petición de la Industria Mexicana de Metales S.A. se está considerando el cambiar totalmente los 3 devanados.

- b). Boquilla de resina epóxica en baja tensión por encontrarse agrietada.
- c). Barras de cobre que forman las boquillas de baja tensión. De acuerdo a nuestro Departamento de Aseguramiento de la Calidad, estas boquillas se encuentran recocidas y es recomendable sean reemplazadas totalmente.
- d). Todo el núcleo de acero al silicio. Según lo encontrado en la inspección por nuestro Departamento de Aseguramiento de Calidad, este núcleo está en malas condiciones en un 70% y el aislamiento no degradable Carlite interlaminal, destruido.
- e). Aislamientos mayores.
Estos aislamientos según el reporte de nuestro Departamento de Aseguramiento de la Calidad, se encuentran contaminados con residuos de carbón.
- f). Aceite aislante.
- g). Limpieza y preparación del tanque para su reoperación.
- h). Los siguientes componentes que fueron destruidos por el fuego:

- 1 Cambiador sin carga marca Reinhausen tipo MR. No. 90755. Se cambiará por una marca G.E. tipo UTT, - este cambiador normalmente es un cambiador con -- carga pero se eliminará el "Reversing Mechanism"- y el "On Load Switching Feature".
- 2 Indicadores de flujo de aceite.
- 2 Indicadores de flujo de agua.
- 1 Hot Spot.
- 1 Relevador de sobrepresión súbita.
- 1 Acondicionador de aire.
- 1 Válvula de sobrepresión.
- 1 Panel control.
 - 1 Resistencia calefactora
 - 4 Tablillas terminales
 - 1 Tablero terminal
- 3 Boquillas AT.
- 6 Boquillas BT.
- 3 Capacitores.
- 3 Apartarrayos.
- 4 TCS para Hot Spot.
- 3 Válvulas para filtro prensa.
- 1 Válvula drenaje 2" con válvula muestreo 1/4".

- 2 Conectores a tierra para cable # 6-250 MCM
 - 1 Válvula sobrepresión del cambiador.
 - 1 Interruptor termomagnético FA-3200.
 - 1 Contacto magnético.
 - 1 Selector Auto-Man.
 - 1 Lote Cable (6490").
 - 3 Terminales AT (Burndy) NOR-6744T12.
 - 1 Indicador nivel de aceite.
 - 1 Termómetro.
 - 1 Relevador auxiliar (relé presión súbita)
 - 1 Gabinete control.
 - 1 Equipo inerte.
 - 1 Masonite.
 - 1 Interruptor termomagnético FA-3015.
 - 2 Relevadores de bajo voltaje.
- i). No se está considerando en lo anterior lo siguiente:
- 2 Enfriadores OW
 - 2 Bombas de aceite
 - 1 Relevador marca RH tipo TW-3

Los elementos antes mencionados no fueron enviados a la Industria H.V. de México, S.A. para su inspección, por lo cual será necesario verificar - el estado que guardan antes de proceder a su reutilización.

j). Será necesario realizar los siguientes trabajos de Ingeniería para mejorar el diseño en la reparación.

- Diseño de nuevos aislamientos.
- Diseño para un nuevo ensamble interno, tomando - en cuenta mejoras en el diseño y la colocación - del cambiador marca G.E. tipo U.T.T.
- Diseño de las modificaciones al montaje de accesorios en el tanque para tomar en cuenta los nuevos estilos de los mismos.

Precio: \$ 8'869,060.00 M.N.
Entrega: 12 meses después a partir de la fecha en que se reciba su apreciable orden.

2a. ALTERNATIVA

Reparación en la fábrica de la Industria H.V. de México, S.A. cubriendo el devanado de alta tensión - de la fase B únicamente.

En esta alternativa se está considerando todo lo anterior con la excepción de que se reparará únicamente el devanado de alta tensión de la fase B y se utilizará el diseño original, modificándose únicamente para utilizar el cambiador sin carga marca G.E. tipo UTT.

3a. ALTERNATIVA

Reparación por G.E. en su Planta de Houston.

Si el cliente opta por realizar esta reparación en la Planta de G.E. en Houston, Industria H.V. de México, S.A. no pondrá ninguna objeción y estará de - -

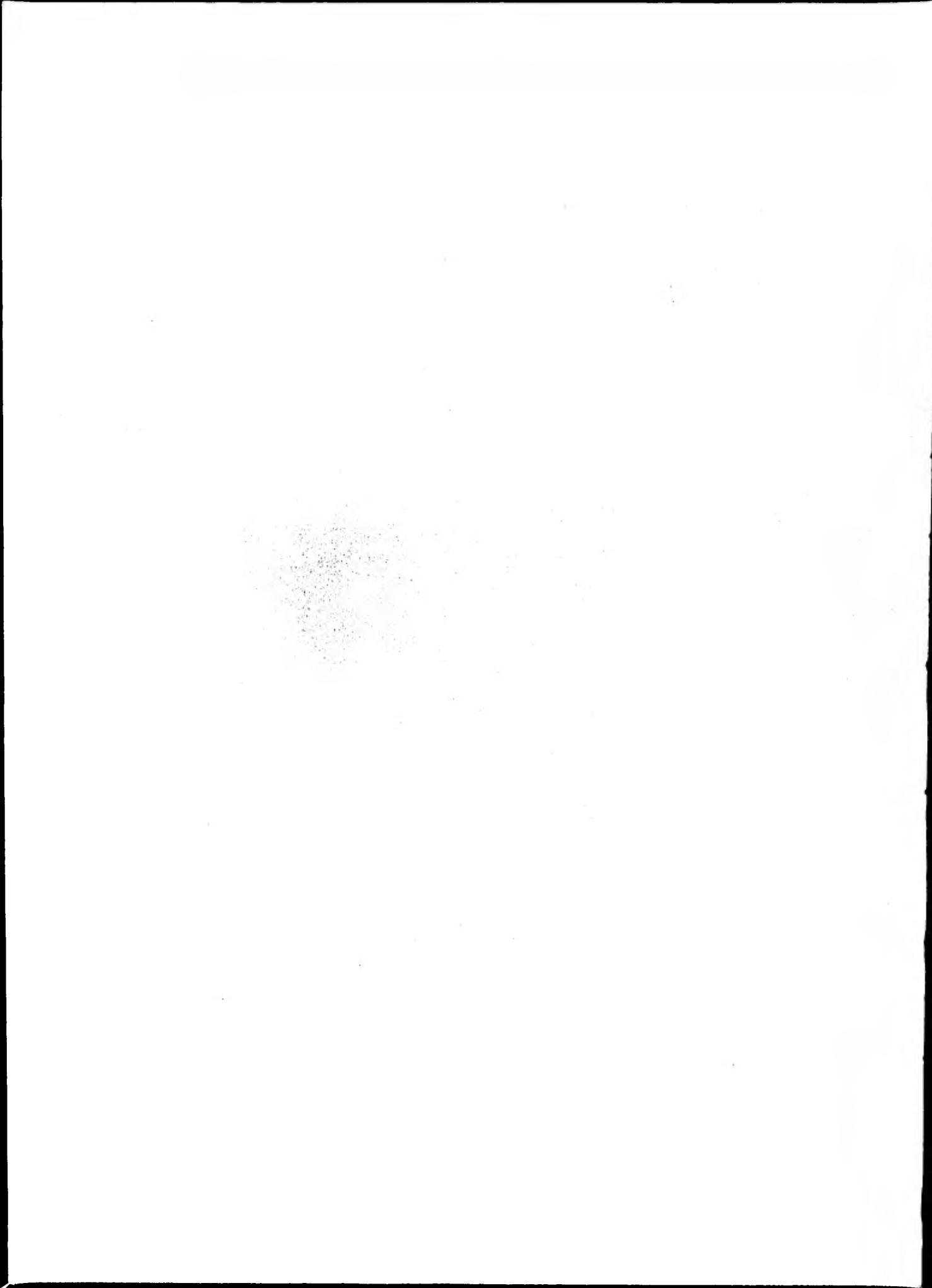
acuerdo en proporcionar toda la información y facilidades que se consideren necesarias para realizarla.

Esperando que las alternativas presentadas - sean de utilidad y les permitan tomar la decisión que - más les convenga, nos reiteramos como siempre a sus estimables órdenes.

A t e n t a m e n t e .

DIV. COMERCIAL INDUSTRIA H.V. DE MEXICO
S.A. DE C.V.

ING. ATENOGENES MORALES TRESS
VENTAS A LA INDUSTRIA



6.2.3).- REPORTE INTERNO DE LA INDUSTRIA MEXICANA DE METALES, S.A.
SOBRE EL ACCIDENTE

1). OBSERVACIONES DEL TRANSFORMADOR

- * Compartimiento del cambiador carbonizado, registro lateral destrozado.
- * Compartimiento del transformador con trazas de carbón y humo arriba del nivel del aceite.
- * Tablero separador carbonizado en el lado del cambiador.
- * Lámina del núcleo en buenas condiciones.
- * Bobinas de alta tensión sin deformaciones por esfuerzos de corto circuito, con excepción de bobinas con derivaciones de la fase B.
- * Aparatos de medición y protección destruidos por fuego.
- * Tanques superior e inferior sin deformaciones significativas. Requieren limpieza.

2). DATOS DEL REGISTRO DE LA FALLA

- * Ocurrió al momento de iniciar una colada.
- * No se habían registrado deficiencias en la operación inmediata anterior.
- * No alcanzaron a operar las protecciones de sobrepresión y Buchholz.
- * Operó la protección de sobrecorriente, después de la falla.
- * El horno se operaba desde el pupitre de mando.
- * En Julio de 1979 se había comprobado la operación adecuada de las protecciones.
- * Los controles del cambiador, incluyendo los mandos remotos, quedaron inutilizados.

3). HIPOTESIS ACERCA DE LA FALLA

- * Se inició en el compartimiento del cambiador.
- * Falla de gran intensidad y velocidad, probablemente por arco de potencia entre contactos del cambiador que quedaron entreabiertos.
- * La presión en el compartimiento del cambiador - - fracturó el tablero separador.
- * El arco ocasionó un corto circuito de poca importancia entre espiras en la zona de derivaciones - de las bobinas de alta tensión.

4). SOLUCIONES PROPUESTAS

- * Creemos que el transformador puede y debe repararse siguiendo el diseño original.
- * Pueden aprovecharse el tanque, la lámina del núcleo, las bobinas de baja tensión y muy probablemente las barras del ensamble interior de baja -- tensión (aunque no se vieron físicamente, no creemos que hayan sufrido desperfectos, ya que se encuentran dentro del aceite del transformador.)
- * Las bobinas de alta tensión, aunque consideramos que están en condiciones eléctricas y mecánicas - de volver a utilizarse (con excepción de las que llevan derivaciones), sería mejor hacerlas nuevas ya que es muy difícil estimar la vida "térmica" - que aún tienen por delante.
- * Habrá que fabricar aislamientos nuevos.
- * Habrá que instalar nuevos aparatos de medición y - protección.
- * Recomendamos utilizar el cambiador de "refacción" que tiene la Industria H.V. de México, S.A., previa revisión de Maschinen Fabrik Reinhausen y/o -

de los especialistas de la Industria Mexicana de Metales, S.A.

- * No creemos que los enfriadores y bombas hayan sufrido daños durante el incendio; de ser así, podrán también utilizarse.

5). LIMITACIONES DE NUESTRO ANALISIS

- * El cambiador y su mecanismo se destruyeron totalmente.
- * Desconocemos el estado de las bobinas de las fases A y C, que no se desensamblaron por no haberse encontrado anormal la prueba de relación de transformación posterior a la falla.
- * Desconocemos la posición en que quedaron los "limit switches" de la flecha del cambiador después de la falla.

6). PROBABLE ORIGEN DE LA FALLA

- * El cambiador estaba fuera de posición en el momento de cerrar el interruptor del horno.
- * Esto puede ocurrir de varias maneras:
 - a) Por una deficiencia en el alambrado del cambiador.
 - b) Por una falla mecánica en el mecanismo de accionamiento.
- * Aunque el diseño del cambiador hace altamente improbable ambas, nos inclinamos a aceptar esta última.

7). MEDIDAS PREVENTIVAS

- * Evaluación y dictamen de la falla por parte de -- Maschinen Fabrik Reinhausen.

Revisión del cambiador de refacción antes de montarlo.

Supervisión del montaje.

- * Pruebas exhaustivas, eléctricas y mecánicas, del cambiador y su control una vez instalado el transformador en el horno
- * Diseñar redundancia mecánica y/o eléctrica en los "limit switches" del cambiador.
- * Hacer verificaciones periódicas de la correcta -- operación de todas las protecciones, mecanismos y disparos, de acuerdo con una rutina de mantenimiento preventivo que tome en cuenta tiempo transcurrido y número de operaciones del cambiador.

Preparó:

Ing. Ernesto Espinosa
Oropesa.
Jefe de Depto. Técnico.
Industria Mexicana de
Metales, S. A.

6.2.4) .- INFORME PRELIMINAR DE SINIESTROS, HECHO POR LA OFICINA TECNICA DE AJUSTES Y PERITAJES DE LA COMPAÑIA DE SEGUROS ORIENTE S. A.

1.- HIPOTESIS Y PROBABLE ORIGEN DE LA FALLA

El cambiador de derivaciones se encuentra colocado en la parte superior del transformador (el -- cual se encuentra sumergido en aceite) del lado de -- alta tensión.

La válvula de alivio de presión del transformador se encuentra en la parte superior del transformador.

Para que exista precisión en el cambio de posiciones del cambiador de derivaciones por parte -- del motor encargado de tal función, el control debe hacerse de tal forma que el cambio de posiciones se efectúe en forma lenta con el fin de evitar introducir fenómenos transitorios.

El arco voltaico entre dos terminales, se forma fundamentalmente por la diferencia de potencial que existe entre ambas y que hace que se rompa la rigidez dieléctrica del medio que las separa debido a la ionización del mismo, dependiendo esto de la distancia que separa a las terminales.

De lo anterior creemos que si hubiera sido el motor el que en forma paulatina hubiera estado accionando el cambiador de derivaciones el arco voltaico también se hubiera formado en forma paulatina y éste a su vez hubiera ocasionado un aumento de presión -- progresiva en la parte superior del transformador -- que hubiera ocasionado un desprendimiento de la válvula de alivio, en consecuencia no creemos que haya sido la causa de la falla el cambiador de derivaciones.

Haciendo un análisis del aceite del transformador (el cual sirve como aislante y vehículo refrigerante del mismo), sabemos que si hay humedad en éste se depositará por diferencia de densidad en la parte inferior. La humedad del ambiente es causa común en la contaminación del aceite de los transformadores, a pesar de la calidad de las instalaciones, por lo cual se le debe proporcionar mantenimiento para conservarlo en óptimas condiciones.

La humedad en el aceite, disminuye notablemente las propiedades dieléctricas de este con lo cual pierde su capacidad aislante.

En el caso de demostrar que hay oxidaciones - en la parte inferior del transformador o que hay -- partes fundidas en el lugar mencionado, por efecto de arco voltaico se podrá concluir que la falla se debió a la existencia de humedad en el aceite, producto de un pésimo mantenimiento al mismo.

Se acepta que el evento suscitado fué explosión causada por un arco voltaico, siendo la reclamación en el seguro de incendio, procederá por consiguiente los daños producidos por la propia explosión, más no los que estuvieron sujetos a arco voltaico como son: el cambiador de derivaciones, la bobina de la segunda fase, etc.

Prepararon

Ing. Horacio Oviedo García

Ing. Mario Lara Martínez

Oficina Técnica de Ajustes y Peritaje

COMPANIA DE SEGUROS ORIENTE, S.A.

2.- ANALISIS DEL SINIESTRO POR EXPLOSION DE UN TRANSFORMADOR DE HORNO DE LA INDUSTRIA MEXICANA DE METALES, S.A., POR PARTE DE LA COMPANIA DE SEGUROS ORIENTE S. A.

- a) Visita efectuada el 24 de Febrero de 1980 a la Industria H.V. de México, S.A. y análisis de la documentación disponible.
- b) Bienes afectados por el accidente:

- i) . Un transformador de horno de 22.32/25 - MVA marca Industria H.V. de México, S.A. equipado con cambiador de taps, mecanismo de operación y accesorios.
- ii). El tablero de control del horno No. 3 de 50 Ton. en el Departamento de Aceración.
- iii). Otros bienes en el Departamento de Aceración.

c) Marcha del accidente

El 6 de Enero de 1980 a las 5.08 horas A.M. reportó el operador del horno No. 3 que al meter el interruptor para empezar a fundir, se provocó una explosión en el transformador, incendiándose el aceite, quemando todo el equipo e instalaciones del horno. Posteriormente, los bomberos apagaron el incendio a las 8:30.

Fuente: Reporte del Sup. de Aceración al Ing. Roberto Díaz. Reporte del Comandante del cuerpo de bomberos de Tlanepantla.

d) Alcance de los daños

- i) No fué posible conocer el alcance de los daños sufridos por el tablero de control del horno, las instalaciones del horno ni accesorios del transformador que no aparecieron durante la visita a la Industria H.V. de México, S.A.
- ii) Respecto al transformador de horno:
 - 1. Se apreciaron daños por corto circuito - en bobinas de alta tensión de la fase B.

Fuente: Reporte de Industria H.V. de México, S.A.

Figuras: 6.3, 6.4, 6.5 y 6.6

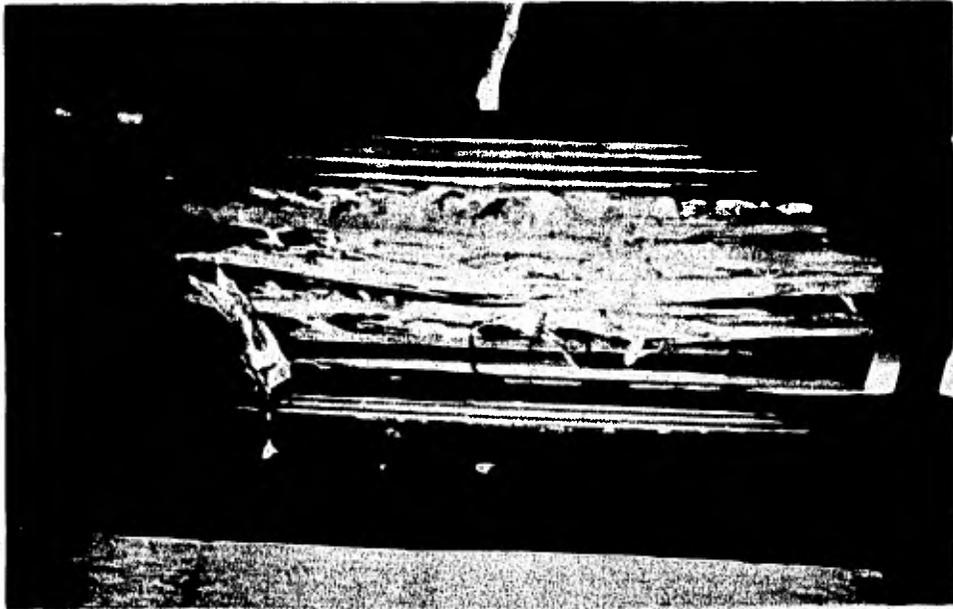


Fig. 6.3

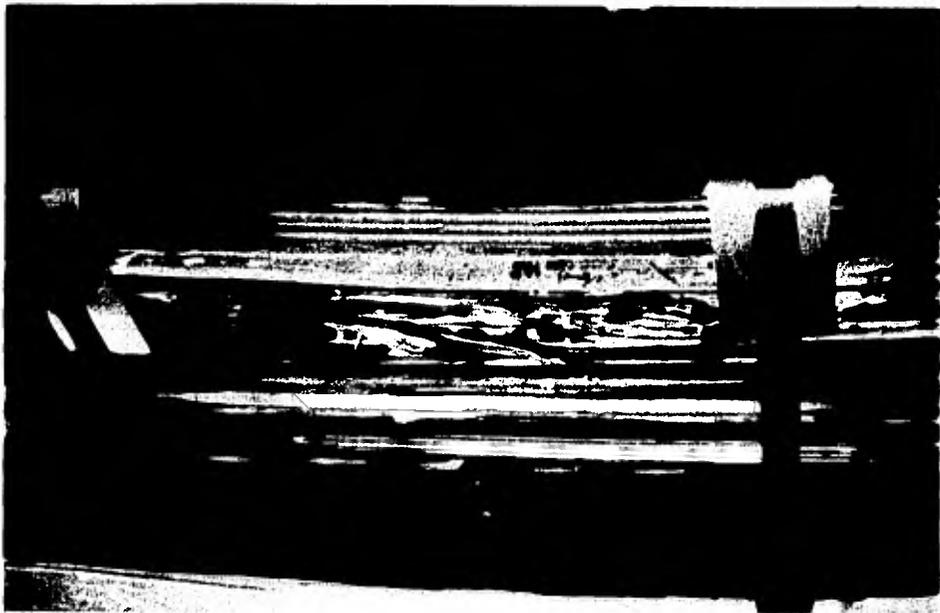


Fig. 6.4

Paquete de bobinas de alta y baja tensión Fase B, donde se ve el corto circuito en la bobina de alta tensión - (parte exterior).

2.- No se apreciaron daños exteriores a las fases A y C. Se requeriría una prueba de alta tensión para verificar en que condiciones eléctricas se encuentran los aislamientos de estas fases.

Fuente: Reporte de la Industria H.V. de México, S.A.
Fig. 6.7



Fig. 6.7 -
Detalle de bobina - en esta alta tensión
mostrando el corto circuito en el punto
interior de la fase B.

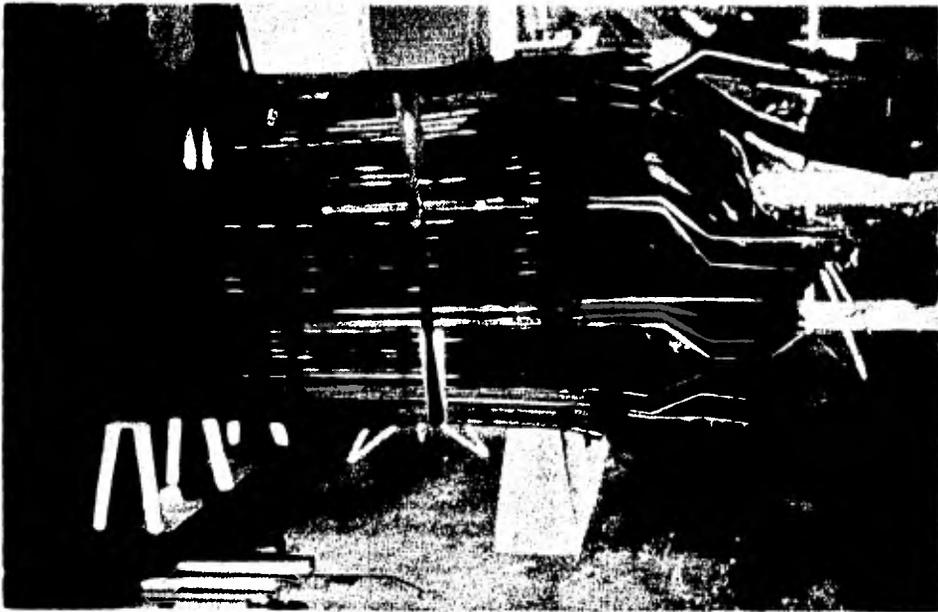


Fig. 6.6

Paquete de bobinas de alta y baja tensión:
fase B, visto en conjunto.

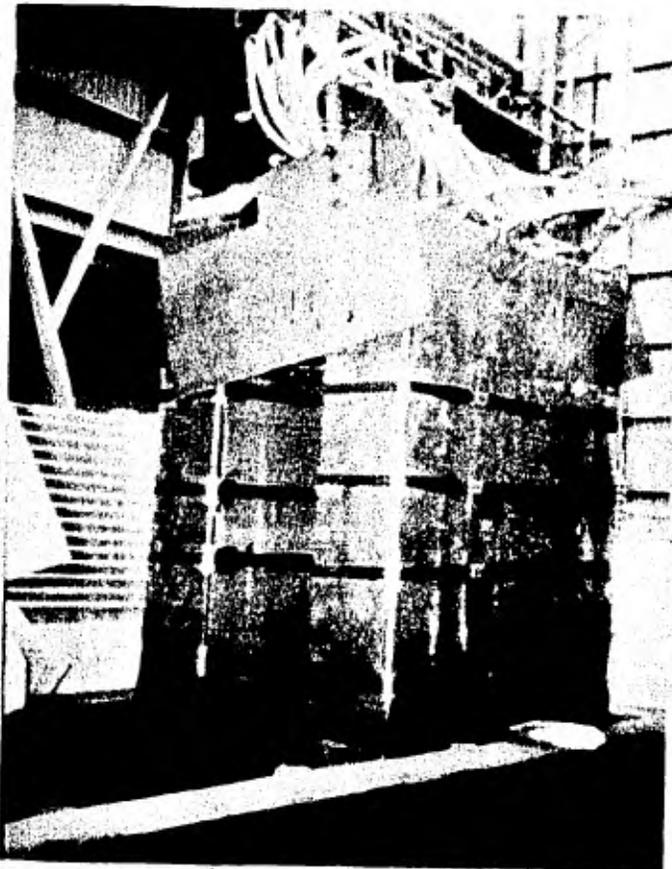


Fig. 6.7

Conjunto de bobinas y aislamientos de la fase C, sin daño.

- 3.- La campana del tanque del transformador presenta huellas de carbón en la parte superior.

Fuente: Reporte de la Industria H.V. de México, S.A.
Fig. 6.8.



Fig. 6.8

Parte interior de la campana del tanque del transformador en la sección correspondiente a bobinas y núcleo, mostrando también una parte de la micarta.

4.- Las boquillas de alta tensión y las de baja tensión destr_ozadas.

Fuente: Reporte de la Industria H.V. de México, S.A.
Fig. 6.9

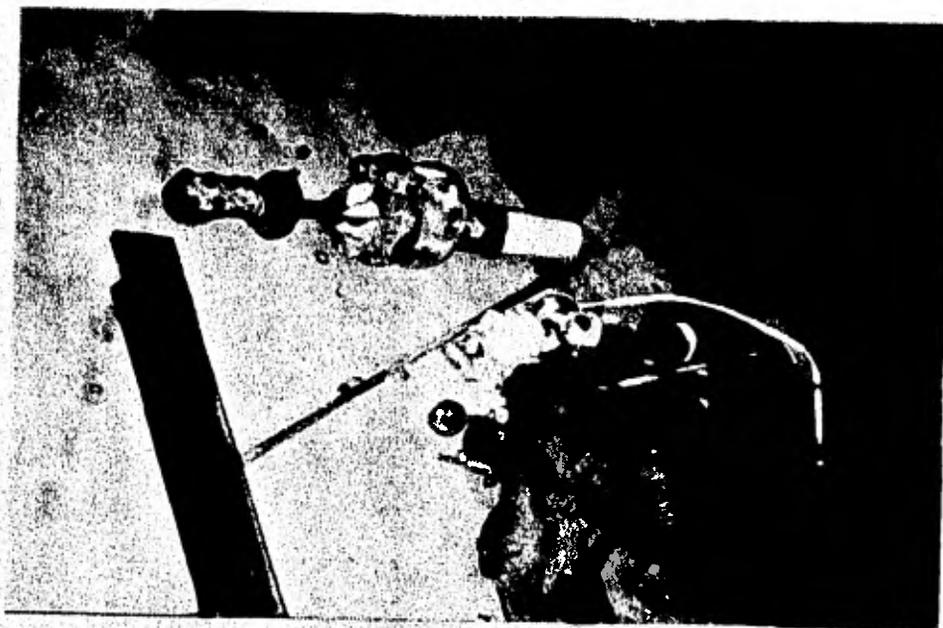


Fig. 6.9

Boquillas de alta tensión y baja tensión
destrozadas.

- 5.- El compartimiento del cambiador carbonizado y la micarta quemada por un lado, pero no rota. Los tornillos que sujetaban la tapa derecha fueron en parte arrancados por la explosión, no apareció la tapa.

Fuente: Reporte de la Industria H.V. de México, S. A.
Figuras 6.10 y 6.11

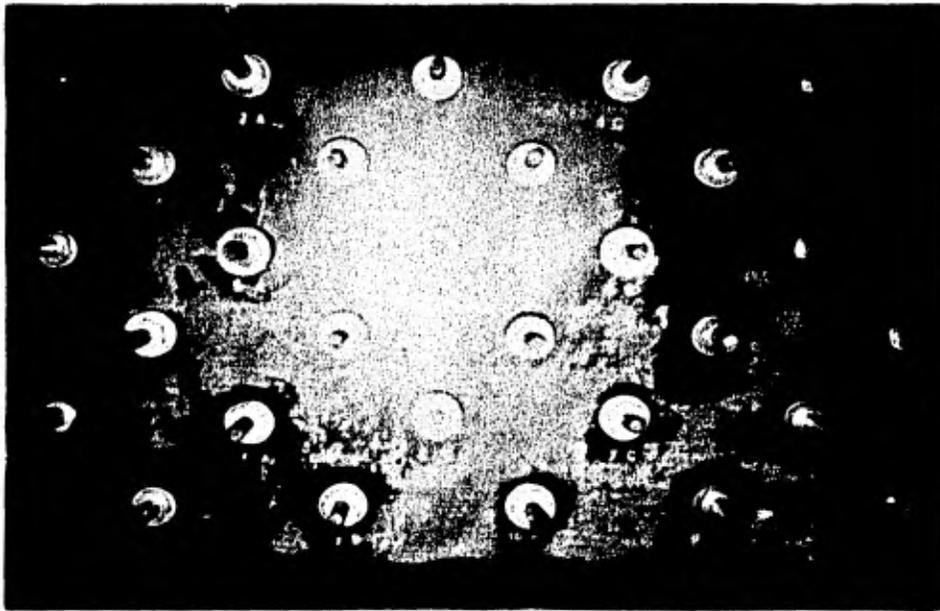


Fig. 6.10

Micarta que separa los compartimientos del cambiador y del núcleo, vista desde el compartimiento del núcleo.

6.- El gabinete de control destrozado.

Fuente: Reporte de la Industria H.V. de México, S. A.
Fig. 6.11.

7.- No apareció el cambiador ni sus guías de conexión, ni el mecanismo que mueve el cambiador por que fueron destruidos y los restos removidos por la Industria Mexicana de Metales, S. A.

Fuente: Reporte de la Industria H.V. de México, S. A.
Figura 6.11.

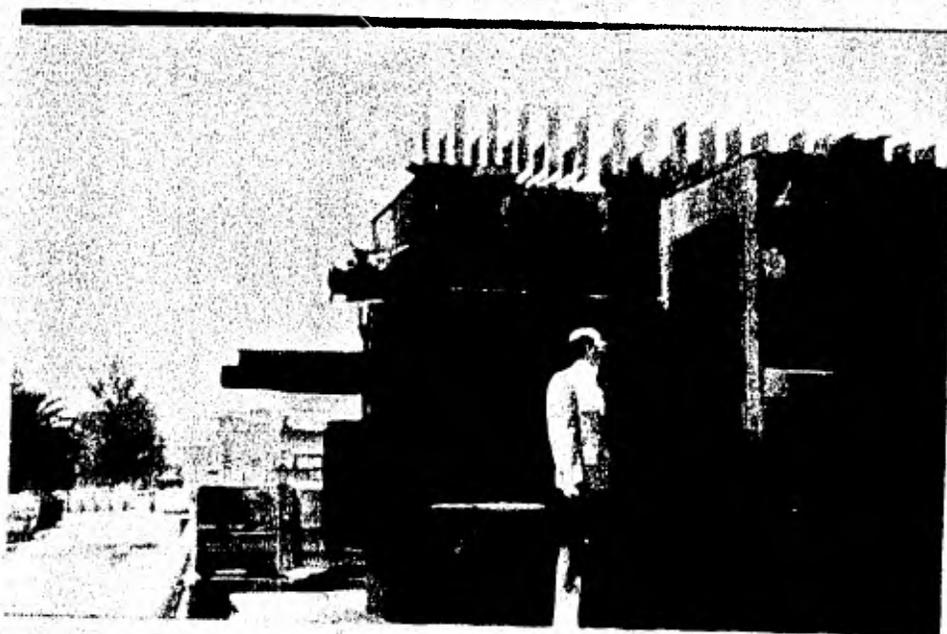


Fig. 6. 11

Vista general de la carcasa del tanque del transformador.

8.- El alambrado de control y el panel del operador estaban des--
trozados.

Fuente: Reporte de la Industria H.V. de México, S. A.

9.- El cabezal del cambiador fué desensamblado por la Industria -
H.V. de México, S. A., encontrando que estaba entre las posi-
ciones 3 y 4 delta.

Fuente: Reporte de la Industria H.V. de México, S. A.



Fig. 6.12

Compartimiento del cambiador mostrando el lugar
donde estaba la tapa que salió despedida duran-
te la explosión.

e) Causa de los daños

- i) Es evidente que ocurrió una explosión en el - compartimiento del cambiador. Siendo el aceite del tipo combustible, una explosión dentro del compartimiento cerrado, sólo puede ocurrir por un arco eléctrico muy grande que salte dentro del mismo.
- ii) La opinión de la Industria H.V. de México, S. A., es que el arco saltó al estar el cambiador entre las posiciones 3 y 4 delta, estando el transformador bajo carga (el cambiador es del tipo sin carga).
- iii) Se confirma la existencia de una corriente eléctrica anormal en las bobinas, ya que operó el relevador de sobre-corriente.

f) Protección que otorga la póliza de incendio

- i) No puede considerarse que el accidente hubiera sido por culpa grave del asegurado, ya que la Industria Mexicana de Metales, S.A., hizo revisar sus equipos por expertos el 26 de Julio de 1979 y también en fechas anteriores.
- ii) Como la póliza excluye daños que sufran aparatos eléctricos por corrientes eléctricas, no está cubierto el corto circuito en la fase B, pero si están cubiertos los daños que produjo la explosión y el incendio subsecuente.
- iii) Es improcedente el pago de la manufactura o la reparación de las bobinas o de sus aislamientos. Es indemnizable el valor del cambiador. - (ANSA tiene otro) del mecanismo que lo acciona; las boquillas, el gabinete, el alambrado de --

control y otros bienes por el incendio y la explosión.

- iv) Sólo procedería el pago de la pérdida consequential (si la hubo), causada por la explosión e incendio, pero no la que causó el corto circuito en las bobinas de la fase B.

Ing. Horacio Guadarrama Olivera
Director Técnico

COMPANIA DE SEGUROS ORIENTE, S.A.

6.3).- ANALISIS POR PARTE DE LOS ELABORADORES DE ESTE TRABAJO EN CUANTO AL SINIESTRO DESCRITO ANTERIORMENTE.

Como se ha podido observar en el accidente descrito anteriormente, en donde resultó seriamente dañado un transformador trifásico de 22.32/25 MVA, son varias las hipótesis que se manejan en cuanto a los posibles orígenes de la falla.

Después de haber hecho un análisis de la información presentada, teniendo en cuenta la teoría desarrollada en los capítulos anteriores, creemos que es evidente que el corto circuito en las bobinas de la fase B, fué causado por una corriente eléctrica anormal que detectó el relevador de sobre-corriente y que la explosión fué causada por el arco eléctrico. Asimismo como la micarta que separa el comportamiento del cambiador del tanque, donde se encuentran las bobinas, no fue fracturado y como el núcleo y bobinas del transformador estaban sumergidas en aceite, se puede inferir por tanto que la explosión misma no causó el corto circuito en las bobinas de la fase B, siendo probablemente el origen de ello un agente externo o producto de la progresión de una falla y que debido al mantenimiento preventivo defectuoso efectuado al transformador no fué posible detectar a tiempo la falla.

Esto pone de manifiesto que fallas en el diseño o en la construcción del transformador, progresión de una falla, mantenimiento defectuoso o puesta en servicio anormal. Son aspectos a los cuales se les debe dar importancia primordial para asegurar el correcto funcionamiento de un transformador de potencia.

En el siguiente capítulo se darán algunas recomendaciones para llevar a cabo un buen mantenimiento preventivo, así como también para detectar progresión de fallas.

C A P I T U L O V I I

DESCARGAS PARCIALES Y MANTENIMIENTO

7.1).- GENERALIDADES

En el capítulo anterior, se describió y analizó un accidente ocurrido a un transformador de potencia, que trajo como consecuencia su semidestrucción. Se hizo ver que para evitar un problema de esa naturaleza es conveniente tener en cuenta tres aspectos fundamentales en el transformador: a) diseño y construcción; - b) progresión de fallas y c) mantenimiento.

Tanto el capítulo II como el III, de este trabajo, tratan conceptos fundamentales que deben ser tomados en cuenta para el buen diseño y construcción de un transformador. Este capítulo tiene como objetivo mostrar los aspectos más importantes en la detección de progresión de fallas, así como los puntos primordiales del mantenimiento en transformadores de potencia, con lo cual que darán integradas las ideas principales dentro de la exposición de este trabajo.

7.2).- PROGRESION DE UNA FALLA DEBIDO A DESCARGAS PARCIALES

Una probable causa que puede repercutir en un daño severo a un transformador de potencia, son las llamadas descargas parciales. La medición de descargas parciales se efectúa con los siguientes propósitos principales:

- Verificar que el objeto de prueba esté libre de descargas parciales superiores a una magnitud especificada, a una tensión - especificada.
- Determinar las amplitudes de tensión a las cuales las descargas parciales se inician con tensión creciente, y cesan con -- tensión decreciente.
- Determinar la intensidad de descarga a una tensión específica.

Las mencionadas son descargas eléctricas localizadas en un medio aislante, restringidas a solamente una parte del dieléct-

trico bajo prueba, y que puentean sólo parcialmente al aislamiento entre conductores. Pueden resultar de ionización en cavidades dentro de aislamientos sólidos, en burbuja de gases, en aislamientos líquidos o sobre superficies dieléctricas.

Cada descarga individual en una sola cavidad produce un pulso simple de corriente en el dieléctrico y en el circuito externo.

Aún cuando sólo involucren pequeñas cantidades de energía, las descargas parciales pueden conducir a un deterioro progresivo de las propiedades dieléctricas de los materiales aislantes. Por lo tanto, una descarga parcial, es un tipo de descarga localizada en una porción de un sistema aislante entre dos partes conductoras, resultante de una ionización gaseosa transitoria, -- cuando el gradiente de tensión excede de un valor crítico. Estas descargas pueden ocurrir en zonas adyacentes o no adyacentes a -- las partes conductoras.

A continuación damos las magnitudes relacionadas a descargas individuales.

7.2.1).- CARGA APARENTE "q"

La carga aparente "q" de una descarga parcial es aquella carga que, si se inyectara instantáneamente entre las terminales del objeto bajo prueba, cambiaría momentáneamente la tensión entre sus terminales en la misma cantidad que la descarga parcial misma.

7.2.2).- FRECUENCIA DE REPETICION "n"

Es el número promedio de pulsos* de descargas parciales por segundo.

* En la práctica, solamente se consideran los pulsos -- que son mayores de una magnitud especificada, o dentro de un rango específico.

7.2.3).- ENERGIA "W" DE UNA DESCARGA INDIVIDUAL

Es la energía disipada durante una descarga individual y se expresa en Joules.

Esta energía viene dada por la expresión:

$$W = \frac{\sqrt{2}}{2} q V_i$$

donde:

"q" Es la carga aparente medida.

"V_i" Es el valor correspondiente a la tensión iniciación.

7.2.4).- CANTIDADES INTEGRADAS

De las unidades básicas "q" y "n", pueden definirse - otras cantidades, caracterizadas por adiciones durante un intervalo de tiempo "T". Este intervalo de tiempo debe ser largo comparado con la duración del ciclo de la tensión aplicada al objeto de prueba.

7.2.5).- CORRIENTE DE DESCARGA PROMEDIO "I"

La corriente de descarga promedio "I", es la suma de -- las cantidades rectificadas de carga debido a las descargas parciales que pasan a través de las terminales del objeto bajo prueba, durante un cierto intervalo de tiempo "T", dividido entre este intervalo de tiempo:

$$I = \frac{1}{T} (|q_1| + |q_2| + \dots + |q_m|)$$

Si todas las descargas son de la misma magnitud, q , el valor de I, se simplifica a lo siguiente:

$$I = n |q|$$

7.2.6).- RAZON CUADRATICA "D"

La razón cuadrática "D" es la suma de los cuadrados de las cargas debido a las descargas parciales que pasan a través de las terminales del objeto bajo prueba durante un cierto intervalo de tiempo "T", dividido entre este intervalo de tiempo.

$$D = \frac{1}{T} (q_1^2 + q_2^2 + \dots + q_m^2)$$

Si todas las descargas son de igual magnitud q , el valor de "D" se simplifica a lo siguiente:

$$D = n q^2$$

7.2.7).- POTENCIA DE LA DESCARGA "P"

La potencia de la descarga "p", es la potencia promedio en las terminales del objeto bajo prueba debido a descargas parciales, durante un cierto intervalo de tiempo "T".

Viene dada por la siguiente expresión:

$$P = \frac{1}{T} (q_1 V_1 + q_2 V_2 + \dots + q_m V_m)$$

donde:

$V_1, V_2, V_3, \dots, V_m$, son los valores instantáneos de tensión a través del objeto bajo prueba en los instantes de las descargas q_1, q_2, \dots, q_m .

7.2.8).- VALORES DE TENSION RELACIONADOS CON LAS DESCARGAS PARCIALES

Los valores de tensión durante las pruebas de descargas parciales vienen generalmente dados por su valor de cresta dividido entre $\sqrt{2}$. Los siguientes valores son de interés.

1.- TENSION DE INICIACION DE DESCARGAS PARCIALES "Vi"

La tensión de iniciación de descargas parciales V_i , es la menor tensión a la cual se observa descargas parciales que excedan a una intensidad especificada, bajo condiciones también especificadas, cuando la tensión aplicada al objeto bajo prueba se aumenta gradualmente desde un valor inferior en el cual no se observan tales descargas.

2.- TENSION DE EXTINCION DE DESCARGAS PARCIALES "Ve"

La tensión de extinción de las descargas parciales " V_e " es la tensión a la cual cesan las descargas parciales que excedan una intensidad especificada, bajo condiciones también especificadas, cuando la tensión se hace disminuir gradualmente desde un valor que exceda a la tensión de iniciación.

3.- TENSION DE PRUEBA LIBRE DE DESCARGAS PARCIALES

La tensión de extinción de las descargas parciales, es una tensión aplicada y con un procedimiento de prueba especificados, a la cual el objeto de prueba debe estar libre de descargas parciales que excedan una intensidad especificada.

7.2.9).- INSTRUMENTOS DE MEDICION

Ya que es de vital importancia, evitar la progresión de la falla debido a este tipo de descargas, consideramos que es necesario efectuar y exigir la medición de las magnitudes relacionadas a descargas individuales. A continuación se describen los instrumentos de medición que se utiliza para cada magnitud.

1.- INSTRUMENTOS DE MEDICION DE LA MAGNITUD DE LA MAYOR DESCARGA

Para la magnitud q de la mayor descarga durante cualquier intervalo corto, (del orden de unos pocos ciclos de la tensión de prueba), puede medirse alternativamente con un medidor de picos de descarga con una escala calibrada en pico--

coulombs.

Para mediciones cercanas a la tensión de iniciación, (cuando están involucradas sólo unas pocas descargas por ciclo) el tiempo de resolución del instrumento o la constante de tiempo del voltmetro de cresta son aceptables si no se producen errores en la medición de la amplitud debido al transla-
pe de pulsos, cuando éstos estén separados cuando menos por 100 s. Sin embargo, son convenientes tiempos de resolución -- más cortos que pueden obtenerse con instrumentos disponibles.

2.- INSTRUMENTOS PARA MEDICION DE LA FRECUENCIA DE REPETICION DE PULSOS

Para medir la frecuencia de repetición puede usarse cualquier clase de contadores de pulso o medidores de frecuencia (indicando ya sea el número total de pulsos en un tiempo dado o el número promedio por segundo). Usualmente estos medidores tienen incorporado un discriminador de magnitudes, el cual suprime pulsos menores al de una magnitud previamente ajustada.

Si los pulsos que llegan a las terminales del contador son oscilatorios, debe tenerse precaución para evitar obtener más de una lectura por pulso.

3.- INSTRUMENTOS PARA LA MEDICION DE LA CORRIENTE DE DESCARGA PROMEDIO

Se recomienda en principio el uso de un instrumento que mida el valor promedio de los pulsos de descarga, después de una rectificación y amplificación lineal, y que, calibrado adecuadamente indica la corriente de descarga promedio, I . Se deben tomar precauciones para evitar errores no detectables, ya sea por la sobrecarga del amplificador cuando se tengan frecuencias de repetición, n , de valores pequeños, o so--

breposiciones de pulsos oscilatorios cuando "n" presenta valores grandes.

4.- INSTRUMENTOS PARA LA MEDICION DE LA RAZON CUADRATICA

Se recomienda el uso de un instrumento que mida el valor medio cuadrático de las magnitudes de descargas por segundo, el cual indique la razón cuadrática D. Se puede hacer la medición, haciendo pasar los pulsos amplificados a través de un rectificador que dé una respuesta de forma cuadrática y derivando la componente de C.D., media resultante; o alternativamente, se puede hacer pasando los pulsos desde un amplificador lineal hasta un detector térmico.

5.- ARREGLO PARA LA MEDICION DE LA POTENCIA DE DESCARGA.

Estos son los métodos de trazo de circuito cerrado y el método del puente de Schering modificado; ambos emplean circuitos tipo puente, balanceándose para la frecuencia de prueba.

7.2.10).- CIRCUITOS DE PRUEBAS

En las figuras 7.1, 7.2 y 7.3, se muestran tres circuitos de pruebas básicos diferentes, adecuados para la detección y medición de descargas parciales en equipos de alta tensión.

FIGURA 7.1

El instrumento de medición, en este circuito, se coloca en el lado de tierra del capacitor de acoplamiento. Este arreglo tiene la ventaja de su simplicidad, el objeto bajo prueba es conectado directamente entre la fuente de alta tensión y tierra. Es importante un buen bloqueo del objeto bajo prueba de la fuente de alta tensión para frecuencias dentro del ancho de banda del instrumento (a través de la impedancia Z), de otra manera, los pulsos de descarga pueden pasar a través de la impedancia de la fuente.

FIGURA 7.2

En este circuito, el instrumento de medición se coloca en el lado de tierra del objeto bajo prueba. Por lo tanto, el lado de baja tensión de éste, debe ser aislado de tierra. Este circuito tiene algunas ventajas en la supresión de interferencia; si C_k es -- grande comparada con C_a los disturbios son disminuidos aproximadamente en la razón C_a/C_k

FIGURA 7.3

El arreglo mostrado comprende un circuito balanceado, en el cual el instrumento de medición se conecta entre las impedancias Z_{m1} y Z_m . Tanto el lado de baja tensión del objeto bajo prueba como la capacitancia de acomplamiento se deben aislar de tierra. Las capacitancias de las partes conectadas a Z_{m1} y Z_m no se requiere que sean iguales, pero deben ser preferentemente del mismo orden, y -- para mejores resultados sus factores de pérdidas dieléctricas deben ser similares. El circuito tiene la ventaja de eliminar disurbios externos. Para ajustar esta eliminación se puede conectar una fuente de descarga artificial entre las terminales de alta -- tensión y tierra. Entonces se ajusta la impedancia Z_{m1} y Z_m hasta que se obtiene una mínima lectura del instrumento. Es posible tener razones de reducción desde 3 (para objetos bajo prueba totalmente diferentes) hasta 10000 (para objetos idénticos perfectamente blindados).

FIGURA 7.4

El arreglo mostrado en la figura 7.4, aplicable a objetos bajo -- prueba, equipado con boquillas tipo capacitor, es equivalente al de la figura 7.1, excepto que la capacitancia de la boquilla es -- usada en lugar capacitor de acoplamiento C . Si la boquilla tiene una derivación en la primera lámina intermedia, la impedancia de medición se conecta a esta terminal; en este caso aparece una capacitancia relativamente grande C_m , a través de la impedancia de medición.

FIGURA 7.5

En la figura se muestra una variación del circuito balanceado --

de la figura 7.3 El objeto bajo prueba, puede ser por ejemplo - una muestra corta de un cable en el cual el blindaje o la cubierta metálica es reemplazada por un recubrimiento semiconductor, en caso de que no la tenga sobre una longitud corta aproximadamente en el punto central; el blindaje o la cubierta metálica se deja aislada de las partes aterrizadas de entrada a las boquillas. Se pueden identificar la parte o partes con descargas haciendo ajustes de balance con pares de electrodos de potencial de tierra conectados al puente, mientras que los otros se dejan conectados a tierra.

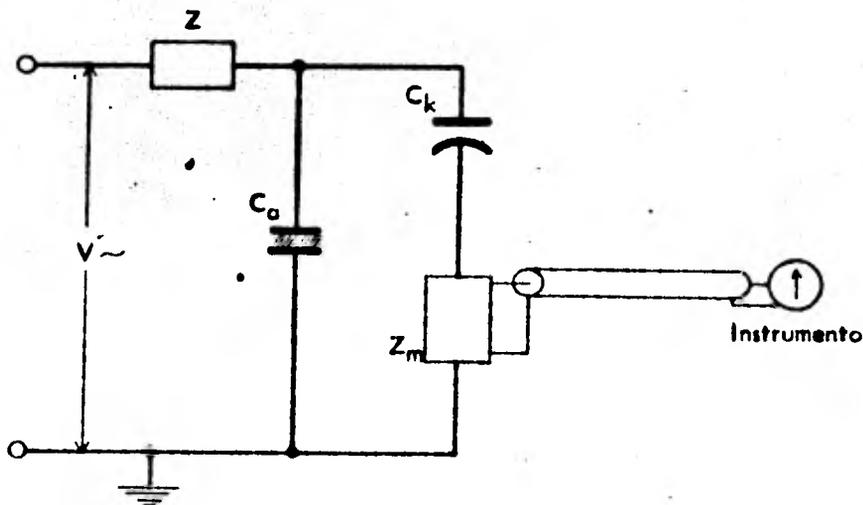


Fig. 7.1.- Instrumentos conectados en serie con el capacitor de acoplamiento.

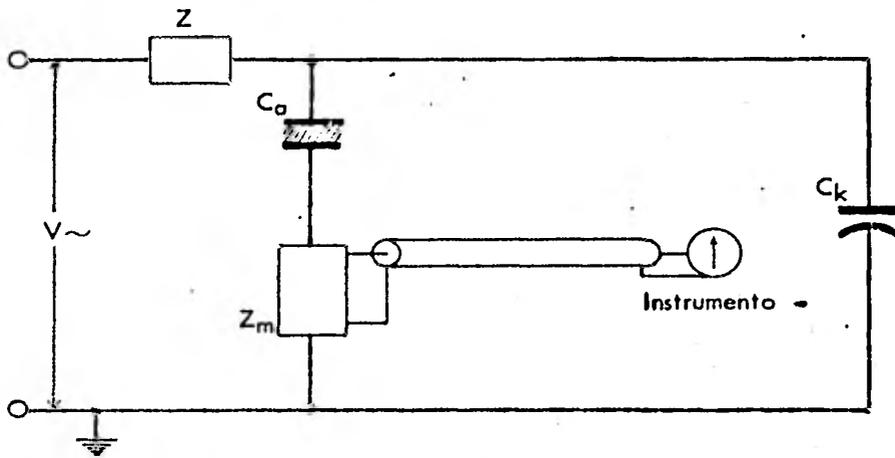


Fig. 7.2.- Instrumentos conectados en serie con el objeto, bajo prueba.

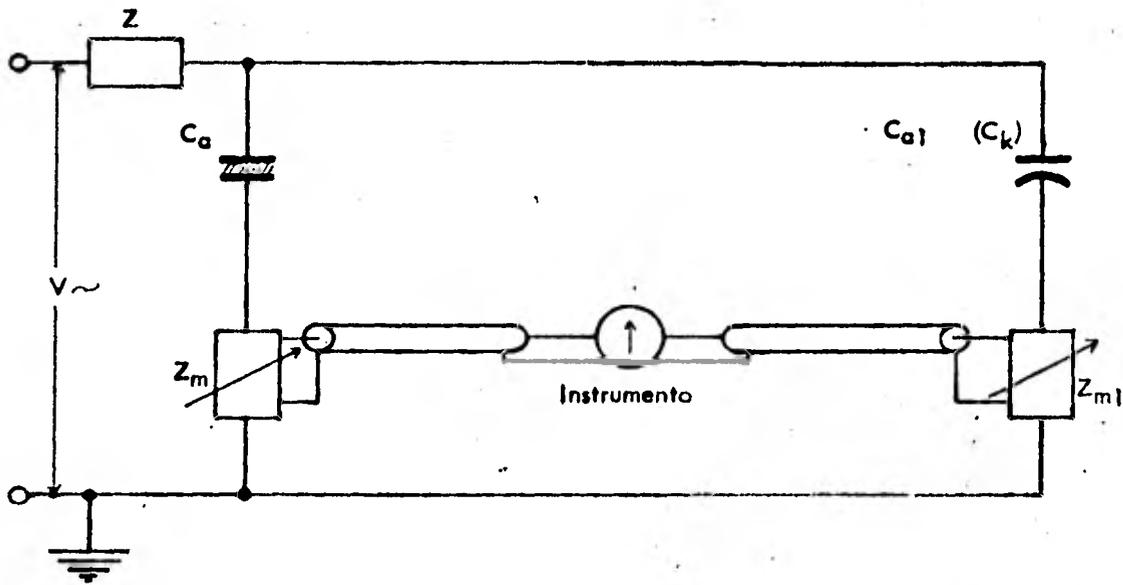


Fig. 7.3.- Arreglo de un circuito balanceado.

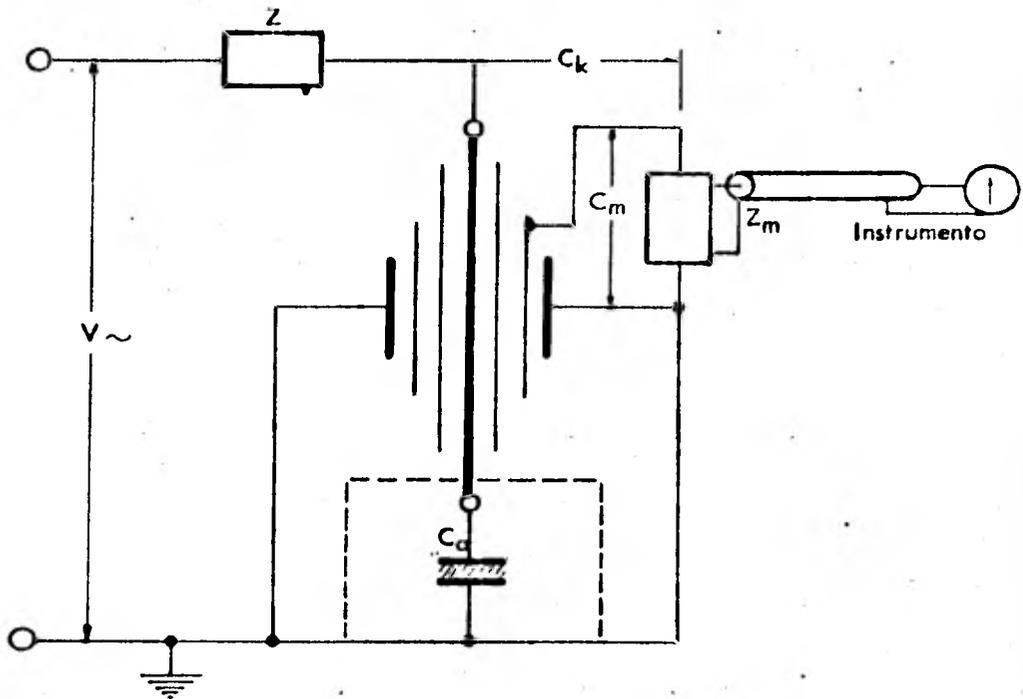
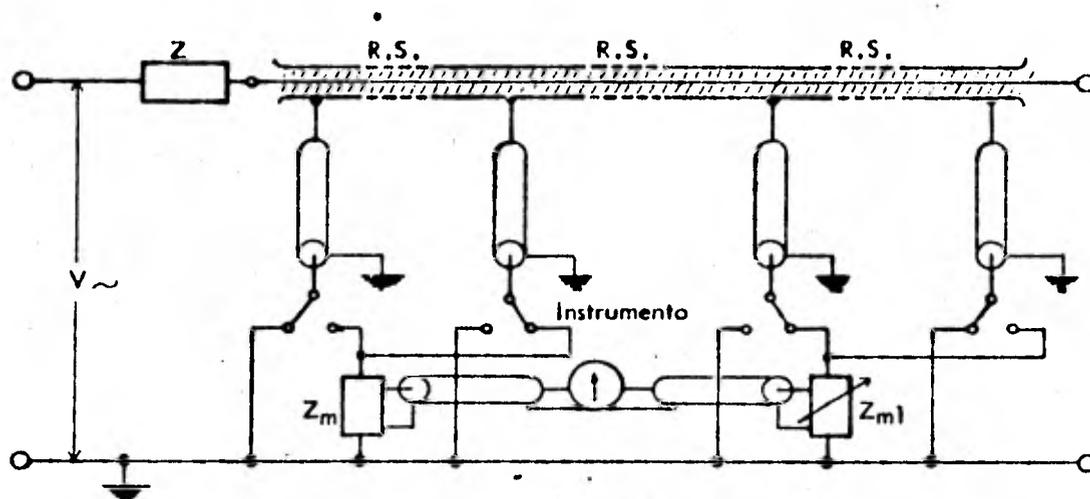


Fig. 7.4.- Circuito de prueba para la medición de descargas parciales en una boquilla con derivación.



R.S. = Recubrimiento semiconductor

NOTA: En la figura se indica como ejemplo el caso de una muestra corta de cable.

Fig. 7.5.- Circuito balanceado modificado para la medición separada de diferentes secciones de un objeto bajo prueba.

De igual forma, los siguientes puntos, son de especial importancia en las mediciones efectuadas con este circuito de prueba.

- Fenómenos de Atenuación.

Debido a la atenuación dentro de devanados o a lo largo de cables, la cantidad medida en una terminal del objeto bajo prueba puede diferir en magnitud con respecto a la existente en el punto donde se origina.

- Fenómeno de resonancia o de reflexión.

La cantidad medida en una terminal de un devanado o cable bajo prueba puede ser modificado por fenómenos de resonancia o por reflexiones en las terminales. Esto es especialmente importante si el instrumento de medición usado tiene una respuesta de frecuencia en banda-angosta.

- Características de Impedancia.

Un objeto bajo prueba con devanados no se comporta como una capacitancia simple C_a , sino frecuentemente tiene las características de una impedancia transitoria, generalmente con una capacitancia agregada en paralelo.

7.2.11).- METODOS NO ELECTRICOS PARA LA DETECCION DE DESCARGAS PARCIALES.

En seguida se describen los métodos no-eléctricos para la detección de descargas parciales.

1.- DETECCION ACUSTICA

Para la localización de descargas se han encontrado --
útiles las detecciones acústicas objetivas, hechas en un cuarto
con bajo nivel de ruido, usualmente afectadas con micrófonos u -
otros transductores y oscilógrafos. Para la localización de des-
carga de corona en aire son útiles los micrófonos direccionales
selectivos con una alta sensibilidad sobre el rango de frecuen--
cias audibles. Para la localización de descargas en equipo sumer-
gido en líquidos aislantes, por ejemplo transformadores, también
se utilizan los transductores piezo eléctricos con oscilógrafos;
los cuales pueden colocarse dentro o fuera del tanque.

2.- DETECCION OPTICA

Se pueden efectuar observaciones visuales en un cuarto
oscuro, una vez que los ojos se han adaptado a la oscuridad y
de ser necesario se utilizan prismáticos de gran apertura. Al--
ternativamente, se pueden tomar fotografías, pero para esto es
necesario un tiempo de exposición largo. Para propósitos espe-
ciales se utilizan a veces fotomultiplicadores.

3.- OBSERVACIONES DE LAS HUELLAS DE DETERIORO.

Cuando es posible efectuar una inspección posterior, --
las marcas, de deterioro que han sido dejadas por las descargas,
pueden dar una información útil para determinar la localización
y la extensión de éstas.

7.3).- MANTENIMIENTO :

7.3.1).- INSPECCIONES DE RUTINA

La frecuencia de inspecciones y pruebas dependerán ---
esencialmente del tamaño del transformador, la carga bajo la --

cual ha estado operando, su edad, su importancia para los planes de producción de la planta, y las condiciones ambientales - en que opera.

Suponiendo que un transformador en una planta particular es crítico para su operación y que su falla pararía toda o gran parte de la producción, el programa de inspecciones rutinarias - de mantenimiento y observaciones que se muestran en la Tabla 7.6 es la más conveniente. Todo este trabajo puede hacerse mientras el transformador se encuentra en servicio. Para analizar la corriente, voltajes, temperatura, presión o nivel de líquido sobre la base de un programa diario u horario, puede resultar conveniente utilizar instrumentos registradores.

TABLA 7.6.- RUTINA O PROGRAMA DE INSPECCION OPERACIONAL

RENGLONES A INSPECCIONAR	PROGRAMA RECOMENDADO
1. Corriente de carga (amperes)	Cada hora o usar <u>amperímetro</u> registrador.
2. Voltaje	Cada hora
3. Temperatura ambiente	Cada hora
4. Temperatura de los devanados	Cada hora
5. Temperatura del líquido	Cada hora
6. Presión del gas (tanque)	Cada hora
7. Nivel del líquido	Diario
8. Equipo de sellado automático del gas.	
a) Indicador de presión de gas del transformador	Diario
b) Contenido de gas del cilindro.	Diario
c) Circuito de alarma de baja presión	Trimestral
d) Equipo externo de gas y herrajes	Semestral
9. Equipo de enfriamiento de agua	
a) Temperatura del agua dentro y fuera	Semanal
b) Velocidad del gasto de agua	Semestral
c) Bombas de agua	Mensual
d) Bombas de circulación del aceite	Mensual
10. Equipo de enfriamiento FOA o FA	
a) Ventiladores.- aspas y motores por acumulación de suciedad	Mensual
b) Cojinetes de ventiladores lubricación	Cada dos años o después - de 6000 horas de operación lo primero que ocurra
c) Intercambiador de calor - (núcleo del radiador)	Anual
11. Transformadores tipo seco (enfriados con aire forzado), temperatura del aire dentro y fuera.	Cada hora

En cuanto a los accesorios auxiliares y otros renglones que normalmente requieren que el transformador sea desconectado la Tabla 7.7 muestra los programas de inspección más convenientes.

TABLA 7.7.- PROGRAMA DE INSPECCION DE MANTENIMIENTO CRITICO.

RENGLONES A INSPECCIONAR	PROGRAMA
1. Tanque, accesorios y empaques por fugas, herrumbes, etc.	Semestral
2. Dispositivos de liberación de presión	Trimestral
3. Boquillas	Semestral
4. Apartarrayos	Semestral
5. Cambiadores de derivación	Semestral
6. Equipo de control, relevadores y circuitos	Mensual
7. Conexiones de tierra	Semestral
8. Alarma de protección	Mensual
9. Análisis de gas	Anual
10. Prueba de presión de bobinas de enfriamiento o intercambiador de calor externo.	Anual

En el caso de transformadores críticos (con demasiado uso) se recomienda asimismo la lista de pruebas eléctricas que aparecen en la Tabla 7.8

TABLA 7.8.- PROGRAMA RECOMENDADO DE PRUEBAS DE MANTENIMIENTO

PRUEBA DE MANTENIMIENTO	PROGRAMA
1. Líquido aislante	
a) Resistencia dieléctrica	Anual
b) Número de neutralización	Anual
c) Color	Anual
2. Resistencia de aislamiento	Anual
3. Índice de polarización	Anual
4. Factor de potencia	Anual
5. Alto potencial de CA (Hi-Pot)	Cada 5 años
6. Prueba de voltaje inducido	Cada 5 años

Los transformadores más nuevos en aplicaciones de menor importancia pueden no requerir tanta atención. Por otra parte, - los transformadores para horno o rectificadores, que a menudo -- son sometidos a severos ciclos de operación, requieren de aten-- ción más frecuente. Los transformadores de potencia en ambientes químicos, abrasivos, o de rocío de sal y aquellos que sabemos -- que van a ser sobrecargados, deben también contar con inspección más frecuente así como mantenimiento.

7.3.2).- CARGA, VOLTAJE, CORRIENTE

En la Tabla 7.6 se puede notar que el énfasis primor--- dial se encuentra en la carga y en los registros de temperatura. La mayoría de las compañías de hoy en día se encuentran sometidas a presiones para aumentar la producción, y a menudo el aumen-- to se obtiene a base de hacer trabajar más rápida y duramente la maquinaria existente o simplemente agregando maquinaria de pro-- ducción. Cualquiera de las dos alternativas aumenta la carga en el sistema eléctrico. Los registros diarios y continuos de la co-- rriente y el voltaje asegurarán que el transformador se encuen-- tra operando dentro de los límites de diseño. También mostrarán si el cambiador de derivaciones está en la posición correcta pa-- ra la carga que está alimentando.

7.3.3).- TEMPERATURA

Los registros de temperatura son particularmente útiles para indicar cuando el transformador está sobrecargado o cuando existe una condición anormal dentro del transformador mismo. - Si por ejemplo, la temperatura es de 5°C más alta que la regis-- trada con anterioridad para la misma carga, excitación, y condi-- ciones ambientales, significa que puede haber un problema en al-- gún lugar del sistema de enfriamiento o en el líquido dieléctri-- co de la unidad.

Bajo cargas nominales y condiciones ambientales normales, las temperaturas de operación no deben exceder los valores dados en las normas de la ASA (American Standar Association) No. C-57-12.05.110. La operación de un transformador a temperaturas por encima de las recomendadas, resultarán a menudo en deterioro acelerado del líquido dieléctrico y puede afectar la vida del aislamiento sólido. La temperatura de la parte superior del líquido por si sola no es indicador confiable de condiciones admisibles de sobrecarga dentro de un transformador, porque el aumento de temperatura del punto más caliente con respecto a la temperatura de la parte superior del líquido varía ampliamente para los distintos métodos de enfriamiento y las diferentes cargas.

Cuando es necesario operar un transformador continuamente, o por períodos largos, con una sobrecarga debe hacerse dentro de los límites señalados en el Apéndice de ASA C-57.92 que presenta: "Guía para la carga de Transformadores de distribución y de potencia sumergidos en aceite".

7.3.4).- INSTRUMENTOS INDICADORES

Se notará que en la Tabla 7.6 también se pide la lectura periódica y registro de temperaturas, presiones, niveles de líquido y así sucesivamente de los instrumentos accesorios del transformador mismo. Debe señalarse que, aunque estos dispositivos por lo general son de alta calidad y confiabilidad, a menudo son instrumentos de tipo mecánico o tipo Bourdon, y en años de servicio se encuentran sujetos a corrosión, desgaste y daño. Estos deberán retirarse, inspeccionarse y calibrarse cada dos o tres años.

7.3.5).- ACCESORIOS DE PROTECCION

Los accesorios de protección tales como alarmas de temperatura de líquidos, diafragmas de liberación de presión, de

tectores de gas y relevadores de presión, deben examinarse con regularidad para asegurarse de que se encuentran ajustados adecuadamente y de que cada uno funcionará cuando se requiera.

Los diafragmas rotos deben reemplazarse inmediatamente y deberá determinarse la causa de su ruptura. En muchos casos, un diafragma agrietado permite que penetre el aire húmedo en el tanque y que contamine el aislamiento o líquido dieléctrico. Cuando se descubre una rajadura, debe iniciarse de inmediato un programa de pruebas de aceite y eléctricas.

La mayoría de los transformadores tienen cambiadores de derivación los que permiten cambios en la relación de voltaje -- cuando varían las cargas o los voltajes de línea. Con el transformador desprovisto de energía debe operarse el cambiador de derivaciones en todas sus posiciones y deberán inspeccionarse cuidadosamente en cuanto a corrosión, desgaste y fugas en el sellado del aceite. Cuando se hace posible la inspección interna, cada posición del cambiador deberá chequearse en cuanto a resistencia de contacto, desgaste de los contactos y presión del resorte.

Las porcelanas de las boquillas deben inspeccionarse regularmente en cuanto a rajaduras, despostilladuras y fugas de aceite, y deben mantenerse razonablemente libres de polvo y suciedad.

En localizaciones difíciles en que el transformador puede estar sujeto a rocío de sal, atmósfera química, polvo de cemento o tormentas de arena abrasiva, puede ser necesario inspeccionar y limpiar las boquillas más frecuentemente que cada seis meses para reducir al mínimo las posibilidades de un arco en las mismas.

Todos los circuitos de control deben chequearse regularmente en cuanto a su voltaje adecuado; desgaste; partes rotas o faltantes; conexiones sueltas; corrosión; evidencia de sobrecarga.

lentamiento o arqueo; y atascamiento o ligamiento de las partes móviles.

Cuando sea posible, las funciones eléctricas y mecánicas deben chequearse para asegurar una secuencia y tiempo, etc. -- adecuados.

Los tanques, reguladores de presión, válvulas, indicadores, tubos, mangueras y conexiones deben inspeccionarse y chequearse en su operación cuando menos dos veces al año.

Las bombas de agua, bombas de aceite, ventiladores y su equipo de control correspondiente, utilizados en transformadores enfriados con agua, con aceite a presión o con aire a presión deben chequearse cada mes y deben limpiarse y reacondicionarse según las recomendaciones del fabricante del equipo.

Los transformadores de diseño más reciente están a menudo equipados con relevadores de detección de gas, los que suenan una alarma o dan una señal cuando cantidades significativas de gas se forman a causa de una falla de arqueo bajo el líquido dieléctrico. Desafortunadamente, una falla lo suficientemente masiva para disparar el relevador detector a menudo romperá el diafragma liberador de presión, y la unidad será retirada de la línea.

La producción de gas en un transformador sellado también puede ocurrir lentamente en cantidades pequeñas debido a sobrecargas de tiempo corto, efecto corona interno o, barras de tierra flojas, o pernos del núcleo a tierra. En una unidad grande que tenga un accesorio de muestra de gas, el análisis del gas -- que está encima del aceite, a menudo revelará el problema interno antes de que ocurra una falla seria. En algunos casos, es posible determinar la naturaleza del problema por el tipo y cantidades de cada gas presente. Aunque esta prueba se realiza usualmente una sola vez al año, durante un paro, en algunos transfor-

madores es posible tomar muestras de gas cuando están energizados.

7.3.6).- TANQUE Y ACCESORIOS

El tanque, los radiadores y los accesorios de un transformador moderno generalmente están protegidos por un sistema de capa múltiple de pintura que ha sido horneada.

El acabado resultante es una superficie dura y brillante parecida a la de un automóvil, y que dura un tiempo largo. Pero no durará toda la vida del transformador. Las variaciones extremas de temperatura, la exposición a los elementos, la luz del sol, sal, niebla, humos industriales, condensación, humedad y polvo abrasivo causan inevitablemente deterioros que hacen necesario su reacabado.

7.3.7).- REPARACION DE FUGAS

Antes de volver a pintar, el tanque y los accesorios deben ser cuidadosamente inspeccionados y todas las fugas de aceite reparadas.

Las fugas de aceite en los empaques de las uniones puede detenerse a menudo por medio del apretado de los pernos. Si esto no detiene la fuga, deben instalarse nuevos empaques, los transformadores más modernos cuentan con empaques sintéticos tales como de Nitrilo, hule silicón o Copreno. Estos nuevos materiales para empaques no deben usarse para reemplazar los viejos empaques de corcho a menos que estén protegidos contra la sobrecompresión por medio de topes mecánicos adecuados.

Las fugas de aceite en las soldaduras pueden repararse soldándolas con estaño, con soldadura fuerte o de latón (soplete)

o con soldadura eléctrica. Cuando se usa soldadura eléctrica, es generalmente más satisfactorio y menos peligroso aplicarla si el punto a soldar está bajo el aceite. La filtración de aceite a través de la fuga puede ser por lo general detenida haciendo un ligero vacío en el tanque hasta que se termine de soldar. Para pequeñas fugas alrededor de las soldaduras y de los tubos del radiador, también es posible obtener una reparación permanente poniendo una masilla epóxica que se puede adquirir en el mercado en forma de conjunto o juego (Kit).

7.3.8).- PINTURA

Para que el trabajo de recabado de un tanque dure tanto como la pintura original, debe hacerse cuidadosamente y de manera completa. Para que cualquier trabajo de pintura sea duradero, la superficie debe prepararse adecuadamente. Toda la pintura suelta, ampollas, costras, herrumbre, aceite, grasa y humedad deben suprimirse. Si la pintura vieja está muy mala, por lo general es necesario quitarla por completo.

En tanques con superficie plana y accesible, la pintura puede quitarse con chorro abrasivo. El óxido de aluminio, la arena o los perdigones realizan un excelente trabajo. Los tanques con radiadores o tubos de enfriamiento con frecuencia no pueden ser raspados o limpiados por medios mecánicos; de manera que es necesario, hacerlo químicamente.

Después de años de experimentar se ha encontrado que el más rápido, satisfactorio y económico modo de limpiar químicamente es el de utilizar el método de flujo.

Básicamente se hace de la siguiente manera:

- 1.- Se quitan todos los ventiladores, medidores y accesorios.

- 2.- Los cambiadores de derivaciones, boquillas y cualquier herraje que no puedan quitarse se cubrirán -- con un forro de hule. Se colocan alrededor de la base del transformador, colectores para atrapar o recoger el limpiador químico y el fondo del transformador se cubre de tal manera que la solución y la pintura removida fluya a los colectores.
- 3.- El desmoldador o limpiador químico más comunmente usado es una solución álcali a la que se agrega un agente humedecedor. Como este tipo de solución quita la pintura más rápidamente cuando está caliente se mantiene aproximadamente a 82°C en un tanque externo o tina y de ahí se bombea a través de las mangueras y boquillas. Debe fluir continuamente sobre una porción de la superficie pintada.
- 4.- Las fuertes sustancias químicas hacen que la pintura se amolle y finalmente se descascare y caiga -- dentro de los colectores. La solución ya usada y recogida en los colectores de escurrimiento puede ser tamizada, colocada otra vez en la tina de calentamiento y utilizada nuevamente.
- 5.- Después de que toda la pintura se ha suavizado y ha formado ampollas, la que no se haya desprendido, se quita con un limpiador de vapor.
- 6.- A continuación la superficie metálica desnuda o --- limpia es neutralizada limpiándola con un chorro de una solución ácida suave. Soluciones diluidas en dicromato de potasio o ácido fosfórico y agua son agentes neutralizantes muy satisfactorios.
- 7.- Después de la neutralización, el tanque se vuelve a limpiar con vapor para quitarle la solución de ácido.

8.- Cuando la pintura se ha quitado por completo, todas las manchas de costras y herrumbre se limpian con cepillo de alambre o con chorro de abrasivo a presión y a la superficie entera se le aplica una capa de imprimador inhibidor de herrumbre. Si el tanque no ha sido limpiado por completo, sólo en los lugares en que se haya dejado el metal al descubierto o limpio deberá ponerse pintura base.

9.- Las capas de pintura base y las de acabado puede aplicarse con pulverizador o con brocha.

En los tanques en que los tubos de enfriamiento dificulten el recubrimiento completo, de pintura con pulverizador o brocha, resulta muy satisfactorio el método del flujo de pintura. - Como en el caso del método de flujo, para la limpieza hay que -- arreglar los colectores alrededor de la base del transformador y utilizar una cubierta para dirigir toda la pintura a un recipiente. Después de que todos los accesorios y las boquillas del transformador han sido adecuadamente cubiertos con papel y cinta masking, se bombea la pintura desde el recipiente a través de las - mangueras y boquillas (del equipo de pintura) y se dirige de modo que fluya sobre todas las superficies a ser pintadas. Las pequeñas bombas de engranes son muy satisfactorias para bombear la pintura y las boquillas por lo general son aplanadas y ligeramente curvas para que alcancen las áreas normalmente innaccesibles.

C O N C L U S I O N E S

Del análisis realizado en los capítulos anteriores, en cuanto a las posibles causas que pueden traer como consecuencia, la explosión de un transformador de potencia, se puso de manifiesto que fallas en su diseño o construcción, progresión de una falla, mantenimiento defectuoso o puesta en servicio anormal, son aspectos a los cuales se les debe dar importancia primordial para asegurar su correcto funcionamiento y evitar al máximo dichos fenómenos.

Por lo que respecta al mantenimiento preventivo, hemos podido constatar en visitas efectuadas a la industria, que en nuestro país poca importancia se le ha dado, llegándose al caso de industrias que no llevan ni el mínimo control de los servicios prestados a sus transformadores, es por eso que dentro de las medidas que se proponen en este trabajo para evitar la posible explosión de un transformador, se le ha dado prioridad a ese aspecto, haciéndose ver que entre mejor mantenimiento se le preste a un transformador su período de vida será mayor.

En cuanto a las condiciones que piden actualmente las compañías de seguros para brindar protección a transformadores de potencia, existen ciertas anomalías que resultan perjudiciales para ellas, pues no se exige a los asegurados, un registro del control de calidad del transformador al salir de fábrica, ni tampoco una bitácora de mantenimiento al mismo, siendo que deberían ser solicitadas debido a las razones expuestas con anterioridad.

B I B L I O G R A F I AA) LIBROS

- 1) CAMARENA M., PEDRO
Transportadores eléctricos industriales. Preparación, diseño y construcción.
México, Compañía Editorial Continental, 1973.
- 2) E.E. STAFF DEL MIT
Circuitos Magnéticos y Transformadores.
Madrid, Reverté, 1969.
- 3) ENCICLOPEDIA CEAC., DE ELECTRICIDAD
Transformadores y convertidores.
- 4) FRANCOIS A., JEAN
Electrotecnia.
Madrid, Larousse, 1975.
- 5) GOURISHANKAR, VEMBU
Conversión de energía electromecánica.
Traducción de la 1a. edición de 1965.
México, Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A. 1977.
- 6) LIWSCHITZ G., MICHAEL
Máquinas de corriente alterna.
México, Compañía Editorial Continental, 1970

- 7) LUCA M., CARLOS
Máquinas Eléctricas (Teoría y Aplicaciones)
México. Ediciones Calpe, 1963.

- 8) PACHECO V. HECTOR
Transformadores.
México. Editorial de Libros Técnicos H.P. 1977

- 9) ROJO P., MARINO
Protección de Sistemas de Potencia por Medio de Relevadores.
México. Editorial Técnica Editec. 1969.

- 10) RUSELL M., C.
El Arte y la Ciencia de la Protección por Relevadores.
México. Compañía Editorial Continental S.A. 1980.

- 11) ZOPPETI J., GAUDENCIO
Estaciones Transformadoras y de Distribución.
Barcelona. Ed. Gustavo Gili, S.A. 1972

B) ARTICULOS DE REVISTAS.

NAVA, RAFAEL

"Inspección, Prueba y Mantenimiento de Transformadores de Potencia". En: Ingeniería Mecánica y Eléctrica.
A.M.I.M.E., Junio de 1980. P.7-17

C) NORMAS

COMITE CONSULTIVO NACIONAL DE NORMALIZACION DE LA INDUSTRIA ELECTRICA.

- Norma 2.1-2 Oct. 1975. "Transformadores de Potencia"
- Norma 8.8-1 Abr. 1974 Aceite Aislante no inhibido para Transformadores.