

UNIVERSIDAD LA SALLE
ESCUELA DE INGENIERIA
INCORPORADA A LA UNAM.

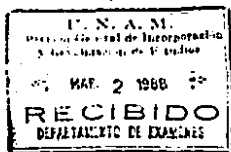
300617
76
2y

CRITERIOS DE SELECCION DE UN
TRANSFORMADOR SUMERGIDO EN
ACEITE TIPO SUB-ESTACION DE
500 A 5,000 KVA Y VOLTAJES
NO MAYORES A 34,500 VOLTS.

TESIS PROFESIONAL
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
PRESENTA
GUILLERMO PEREZ PERALTA

Mexico, D.F.

1968





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.

I N D I C E

	Página
INTRODUCCION	
CAPITULO I	
PRINCIPIOS BASICOS DEL TRANSFORMADOR	1
1. LEYES FUNDAMENTALES	2
2. PRINCIPIO DE OPERACION	7
3. PARAMETROS PRINCIPALES	9
4. TRANSFORMADORES TRIFASICOS	18
CAPITULO II	
CARACTERISTICAS DE CONSTRUCCION DE UN TRANSFORMADOR TRIFASICO TIPO SUB-ESTACION	23
1. NUCLEO TIPO COLUMNA	26
2. BOBINAS O DEVANADOS	29
3. LIQUIDO AISLANTE. ACEITE	31
4. TANQUE	34
CAPITULO III	
SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO Y ACCESORIOS DE UN TRANSFORMADOR TIPO SUB-ESTACION	36
1. SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO	37
2. ACCESORIOS DE UN TRANSFORMADOR	41
3. EQUIPOS OPCIONALES DE UN TRANSFORMADOR	50

	Página
CAPITULO IV	
MÉTODOS DE PRUEBA	56
1. PRUEBAS DE PROTOTIPO	59
2. PRUEBAS DE RUTINA	60
3. PRUEBAS OPCIONALES	67
4. PRUEBAS DE ACEPTACION	68
CAPITULO V	
CRITERIOS DE SELECCION DE UN	
TRANSFORMADOR DE MEDIA POTENCIA	
TIPO SUB-ESTACION SUMERGIDO EN	
ACEITE	69
1. CRITERIOS DE SELECCION DE	
ACUERDO AL LUGAR DE OPERACION	71
2. CRITERIOS DE SELECCION DE	
ACUERDO A LAS CARACTERISTICAS	
ELECTRICAS	74
3. CRITERIOS DE SELECCION DE	
ACUERDO A LAS CARACTERISTICAS	
TERMICAS	80
4. CRITERIOS DE SELECCION DE	
ACUERDO A LAS CARACTERISTICAS	
MECANICAS	82
5. CONCLUSIONES	83
CONCLUSIONES	85
APENDICE I	
TABLAS DE DATOS NOM-J-284.	
APENDICE II	
NORMAS APPLICABLES A TRANSFORMADORES	
BIBLIOGRAFIA	

INTRODUCCION

La transmisión y distribución de energía eléctrica encontró, el siglo pasado, su base en el transformador, al cual se le considera hoy en día como el corazón de la industria moderna, ya que gracias a él podemos aprovechar la energía eléctrica que se produce a muchos kilómetros del lugar de utilización con un costo de instalación relativamente bajo.

Debido a la explosión demográfica mundial, la cual no es ajena a nuestro país, la demanda de energía eléctrica crece en forma exponencial a través del tiempo; paralelamente la industria se ha visto obligada a desarrollar más plantas industriales, así como mayores y mejores productos para satisfacer las necesidades básicas de la gente.

El transformador juega un papel sumamente útil en la industria, ya que es el que permite la utilización de la energía eléctrica por los consumidores a las tensiones más adecuadas al uso destinado.

Para un industrial es de vital importancia asegurarse que los materiales y equipos que se adquieren para sus instalaciones cumplan con determinadas especificaciones de construcción y calidad, ya que con esto minimizará los problemas que durante la implantación y operación de las mismas pudieran presentárseles. No debemos olvidar que el transformador es parte vital de la planta y su costo representa una inversión considerable por lo que se debe realizar un cuidadoso proceso de selección del mismo.

La mediana y gran industria nacional, que son quienes comúnmente - utilizan el tipo de transformador a tratar en el presente trabajo, no siempre cuentan, desafortunadamente, con un departamento completo de proyectos para realizar la correcta selección del equipo, comprándose en su mayoría un equipo que cumple con lo requerido al momento de arranque de la operación, pero que al paso del tiempo - se demuestra que la selección no fue la adecuada ya que la capacidad seleccionada no fue la correcta, el sistema de enfriamiento no fue el mas adecuado para las condiciones ambientales y de operación, o la incorrecta selección de accesorios o sistema de preservación de aceite que al quererse implantar ahora, representa una fuerte inversión.

Debido a lo anterior el presente trabajo pretende orientar a cualquier persona involucrada en la selección de transformadores en el conocimiento básico del equipo, para la correcta elección del mismo.

Dicho trabajo de tesis no pretende ser un manual de selección de transformadores, sino ser una referencia clara y concisa para la realización de dicho proceso, para lo cual analizaremos en primer término cuales son los principios teóricos en que se basa la operación del equipo, así como sus principales parámetros. Una vez estudiada la teoría pasaremos al transformador práctico, analizando sus principios de construcción, así como los sistemas de preservación de aceite, sistemas de enfriamiento y accesorios, de los cua--

les conoceremos cuales son y que alternativas existen.

Tal y como comentamos anteriormente, es importante que el transformador cumpla con determinadas especificaciones de construcción y calidad por lo que es conveniente revisar cuales son los métodos de prueba establecidos y aplicables en un transformador tipo subestación para la aceptación y certificación de que el equipo se fabricó tal y como fue solicitado.

Por último, y en base a lo establecido en los primeros capítulos, se proponen algunos criterios de selección para un transformador trifásico sumergido en aceite de 500 a 5,000 KVA y voltajes no mayores a 34,500 volts. Cabe mencionar que dichos criterios pueden ser los mas representativos, mas no los únicos, ya que el ingeniero de selección o proyectos será quien determine su especificación óptima de acuerdo a su proyecto.

CAPITULO I

PRINCIPIOS BASICOS DEL TRANSFORMADOR

En este primer capítulo de nuestro trabajo analizaremos los principios teóricos del transformador, el cual es un aparato estático que puede transferir energía de un circuito eléctrico de corriente alterna a otro por medios electromagnéticos, realizando una transformación de voltajes y corrientes entre los circuitos, y no existiendo contacto eléctrico entre los dos.

Para el mejor entendimiento de este capítulo lo hemos dividido en tres partes:

- a) Leyes fundamentales.
- b) Principio de operación.
- c) Parámetros principales.

De esta manera, conoceremos en que se fundamenta el transformador, como funciona y cuales son los parámetros fundamentales que debemos conocer.

1. LEYES FUNDAMENTALES.

Para una mejor comprensión y entendimiento del principio de operación, es conveniente considerar las siguientes leyes fundamentales:

1.1 Ley de Oersted.

Cuando por un conductor circula una corriente, alrededor de dicho conductor se origina un campo magnético cuyo sentido depende del sentido de la corriente. Figura No. 1.

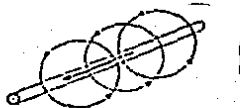


Fig. 1. Ley de Oersted.

Como podemos ver en la figura No. 1, el sentido del flujo del campo magnético se puede determinar de la siguiente manera: el dedo pulgar de nuestra mano muestra la dirección de la corriente y el resto de los dedos nos indican el sentido del flujo magnético.

1.2 Ley de Faraday.

Cuando se mueve un conductor cortando las líneas de un campo magnético, existiendo un movimiento relativo entre campo y conductor, se genera una fuerza electromotriz (FEM) en las terminales del conductor cuya magnitud depende de la intensidad del campo, de la velocidad con que el conductor corta las líneas y por supuesto depende también del número de conductores. Lo anterior se expresa matemáticamente de la siguiente manera:

$$E = -N \frac{d\phi}{dt} = Blv$$

En la figura No. 2 podemos ver como se realiza este fenómeno, el cual tiene un movimiento rectilíneo del conductor.

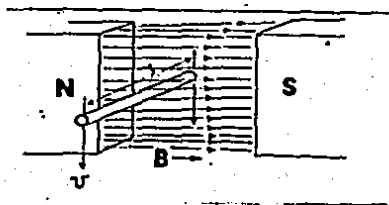


Fig. 2. Ley de Faraday.

Ahora bien si el conductor gira, cortará las líneas de campo, generando también una FEM. Figura No. 3.

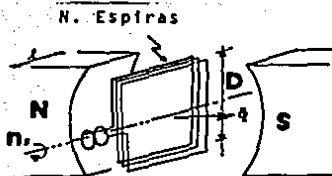


Fig. 3. Ley de Faraday.

1.3 Ley de Lenz.

La ley de Lenz establece que una corriente inducida tiene siempre una dirección tal que se opone a la causa que la produce.

1.4 Leyes de kirchoff.

Existen dos leyes de kirchoff fundamentales:

- a) La suma vectorial de las caídas de voltaje en un circuito es igual a la suma de las fuentes que se encuentran en él. Figura No. 4.

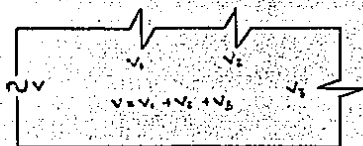


Fig. 4. Ley de kirchoff (Mallas)

- b) La suma de las corrientes que entran en el nodo de un circuito eléctrico es igual a la suma de las corrientes que salen de dicho nodo. Figura No. 5.

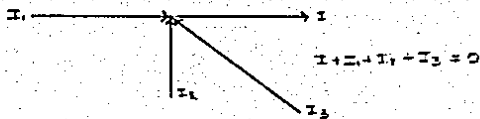


Fig. 5. Ley de kirchoff (Nodos)

1.5 Ley de Ohm.

En una malla de una red eléctrica sencilla el voltaje será igual al producto de la resistencia existente por la corriente que pasa a través de ella. Figura No. 6.



Fig. 6. Ley de Ohm.

A continuación presentamos un resumen de las fórmulas de la ley de ohm.

$E \times I$	$\frac{E^2}{R}$	$\frac{D}{E}$	$\frac{E}{R}$
$I^2 \times R$	Watts (P)	Amps (I)	$\frac{P}{R}$
$\frac{E^2}{P}$	Ohms (R)	Volts (E)	$P \times R$
$\frac{E}{I}$	$\frac{D}{I}$	$\frac{D}{I}$	$I \times R$

2. PRINCIPIO DE OPERACION.

El principio de operación del transformador se basa en la transferencia de energía eléctrica por inducción de un embobinado y arrollamiento a otro. Para poder comprender esto analicemos - las siguientes consideraciones:

- a) Como vimos anteriormente, cuando por un conductor enrollado en espiras se hace circular una corriente se produce un flujo magnético, tal y como se muestra en la figura No. 7.

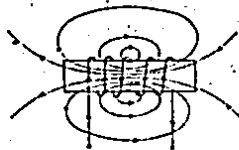


Fig. 7. Flujo originado en una bobina con núcleo de aire.

- b) Si este mismo enrollamiento o embobinado se desarrolla - sobre un núcleo de material ferromagnético, se produce un campo concentrado con un camino principal determinado por el circuito del material magnético. Como el campo es alterno su frecuencia dependerá de la frecuencia de la fuente. Figura No. 8.

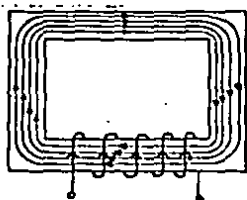


Fig. 8. Flujo que se origina en una bobina con núcleo ferromagnético.

- c) De acuerdo a la ley de Faraday si realizamos un segundo enrollamiento en el mismo núcleo de material ferromagnético descrito en el inciso anterior, obtendremos una FEM inducida en las terminales de este segundo conductor. -
Figura No. 9.

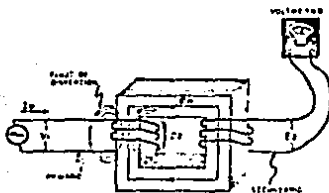


Fig. 9. FEM inducida en el secundario a partir del campo creado por el primario.

- d) Si cerramos el circuito del secundario por medio de una carga circulará una corriente I_2 cuyo sentido, de acuerdo a la ley de Lenz, tendrá que ser tal que el flujo que

genere dicha corriente I_2 se deberá oponer al flujo principal, el cual fue originado por I_1 .

En resumen, podemos decir que cuando realizamos dos enrollamientos en un mismo núcleo y aplicamos una corriente a uno de ellos, este conductor generará un flujo magnético, el cual tendrá su campo a lo largo del núcleo ferromagnético. Dicho flujo al pasar por el segundo enrollamiento ocasionará una FEM - en este segundo embobinado el cual generará un flujo de sentido opuesto al principal. De esta manera se está realizando una transferencia de energía eléctrica de un circuito a otro, sin cambio de frecuencia y realizándose el contacto entre dichos circuitos por medio de un circuito magnético común.

3. PARAMETROS PRINCIPALES.

A continuación analizaremos los principales parámetros de un transformador.

3.1 Voltaje y corriente.

En todo transformador los voltajes primario y secundario inducidos se relacionan entre sí por la razón del número de vueltas que tengan el primario y el secundario, lo cual matemáticamente se expresa:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

lo anterior se deriva de la ecuación general del transformador, la cual nos dice:

$$E = 4.44 f N \phi_m \times 10^{-8} \text{ volts.}$$

donde:

E = voltaje inducido.

f = frecuencia.

N = número de vueltas del devanado.

ϕ_m = flujo mutuo.

dicha ecuación si la aplicamos para el secundario y el primario y las dividimos entre sí obtendremos:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{4.44 f N_p \phi_m \times 10^{-8}}{4.44 f N_s \phi_m \times 10^{-8}} = \frac{N_p}{N_s}$$

El transformador es extremadamente eficiente porque las únicas pérdidas que tiene son de dos tipos:

- a) Pérdidas de cobre del devanado (I^2R)
- b) Pérdidas de hierro del núcleo (pérdidas por histéresis y por corrientes de eddy o parásitas).

Además, tiene la gran ventaja de no tener pérdidas por rotación o movimiento que son presentadas por las demás máquinas eléctricas. Por lo tanto, si consideramos una eficiencia ideal del 100%, podemos suponer que la potencia de entrada es igual a la potencia de salida, es decir:

$$E_p \times I_p \times \cos \phi_p = E_s \times I_s \times \cos \phi_s.$$

y generalmente el factor de potencia del secundario ($\cos \phi_s$) es igual al factor de potencia del primario ($\cos \phi_p$), por lo que podemos decir:

$$E_p \times I_p = E_s \times I_s$$

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

y por lo tanto:

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p}$$

por lo que concluimos que la relación de voltajes, así como la relación de vueltas son proporcionalmente inversas a la relación de corriente.

3.2 Relación de transformación.

La relación del número de vueltas, así como la relación de voltajes inducidos es llamada relación de transformación y se representa por el símbolo a .

$$a = \frac{N_p}{N_s} = \frac{E_p}{E_s}$$

Debido a que el voltaje primario de entrada V_p y el voltaje secundario de carga V_s son prácticamente iguales a sus respectivos voltajes inducidos, por lo que podemos decir:

$$a = \frac{V_p}{V_s}$$

3.3 Regulación.

De alguna manera podemos considerar al transformador como una fuente de poder o suministro cuando conectamos una carga en el secundario; la corriente I_s que pasa por la carga provoca dos caídas de voltaje dentro del transformador. La primera de estas caídas se debe a la resis

tencia existente en los devanados primario y secundario, mientras que la segunda se debe al flujo de dispersión existente tanto en el primario como en el secundario. El flujo de dispersión es creado por la corriente que fluye a través del devanado creándose un flujo aparte del ya existente flujo mutuo. Esto ocurre tanto en el devanado primario como en el secundario. A esta caída de voltaje se le llama caída de voltaje de la reactancia de dispersión.

Dichas caídas de voltaje son directamente proporcionales a la corriente de carga, quedando claro que cuando no ha ya carga no habrá caídas de voltaje en ningún devanado. Por lo tanto, por definición se llama regulación a la diferencia del voltaje con carga y sin carga entre el voltaje con carga. Y por tanto pensando en por ciento podemos decir que:

$$\% \text{ Regulación} = \frac{V_{sc} - V_{cc}}{V_{cc}} \times 100$$

donde tanto el voltaje sin carga (V_{sc}) como el voltaje con carga (V_{cc}) son medidos en el secundario.

3.4 Resistencia, reactancia e impedancia equivalentes.

Cuando calculamos el % de regulación es conveniente el combinar las caídas de la resistencia y la reactancia que ocurren en el primario y en el secundario, lo cual no puede hacerse con una adición numérica normal ya que

unas caídas ocurren cuando el voltaje es alto y otras cuando es bajo.

Como tanto en el primario como en el secundario hay caídas, podemos definir:

$$\begin{aligned} I_s R_s + \frac{I_p R_p}{a} &= I_s R_s + \left(\frac{I_s}{a} \times \frac{R_p}{a}\right) \\ &= I_s \left(R_s + \frac{R_p}{a^2}\right) \end{aligned}$$

y por tanto:

$$\begin{aligned} I_s X_s + \frac{I_p X_p}{a} &= I_s X_s + \left(\frac{I_s}{a} \times \frac{X_p}{a}\right) \\ &= I_s \left(X_s + \frac{X_p}{a^2}\right) \end{aligned}$$

Los valores anteriores son llamados resistencia equivalente R_e y reactancia equivalente X_e en base a términos o referidos al lado secundario, es decir

$$R_e = R_s + \frac{R_p}{a^2}$$

$$X_e = a^2 X_s + X_p$$

En base a lo anterior podemos establecer que la suma vectorial de R y X es la impedancia equivalente del transformador

$$Z_e = \sqrt{R_e^2 + X_e^2}$$

Dicha impedancia equivalente puede ser calculada tanto para el lado primario como para el lado secundario.

3.4.1 Prueba de corto circuito.

Para la determinación experimental de los valores de la resistencia, reactancia e impedancia equivalentes, podemos aplicar la prueba de corto circuito, la cual consiste en operar los devanados en corrientes nominales, sin aplicar alguna carga. Para esta prueba requerimos el colocar un devanado en corto circuito y en el otro aplicar un voltaje muy bajo, de aproximadamente el 5% del nominal, el cual al ser conectado obtendremos un flujo uniforme y al no haber potencia de salida o pérdidas de hierro mediremos con el wattmetro las pérdidas de cobre. La figura No. 10 nos presenta el diagrama general para la realización de esta prueba.

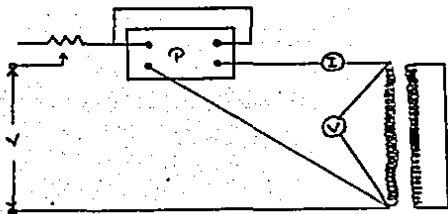


Fig. 10. Diagrama general para la prueba de corto circuito.

Como podemos ver en el diagrama de la figura No. 10 el lado secundario es donde se realiza el corto circuito, mientras que en el lado de alta tensión o primario es donde tenemos el equipo de medición. Una vez obtenidas las lecturas de los tres aparatos de medición, podemos calcular la resistencia, reactancia e impedancias equivalentes, de acuerdo a:

$$R_e = \frac{P_{cc}}{I_{cc}^2}$$

$$Z_e = \frac{E_{cc}}{I_{cc}}$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2}$$

Donde el subíndice cc indica corto circuito.

De acuerdo a lo anterior, las pérdidas de cobre a plena carga en los devanados primario y secundario resultan al hacer circular una corriente nominal en los devanados, obteniéndose lógicamente la sumatoria de $I_p^2 R_p$ mas $I_s^2 R_s$.

3.4.2 Prueba de circuito abierto.

Cuando un lado de un transformador se deja en circuito abierto y al otro lado se le conecta una fuente de corriente alterna con voltaje nominal, la corriente será muy pequeña la cual presenta dos componentes, una producida por el flujo mutuo y la otra debida a las pérdidas en el núcleo por histéresis y corrientes parásitas. Debido al bajo valor de la corriente, podemos decir que prácticamen

te no existen pérdidas de cobre, por lo que para fines prácticos el wattmetro registrará las pérdidas del núcleo. La figura No. 11 muestra el diagrama general para la realización de esta prueba.

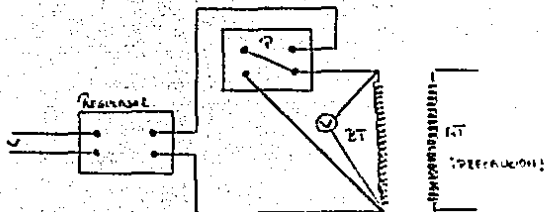


Fig. 11. Diagrama general para la prueba de circuito abierto.

3.5 Eficiencia.

La potencia útil de entrada es transferida a la carga mediante la acción de transformación, por lo que debemos tener cuidado de que el suministro de corriente alterna aplicado debe dar al transformador suficiente potencia sin olvidar las pérdidas. La potencia de salida será menor a la potencia de entrada ya que tenemos pérdidas en el aparato, lo cual implica que la eficiencia del transformador es siempre menor al 100%.

Debido a que las potencias disipadas por culpa de las pérdidas de hierro y cobre son extremadamente pequeñas en

comparación con la potencia total de entrada, la eficiencia será muy elevada, normalmente mayor al 95%.

Tal y como vimos anteriormente, las pérdidas de cobre o con carga son medidas con el wattmetro en la prueba de corto circuito, mientras que las de fierro o en vacío son medidas con el wattmetro en la prueba de circuito abierto. Conocidos dichos valores es posible determinar la eficiencia del transformador mediante la siguiente ecuación:

$$\% \text{ eficiencia} = \left(1 - \frac{\text{watts pérdidas}}{\text{watts salida} + \text{watts pérdidas}} \right) \times 100$$

Analizando la operación del transformador podemos ver que conforme aumenta la carga, la eficiencia aumenta hasta llegar a un máximo y entonces desciende su valor; esto se debe a que siendo constantes las pérdidas de fierro y vacío, las que varían son las de cobre o de carga, las cuales incrementan a razón del cuadrado de la corriente de carga.

La eficiencia de un transformador es máxima cuando las pérdidas de cobre son iguales a las de fierro.

Supongamos que:

$$I_s^2 R_e = P_f$$

donde I_s = corriente de carga

R_e = resistencia equivalente referida al secundario

$$I_s = \sqrt{\frac{P_f}{R_e}}$$

Si multiplicamos ambos lados por $E_s/1000$, y el lado derecho por I_{cc}/I_{cc} , tendríamos:

$$\frac{E_s I_s}{1000} = \frac{E_s I_{cc}}{1000 I_{cc}} \sqrt{\frac{P_f}{R_e}} = \frac{E_s I_{cc}}{1000} \frac{P_c}{I_{cc}^2 R_e}$$

Pero como podemos decir que:

$$\frac{E_s I_s}{1000} = \text{kva de carga para máxima eficiencia}$$

$$\frac{E_s I_{cc}}{1000} = \text{kva nominales del transformador}$$

$$I_{cc}^2 R_e = \text{pérdidas de cobre a plena carga.}$$

Por lo que podemos decir:

$$\text{kva máxima eficiencia} = \text{kva nom} \sqrt{\frac{P_h}{P_{cu}}}$$

Es decir, por medio de esta ecuación determinaremos a - que capacidad (kva) de carga se presenta la máxima eficiencia, pudiendo obtener, con este valor y conociendo - las pérdidas, el valor de la eficiencia máxima del transformador, tal y como se indica en la fórmula siguiente:

$$\% \text{ eficiencia máxima} = \left(1 - \frac{\text{watts pérdidas}}{\text{watts max efi} + \text{watts pérdidas}} \right) \times 100$$

4.- TRANSFORMADORES TRIFASICOS

Hasta el momento hemos analizado la teoría básica del transformador monofásico, los cuales comunmente son interconectados para operar con una carga común, creándose de ésta forma los llamados bancos polifásicos; de ésta forma surgen los transformadores trifasicos que son comunmente utilizados en la industria y en los sistemas de distribución de energía eléctrica.

En la práctica podemos encontrar estos bancos trifásicos de dos maneras:

- a) Tres transformadores monofásicos construidos separadamente, cada uno con su propio núcleo, tanque y accesorios.
- b) Tres transformadores monofásicos construidos en un mismo núcleo, tanque y accesorios.

Básicamente existen cuatro formas de interconectar un banco trifásico de transformadores:

- a) Conexión Delta-Delta.
- b) Conexión Estrella - Estrella.
- c) Conexión Delta - Estrella.
- d) Conexión Estrella - Delta.

Para un mejor entendimiento de estas conexiones es importante hacer notar que siempre mencionamos primero la conexión del devanado de alta tensión y seguidamente la del devanado de baja tensión.

Analicemos ahora brevemente dichas conexiones de los transformadores trifásicos.

4.1 Conexión Delta - Delta.

Este arreglo es generalmente utilizado en sistemas donde los voltajes no son muy elevados y cuando requerimos continuidad del servicio aún cuando falle un transformador, ya que éste puede ser removido (en el caso de construcción separada) y continuar su operación en conexión en Delta Abierta. Dicha conexión Delta-Delta no presenta problemas ante un desbalanceo de cargas.

4.1.1 Conexión Delta Abierta - Delta - Abierta.

Esta forma de conectar los transformadores es empleada cuando la carga trifásica es relativamente pequeña por lo que la instalación no garantiza o justifica el banco trifásico, o cuando falla un transformador en

conexión Delta - Delta. También puede ser implementada en un principio para una carga pequeña, pensándose en el futuro cuando aumente la carga, se completa la conexión Delta - Delta.

- Podemos decir que la capacidad de un banco en conexión Delta Abierta - Delta Abierta es de aproximadamente un 50% de la capacidad total de un banco en conexión Delta Delta.

4.2 Conexión Estrella - Estrella.

Esta conexión ofrece un servicio altamente satisfactorio a una carga trifásica balanceada, ya que cuando la carga se desbalancea, el neutro estará en el centro exacto forzando a que los voltajes línea a neutro sean desiguales. Una gran ventaja de este tipo de conexión es que el aislamiento será reforzado únicamente en la línea del neutro.

4.3 Conexión Estrella - Delta.

Esta conexión es recomendable para transformadores elevadores, como en el caso de una planta generadora, ya que únicamente reforzaremos la línea de neutro en el lado de alta tensión.

Actualmente esta conexión se utiliza mucho en sistemas de distribución de cuatro hilos donde existen sistemas de fuerza e iluminación, ya que podemos tener equipos de fuerza, como son los motores conectados en forma trifásica, por ejemplo 220 volts; y el sistema de alumbrado en forma monofásica, por ejemplo 127 volts, en el mismo transformador.

4.4 Conexión Delta - Estrella

Esta conexión es la contraria a la anterior (Estrella - Delta) y se utiliza principalmente en transformadores reductores.

Debido a que presentan características similares a los bancos en conexión Estrella - Delta, puede utilizarse en los sistemas de transmisión y distribución, sobre todo en los tramos intermedios entre el circuito generador y el circuito de utilización.

En la figura No. 12 se muestran los diagramas correspondientes a las conexiones analizadas.

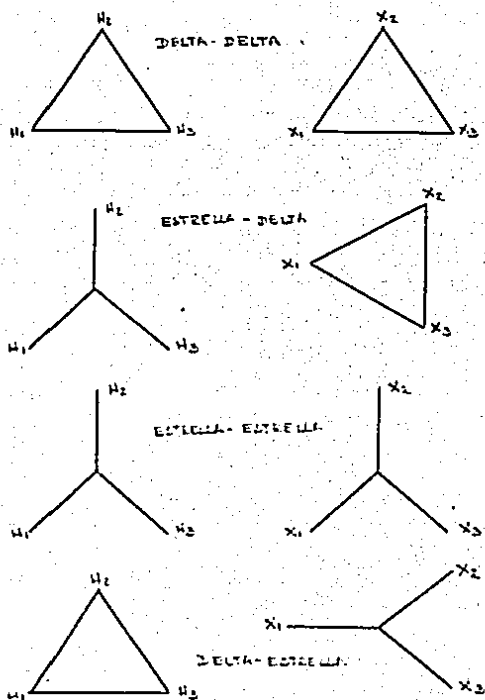


Fig. 12. Conexiones trifásicas.

CAPITULO 11

**CARACTERISTICAS DE CONSTRUCCION DE
UN TRANSFORMADOR TRIFASICO TIPO
SUB-ESTACION.**

El transformador es un aparato estático que puede transferir energía de un circuito eléctrico de corriente alterna a otro por medios electromagnéticos, realizándose una transformación de voltajes y corrientes entre los circuitos y sin existir contacto eléctrico entre ellos.

Para poder entender la importancia de este equipo podemos decir que existen tres circuitos eléctricos en un sistema:

a) Circuito de generación.

Este proceso se realiza en plantas de diversos tipos a un voltaje no muy alto de aproximadamente 13,200 volts.

b) Circuito de transmisión.

Este circuito es a alto voltaje con el fin de poder transmitir energía a través de grandes distancias en forma eficiente y -
costeable.

c) Circuito de utilización.

En este circuito el voltaje está a un nivel propio para su utilización por el consumidor, ya sea de tipo industrial o residencial.

Como podemos ver a lo largo de estos tres circuitos tenemos variaciones importantes de voltaje y debemos además aprovechar la potencia de la planta generadora en forma eficiente. Todo esto solamente es posible con la utilización del transformador. (Figura 13)

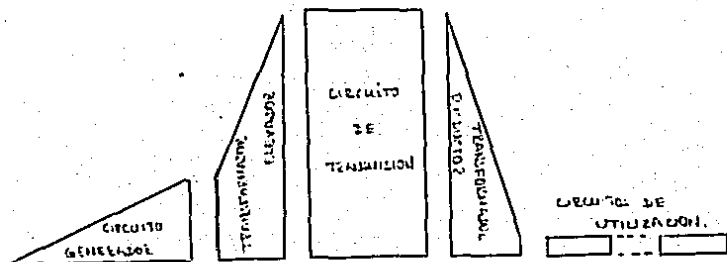


Fig. 13. Circuito eléctrico básico.

La construcción de los transformadores, por ser máquinas estáticas ofrece menores dificultades que las máquinas eléctricas rotativas, pero para que su funcionamiento sea correcto se requiere de un buen diseño así como gran precisión en el proceso de fabricación, logrando menores pérdidas y la mayor eficiencia.

Existen básicamente dos tipos de construcción para transformadores:

- a) Tipo columna.
- b) Tipo acorazado.

Los tipo columna son aquellos cuyas bobinas o devanados envuelven al núcleo de hierro, mientras que los tipo acorazado son aquellos cuyos devanados se encuentran cubiertos por el mismo núcleo; por lo que los primeros se llaman transformadores de circuito eléctrico envolvente, y los segundos son llamados de circuito magnético envolvente.

Los transformadores tipo columna se diseñan con el devanado de baja tensión y sobre éste el de alta, buscando que el bajo voltaje quede más próximo al núcleo teniendo la posibilidad de aislar debidamente las bobinas de alta tensión.

Los transformadores acorazados se construyen de diferentes formas, no olvidando que sus características principales son las siguientes:

1. El hierro que envuelve a los devanados se hace tanto al de alta como baja tensión.
2. Los devanados pueden colocarse en forma alterna, tratando de comenzar con uno de baja tensión y finalizando también con uno de baja tensión.

Cabe mencionar que el devanado del transformador que se encuentra conectado a la fuente de energía se le denomina devanado primario y el correspondiente al circuito que se va a alimentar se le llama devanado secundario.

Cabe mencionar que en nuestro estudio nos enfocaremos a los transformadores tipo columna únicamente.

1. NUCLEO TIPO COLUMNA

El núcleo es fabricado con material magnético de la más alta permeabilidad en forma laminar, ya que de esta manera logra--

mos tener núcleos de peso ligero, alta inducción, menores pérdidas y menor corriente de excitación.

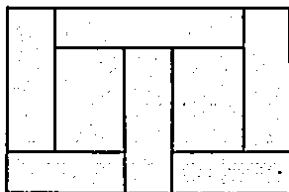
El desarrollo comercial de estos tipos de materiales magnéticos ha dado lugar a la fabricación del acero al silicio de grano orientado de alta calidad.

Dichos aceros son diseñados para obtener una baja pérdida en el núcleo y una alta permeabilidad en la dirección del enrollamiento. Tienen propiedades direccionales por la colocación ordenada de los cristales o átomos elementales, los cuales son alineados en tal forma que sus ejes, los cuales son de fácil magnetización, están casi paralelos a la dirección del devanado.

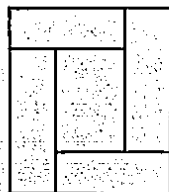
El núcleo se fabrica a base de láminas con el objeto de evitar corrientes circulantes en el núcleo que causan pérdidas y bajan la eficiencia del aparato; debido al aislamiento de la lámina dichas corrientes se reducen.

Se requiere que el núcleo se construya en forma sumamente compacta para evitar al máximo vibraciones y ruidos con el consiguiente calentamiento, para lo cual debe apretarse convenientemente por medio de herrajes.

En la figura No. 14 podemos ver como se arman los núcleos para un transformador trifásico y un monofásico típicos.



Núcleo para transformador trifásico



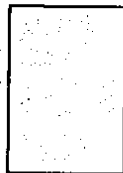
Núcleo para transformador monofásico

Fig. 14. Núcleo: forma para transformadores trifásicos y monofásicos.

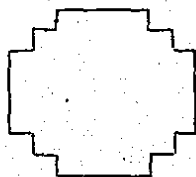
Ahora bien, la sección transversal puede ser de diferentes formas, según muestra la figura No. 15.



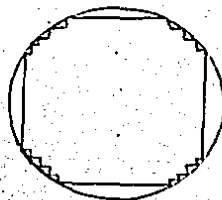
Sección cuadrada



Sección rectangular



Forma escalonada simple



Forma escalonada múltiple

Fig. 15. Sección transversal del núcleo.

2. BOBINAS O DEVANADOS.

Durante la historia del transformador, los ingenieros de diseño han desarrollado diferentes tipos de bobinas, las cuales dependen del diseño específico de cada transformador.

El ingeniero de diseño debe de tener mucho cuidado en el desarrollo de una bobina, tratando de obtener:

- a) Adecuada rigidez dieléctrica para diversos voltajes, contra sistemas de falla, descargas de operación y atmosféricas.
- b) Ventilación adecuada de la bobina.
- c) Adecuada resistencia mecánica.
- d) Mínimo costo.

La construcción de la bobina debe permitir la correcta operación, aislamiento y variación de derivaciones de acuerdo a las necesidades del servicio.

Normalmente los devanados tanto de alta como de baja tensión son fabricados con cobre electrolítico, el cual es el material disponible de menor resistividad.

Generalmente la bobina de baja tensión, de un transformador tipo columna, se instala sobre la pierna del núcleo separado o aislado de éste por barreras eléctricas y anillos de cartón aislante. El conductor utilizado normalmente para la bobina de baja tensión es de sección rectangular cubierto con varias capas de papel de acuerdo al voltaje de operación.

El devanado de alta tensión es por lo general de conductor de sección redonda con doble capa de esmalte, y se fabrica sobre la bobina de baja tensión.

Cabe mencionar que para poder aislar física y eléctricamente las bobinas entre sí y con el núcleo se utilizan separadores, cuñas, tiras y barreras de cartón aislante o material similar. Tal y como mencionábamos anteriormente, los devanados deben tener una gran resistencia mecánica para soportar las vibraciones normales de operación, así como para resistir un corto circuito eventual sin tener deformaciones que afecten su propia -

operación; para lo cual debemos reforzarlo correctamente con materiales como la fibra de vidrio para los cabezales superiores e inferiores de cada bobina y el uso de herrajes metálicos de alta resistencia diseñados para resistir los esfuerzos mas severos. Estos herrajes metálicos no sólo refuerzan las bobinas sino toda la parte viva, es decir el conjunto núcleo y bobinas, sirviendo también para asegurar dicho conjunto al tanque.

3. LIQUIDO AISLANTE. ACEITE.

Los materiales que integran los aislamientos en un transformador son básicamente aceite y papel aislante, de alta rigidez dieléctrica, utilizándose además madera, vidrio, porcelana, etc. Además del aceite pueden utilizarse otros productos aislantes tales como el silicón y el hexafluoruro de azufre (SF6) los cuales se empieza a desarrollar su uso en transformadores teniendo por tanto un costo muy elevado actualmente.

Debemos considerar que además de la degradación térmica, la vida de los materiales aislantes se ve afectada por la humedad, contaminación química, esfuerzos anormales de voltaje y esfuerzos mecánicos.

Los materiales aislantes deben soportar esfuerzos dieléctricos debidos a la excitación continua de voltajes normales, a volta

jes transitorios bajo condiciones de falla, sobretensiones por descargas atmosféricas, etc.; además de estos severos esfuerzos eléctricos no debemos olvidar la degradación a largo plazo por temperatura provocándose la llamada pérdida de vida de los aislamientos.

El aceite aislante de un transformador tiene básicamente las siguientes funciones:

- a) Aislante eléctrico.
- b) Refrigerante.
- c) Protección de aislamientos sólidos contra la humedad y -
aire.

Las fuentes de calor principales del transformador son:

- a) En los devanados debido a las pérdidas con carga y del cobre mismo.
- b) En el núcleo debido a las pérdidas por histéresis y por -
corrientes parásitas.
- c) En los herrajes y tanque por la propia operación del -
equipo.

Todo este calor generado debe ser disipado, antes de permitir que los devanados lleguen a una temperatura que ocasione una degradación excesiva del aislamiento, para lo que se utiliza actualmente aceite mineral aislante de baja viscosidad como refrigerante.

Básicamente podemos decir que existen tres formas de transferencia de calor en un transformador las cuales son convección, radiación y conducción.

a) Convección.

Esta forma de transferencia de calor puede ser natural (termosifón) o forzada.

Termosifón es el fenómeno de circulación natural que presentan los fluidos debido a las diferencias de densidades originadas por calentamiento.

La columna de aceite caliente comienza en la parte inferior de la bobina y se extiende al extremo superior del aceite, donde permanece a su máximo valor, mientras que en un transformador la columna de aceite frío comienza en la parte superior de los radiadores y se expande hacia el fondo del tanque. En ocasiones con el objeto de aumentar la eficiencia de transmisión del flujo de calor se utilizan bombas para obligar a fluir el aceite a mayor velocidad. Cabe recordar que a mayor temperatura el aceite presenta menor viscosidad, lo cual permite que fluya fácilmente aumentándose la transmisión de calor.

b) Radiación.

La radiación consiste en la emisión o absorción de ondas electromagnéticas, las cuales se emiten con una rapidez proporcional al aumento de la temperatura, siendo la principal forma de pérdida de calor en temperaturas elevadas.

c) Conducción.

Es un proceso lento por el cual se transmite el calor a través de una sustancia por actividad molecular.

De alguna forma estas formas de transferencia de calor se presentan en un transformador, como por ejemplo el flujo del calor del papel aislante al aceite es por convección natural o forzada, la transferencia de calor a través del metal de los radiadores es por conducción y parte del calor que transfieren las partes metálicas externas del transformador al medio ambiente es por radiación.

4. TANQUE.

Para contener el conjunto de parte viva y líquido aislante, se introduce éste en un tanque de acero de grueso apropiado para la capacidad del transformador, soldando las uniones con soldadura eléctrica y una vez terminadas se prueban por medio de compresores de aire para detectar cualquier posible fuga. Las dimensiones del tanque deben ser tales que permitan la correcta disipación del calor generado en su interior además de implementársele las baterías de radiadores necesarias para dicha función. Debido a que el tanque debe estar perfectamente sellado para evitar fugas y contaminaciones del exterior sobre todo de aire húmedo, que afectaría notablemente las propiedades del aceite. Dicho sellado se realiza por medio de -

empaques de corcho-neopreno en todas las juntas, tapas de registros, accesorios, boquillas, etc.

Algo que es sumamente importante en la fabricación del tanque es la pintura ya que además de dar una buena imagen del equipo tiene la facilidad de permitir la transferencia de calor y proteger contra la corrosión al transformador. Para seleccionar la pintura adecuada para cada caso se tomará en cuenta los problemas particulares de cada equipo, en cuanto a la agresividad del medio ambiente (corrosión) o el aprovechamiento de la transmisión de calor para aumentar la capacidad de carga del transformador. Desgraciadamente no podemos cubrir las dos necesidades con un mismo tipo de pintura.

Es muy importante supervisar el proceso de aplicación de pintura desde la preparación de la superficie hasta su acabado final. La limpieza a base de "chorro" es el procedimiento más efectivo para la limpieza de metales, porque remueve las incrustaciones y el óxido ferroso, así como la eliminación de algunas rugosidades propias del metal, permitiendo una mayor adherencia de las capas de pintura. Posteriormente deberán llevar una capa de compuesto primario de 2 a 3 milésimas de espesor y una última capa de acabado final de similar espesor. Siguiendo las recomendaciones anteriores la duración de la pintura será de ocho años o más en climas no muy drásticos y de cinco años en climas de alta contaminación y corrosión.

CAPITULO III

SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO Y ACCESORIOS DE UN TRANSFORMADOR TIPO SUB-ESTACION

Hasta el momento hemos analizado las características básicas de construcción de los principales componentes del transformador. Hemos visto como se construye el núcleo y las bobinas, las cuales constituyen la parte viva del sistema, así como la importante función de los aislamientos y del líquido dieléctrico.

Como nos podemos dar cuenta algo que es sumamente importante en la operación de un transformador es la temperatura a la cual trabaja, ya que una temperatura elevada implicará un envejecimiento prematuro de los aislamientos, una degradación del líquido dieléctrico y - por lo tanto una posible falla del transformador así como una menor vida útil del mismo.

Debido a lo anterior en el presente capítulo vamos a hablar primeramente de los diferentes tipos de sistemas de enfriamiento existentes aplicables a un transformador. Posteriormente conoceremos cuales son los principales accesorios del transformador, y su relación con los sistemas de enfriamiento, ya que la instalación de algunos de ellos dependen de dichos sistemas.

1. SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO.

La energía convertida en calor originada en la parte viva del transformador deberá ser transmitida a algún medio refrigerante y disipado antes de permitir que los aislamientos lleguen a una temperatura excesiva que provoque la degradación de éstos.

La selección del sistema de enfriamiento de un transformador es de primordial importancia, debido a que influye mucho en la vida útil del equipo, así como su capacidad, sin olvidar el costo y el espacio en el cual debe instalarse. Dichos sistemas de enfriamiento se encuentran especificados por diversas normas nacionales e internacionales. Para nuestro estudio nos basaremos en la clasificación indicada en la Norma Oficial Mexicana NOM-J-284 de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, la cual nos indica lo siguiente:

Para tener uniformidad en la simbología a utilizar, manejaremos la mencionada en dicha norma y la de la CEI (Comisión Electrotécnica Internacional), paralelamente.

<u>MEDIO ENFRIANTE</u>	<u>SIMBOLO</u>
Aceite mineral	O
Gas	G
Agua	W
Aire	A
Aislamiento sólido	S
<u>TIPO DE CIRCULACION</u>	<u>SIMBOLO</u>
Natural	N
Forzada	F

En el primer paréntesis se presenta la clasificación de la norma NOM-J-284 y en el segundo la clasificación CEI.

Podemos hablar de cuatro tipos de grupos de sistemas de enfriamiento, los cuales son:

A. Sumergidos en líquido aislante, enfriados por aire.

a) Autoenfriado en aceite (OA) (ONAN).

En estos transformadores el aceite aislante circula por convección natural dentro de un tanque con paredes lisas o corrugadas o bien provistas de enfriadores tubulares o tipo oblea.

b) Autoenfriado y enfriado por aire forzado (OA/FA) (ONAN/ONAF).

Esto es básicamente un transformador OA al cual se le han adicionado ventiladores para aumentar la capacidad de disipación de calor en las superficies de enfriamiento. Dichos ventiladores por tanto se colocan sobre las baterías de radiadores.

c) Autoenfriado y con dos pasos de enfriamiento por aire forzado (OA/FA/FA) (ONAN/ONAF/ONAF)

En este sistema se aumenta la cantidad de ventiladores arrancando un juego de estos primero aceptando un incremento de carga del 33% y arrancando el segundo juego se aumenta la capacidad en un 66% - con respecto a la base en OA.

B. Sumergidas en líquido aislante, enfriados por aire y por líquido aislante forzados.

a) Autoenfriado, enfriado por aire forzado y enfriado por aire líquido aislante forzados (OA/FA/FOA)

(ONAN/QNAF/QFAF)

Así como podemos forzar el aire por medio de ventiladores para lograr un mejor enfriamiento, podemos forzar el circulamiento del líquido por medio de bombas, por lo que al combinar estos dos procesos podemos obtener un aumento de capacidad total del 66% con respecto a la nominal en OA.

- b) Autoenfriado y con dos pasos de enfriamiento por aire-líquido aislante forzados (OA/FOA/FOA) (ONAN/QFAF/QFAF).

Este sistema es similar al anterior lográndose una menor temperatura de operación, mayor vida útil y capacidad de absorber sobrecargas pico aún a plena capacidad.

C. Sumergidas en líquido aislante, enfriados por agua.

- a) Sumergido en líquido aislante enfriado por agua (OW). En este tipo de transformadores el agua de enfriamiento es conducida por serpentines, los cuales están en contacto con el aceite aislante del transformador y se drena por gravedad o por medio de una bomba independiente. El aceite circula alrededor de los serpentines por convección natural.
- b) Enfriado por agua y autoenfriado (OW/OA) (OWHF/ONAN).

En este sistema el aceite aislante no sólo es enfriado a lo largo de los serpentines, sino también

al circular por los radiadores.

D. Sumergido en líquido aislante, enfriados por aire o agua y líquido aislante forzados.

- a) Enfriados por aire y líquido forzados (FOA) (OFAF)
Este tipo de enfriamiento se usa únicamente con los ventiladores y las bombas de aceite trabajando al mismo tiempo; dichas condiciones pueden absorber cualquier carga de pico a plena capacidad.
- b) Enfriado por agua y líquido aislante forzadas (FOW) (OFWF).

El transformador es prácticamente igual que el anterior (FOA), con la excepción de que el intercambiador de calor es el del modelo agua aceite y por lo tanto el enfriamiento de aceite se hace por medio de agua sin tener ventiladores.

2. ACCESORIOS DE UN TRANSFORMADOR.

Para la correcta operación de nuestro transformador y el perfecto mantenimiento, control, así como su protección requerimos de una serie de accesorios. Podemos decir que existen dos tipos de accesorios:

- a) Normales.
- b) Opcionales.

Donde los primeros son propios de todo transformador y los segundos dependen del diseño propio del equipo o del lugar a

instalar.

2.1 Accesorios normales.

Los principales accesorios normales son los siguientes:

a) Boquillas y terminales.

La finalidad de las boquillas y terminales es el -
efectuar la conexión eléctrica entre las terminales
de devanados y el exterior manteniendo las condicio
nes de hermeticidad y aislamiento. Podemos decir -
que existen tres tipos de boquillas básicamente, de
tipo sólido, en aceite y tipo condensador, cuya -
aplicación dependerá del voltaje de diseño.

b) Cambiador de derivaciones.

Básicamente existen dos tipos de cambiadores.

1) Operación sin energizar.

2) Operación con energización y baja carga.

El primero se opera mediante un volante o manivela
en forma manual, dicho volante deberá contar con -
un seguro para colocar un candado que impide su mo
vimiento cuando el transformador está energizado;
mientras que el segundo tipo normalmente es de ope
ración motorizada con control local o remoto.

La finalidad del cambiador de derivaciones es modi
ficar el valor del voltaje de suministro de acuer
do a las necesidades del sistema.

- c) Placas para conexión a tierra.
- Estas placas de acero cobrizado o de acero inoxidable se deben soldar a la base o en la pared del tanque lo mas próximo a la base de tal forma que queden en forma opuesta y diagonal una de la otra. El intervalo del calibre del conductor para conexión a tierra debe ser de 67.43 mm^2 (2/0 AWG) a 107.2 mm^2 (4/0 AWG) a menos que se especifique otro calibre en un diseño especial.
- d) Indicador del nivel de líquido aislante.
- Este indicador magnético de nivel con carátula deberá ser colocado en el tanque para detectar si hay variaciones en el nivel de líquido de aceite y por tanto la presencia de una fuga de aceite importante, o una falla determinada.
- e) Indicador de temperatura del líquido aislante.
- Este dispositivo tiene como función detectar la temperatura del aceite, esto lo realiza con un termopozo, el cual se encuentra sumergido a un nivel apropiado para indicar la temperatura de la parte superior del líquido aislante, lugar en que el aceite se encuentra a mayor temperatura. Este termómetro debe tener un cuadrante de carátula obscura con las marcas y aguja indicadora de color claro y otra aguja ajustable de color rojo naranja para indicar los máximos .

Las marcas del cuadrante deben cubrir los límites de 0°C a 120°C y el diámetro de la carátula debe ser de 115 ± 25 mm. La leyenda "temperatura del líquido" debe aparecer en la carátula.

f) Indicador de presión y vacío.

Se debe instalar en el transformador un indicador de presión y vacío en aquellos transformadores con sistema de preservación de líquido aislante tipo tanque sellado.

g) Válvula de drenaje, muestra y filtro.

Se debe montar en los transformadores una combinación de válvula de drenaje y filtro inferior tipo globo, que servirá para el drenaje de líquido aislante. Sobre la parte de la válvula de drenaje y como parte integrante de ella, entre el asiento de ésta y el tapón debe localizarse una válvula de muestreo de 9.5 mm., esta válvula debe estar provista de cuerda y tapón.

Para transformadores hasta 2,500 kva el diámetro de la válvula de drenaje deberá ser de 25 mm y deberá tener una conexión superior para filtro prensa que debe consistir en una conexión hembra roscada de 25 mm con tapón macho, localizada arriba del máximo nivel del líquido aislante.

Mientras que para transformadores con capacidades mayores a 2,500 kva deberán tener una válvula de -

drenaje de diámetro igual a 51 mm y además deberán tener una válvula de filtro tipo globo de 25 mm.

h) Placa de datos.

El fabricante deberá colocar en el transformador - una placa de acero inoxidable, o de otro material resistente a la corrosión. Dicha placa debe contener mínimo la siguiente información:

- Número de serie.
- Clase (OA, OA/FA, etc.).
- Número de fases.
- Frecuencia en hertz.
- Capacidad nominal en kva.
- Tensiones nominales.
- Tensiones de las derivaciones.
- Elevación de temperatura en grados centígrados.
- Diagrama vectorial.
- Porcentaje de impedancia.
- Masas aproximadas en kilogramos.
- Diagrama de conexiones.
- Nombre del fabricante.
- Número de instructivo.
- Identificación del líquido aislante (aceite, silicona, etc.).
- Número de litros de líquido aislante.
- Niveles de impulso.

2.2 Accesorios opcionales.

A continuación veremos cuales son algunos de los accesorios opcionales que pueden ser implementados a un transformador; cabe mencionar que la cantidad de accesorios estará limitada por el diseño propio del equipo.

a) Indicadores de temperatura y de nivel de líquido - aislante con contactos de alarma.

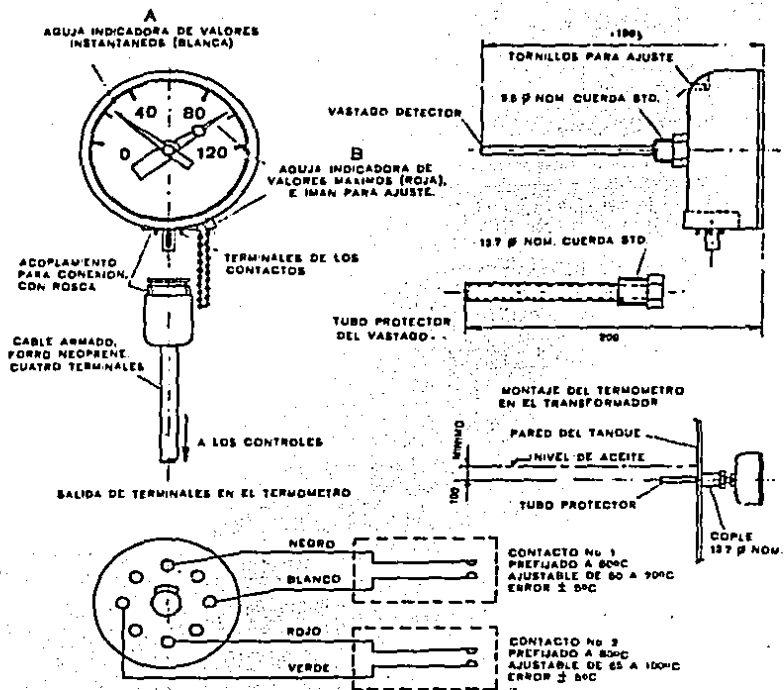
a.1) El termómetro con contactos de alarma tiene - dos microinterruptores, cada uno con dos contactos normalmente abiertos que se cierran - cuando la temperatura alcanza el límite considerado.

Para un mejor entendimiento, lo anterior se - muestra en la figura No. 16.

a.2) Nivel de aceite con contactos de alarma.

Antes de entrar en servicio, la aguja del - instrumento debe marcar ligeramente arriba o abajo de nivel a 25°C, según sea la temperatura del lugar de instalación. Cuando el aparato entre en servicio, la temperatura del - aceite aumentará y por supuesto aumentará su volumen; entonces la aguja indicadora marcará un nivel superior al inicial.

El medidor de nivel con contactos de alarma - está provisto con contactos normalmente cerrados (blanco y negro) cuando el transformador



TERMOMETRO CON CONTACTOS DE ALARMA.

Fig. 16. Termómetro con contactos de alarma.

se encuentra en su nivel correcto. En caso de bajo nivel se abren los contactos citados y se establece el circuito blanco-verde y opera la alarma como indican las líneas punteadas. Para un mejor entendimiento veamos la figura No. 17.

- b) Indicadores de temperatura del devanado.
Su función es medir la temperatura de los devanados. Para esto existen dos tipos de estos indicadores:
- Indicadores de la temperatura media.
 - Indicadores de temperatura del punto mas caliente.
- c) Transformadores de corriente tipo boquilla.
Con el fin de utilizarse para medición y protección del transformador se emplean los transformadores de corriente tipo boquilla de relación múltiple.
- d) Relevador mecánico de sobrepresión.
Este dispositivo tiene como función principal el aliviar cualquier sobrepresión que se presente dentro del transformador, evitando de esta forma daños o deformaciones permanentes en sus componentes, así como la indicación de una falla en el transformador.
- e) Ruedas.
La base del transformador puede ser de dos tipos:
- Deslizable.
 - Con ruedas orientables.

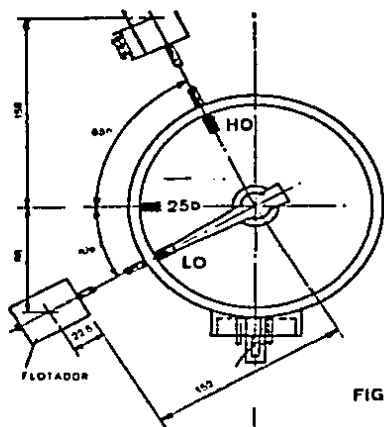


FIG. 1

CABLE ARMADO. FORRO
DE NEOPRENE. CON 3
TERMINALES



NIVEL DE ACEITE CON CONTACTOS DE ALARMA

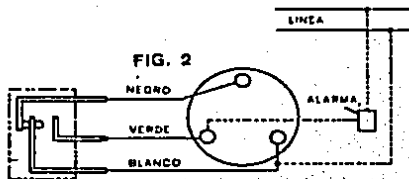
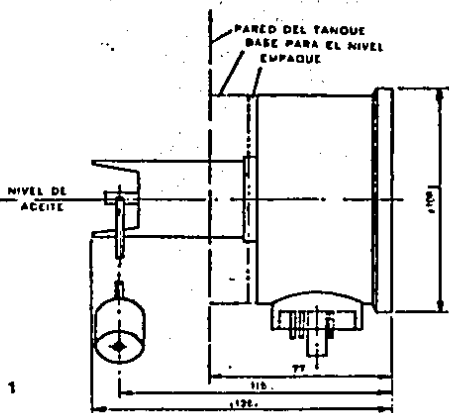


Fig. 17. Nivel de aceite con contactos de alarma.

Las ruedas serán utilizadas para desplazamiento sobre rieles.

3. EQUIPOS OPCIONALES DE UN TRANSFORMADOR.

Durante la vida útil del transformador el aceite se oxida, atacando la celulosa de los aislamientos. Para ello es necesario evitar al máximo el contacto físico entre el aceite del transformador y el aire que lo rodea. Además de implementar un correcto sistema de enfriamiento para mantener una apropiada temperatura de operación.

3.1 Sistemas de preservación de aceite.

A continuación describimos los métodos más usuales de preservación de aceite:

a) Cámara sellada.

Este es el método más usual y económico, el cual - consiste única y exclusivamente en sellar herméticamente nuestro tanque, de tal forma que el aire que ocupe la cámara de expansión quede aislado del exterior y por lo tanto no renueve su oxígeno, ni admita humedad del exterior.

En este método se provee un alivio de presión y otro de vacío para impedir que la presión interior alcance valores peligrosos para el tanque. En casos de que la presión sea superior a 8 libras/pulg

da cuadrada, o inferior a 0.5 libras/pulgada cuadrada los reguladores mencionados permiten la expansión o admisión de aire. Lo anterior ocurre raramente si la cámara se diseña para que sólo circunstancias extraordinarias produzcan presiones límite.

b) Cámara de nitrógeno.

Este sistema consiste en sustituir el aire de la cámara por nitrógeno, con lo cual se evita totalmente el contacto del aceite con el aire, evitándose la oxidación y la presencia de la humedad. Para asegurar la presencia del nitrógeno en la cámara, se contará con recipientes conteniendo dicho gas, situados a un costado del tanque y conectados a éste a través de válvulas reguladoras.

c) Tanque conservador.

La expansión del aceite, debida al aumento de temperatura, tiene lugar en el tanque conservador ya que éste se coloca sobre el tanque manteniendo el tanque principal totalmente lleno. La tubería de interconexión entre el tanque conservador y el principal deberá ser lo bastante grande para permitir la transferencia entre ambos; pero también deberá ser lo suficientemente pequeña para prevenir una excesiva circulación que daría lugar al funcionamiento del relevador Buchholz.

Con el tanque conservador la oxidación del aire ca-

rece de importancia como resultado de que la superficie en contacto de aceite con aire es mínima comparada con la que tendría el tanque principal, si estuviera provista con cámara de expansión; además, la temperatura del aceite en el tanque conservador es mas baja.

El peligro de explosión se reduce debido a que en el tanque principal no hay aire que ayude en el caso de un arqueo interior.

En la figura No. 18 podemos observar los componentes de este sistema de preservación de aceite.

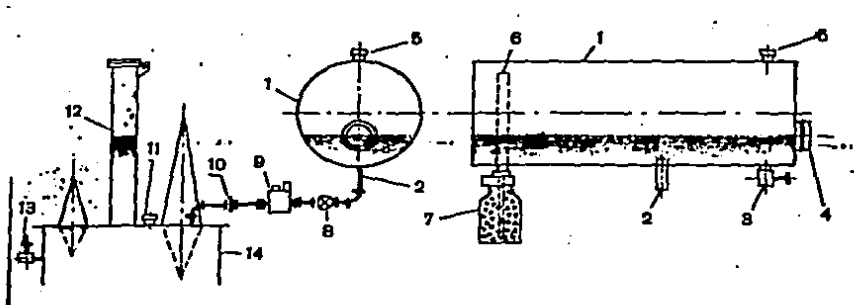


Fig. 18. Tanque conservador.

Descripción de los componentes: (Figura No. 8).

- 1 Tanque conservador.
- 2 Cople para conexión al tanque principal.
- 3 Válvula de tipo globo para drenaje y muestreo.
- 4 Nivel de aceite.
- 5 Cople con tapón hembra para conexión al filtro prensa.
- 6 Tubo de respiración.
- 7 Frasco de sílica-gel (deshumidificador).
- 8 Válvula tipo globo.
- 9 Relevador buchholz.
- 10 Junta de unión universal.
- 11 Cople para salida de aire.
- 12 Dispositivo para sobrepresiones.
- 13 Válvula superior para conexión al filtro prensa.
- 14 Tanque principal completamente lleno.

Dentro de los accesorios opcionales para los sistemas de preservación de aceite, el relevador buchholz juega un papel sumamente importante.

El relevador buchholz asegura la protección del transformador, señalando la presencia de gases o vapores y desconectando el aparato en caso de avería grave. En un transformador sumergido en aceite, al ocurrir una falla interna da por resultado la creación de un volumen gaseoso mas o menos im-

portante, o bien de vapores que provienen de la descomposición de los aislamientos sólidos o líquidos bajo la acción del calor y particularmente de un arco eléctrico. El relevador buchholz se inserta en una tubería que conduce desde la parte mas alta del tanque principal hasta el tanque conservador. En la figura No. 18 nos muestra donde es colocado el dispositivo en un transformador con tanque conservador.

3.2 Ventilación forzada.

Esta operación consiste en trabajar el transformador con sobrecargas continuas, pero sujeto a ventilación forzada a fin de que no se exceda el límite de temperatura para el cual se diseñó y construyó el transformador.

Por norma, las sobrecargas a obtener con este sistema son:

15% para transformadores hasta de 2,000 kva.

25% para transformadores de 2,001 a 10,000 kva.

33% para transformadores mayores a 10,000 kva.

Para poner en servicio la operación de ventilación forzada requerimos de un transformador de corriente, una bobina de deflexión y un relevador térmico. Para una operación cómoda y segura requerimos de un gabinete de control con tabillitas de conexiones, fusibles y arrancador termomagnético. Y por supuesto, los ventiladores deberán soportarse en la estructura de los radiadores.

Un elemento importante tanto para un sistema de ventilación forzada, como de aceite forzado es el relevador térmico, el cual consiste de un elemento sumergido en aceite, al cual se superpone el calentamiento de una corriente proporcional a la carga. Al obtenerse la temperatura crítica, el relevador disparará el interruptor o dará la señal para que arranquen los ventiladores o la bomba que permitirán que el transformador trabaje con sobrecarga.

CAPITULO IV
METODOS DE PRUEBA.

Hasta el momento hemos visto que es un transformador, cual es su -- principio de operación, cuales son sus principales características de construcción y los sistemas o accesorios que podemos implantar-- le.

Para un industrial debe ser de vital importancia el asegurarse de - que el equipo solicitado es realmente lo que le van a entregar ya - que cualquier variación puede crear grandes problemas en sus insta- laciones o en su proceso productivo. Con este fin se realizan dife- rentes pruebas para verificar las características del transformador y detectar posibles fallas de diseño o construcción.

Las pruebas a realizar se encuentran especificadas en diferentes -- normas tales como la del American National Standards Institute - (ANSI), la del Comité Consultivo Nacional de Normalización de la Industria Eléctrica (CCONNIE) o la Norma Oficial Mexicana emitida por la Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial. Para nuestro estudio específico nos basaremos en la Norma Oficial Mexicana NOM-J-169-1987 "Productos Eléctricos - Transformadores y Autotransformadores de Distribución y Potencia - Métodos de Prueba".

Cabe mencionar que no buscamos en este capítulo el explicar a fondo en que consiste cada prueba y como se realiza, sino el dar un panorama general de cuales son las pruebas principales aplicables a un transformador de una manera fácil y sencilla.

Ya que estas pruebas se realizan con el fin de aceptar o rechazar - el equipo, se deberán realizar en la fábrica antes de su embarque.

Existen cuatro tipos de prueba para nuestro equipo.

a) Pruebas de prototipo.

Son aquellas pruebas aplicables a nuevos diseños o modificaciones de diseños anteriores. Para la aceptación de un equipo - prototipo se deben de cumplir satisfactoriamente las pruebas - de rutina.

b) Pruebas de rutina.

Son pruebas que deben efectuarse en todos los transformadores para verificar si la calidad del producto se mantiene dentro - de las tolerancias permitidas.

c) Pruebas opcionales.

Son las establecidas entre comprador y fabricante, con el objeto de verificar ciertas características específicas del equipo.

d) Pruebas de aceptación.

Son aquellas pruebas que demuestran, a satisfacción del comprador, que el transformador cumple con lo especificado.

A continuación vemos cuales son las pruebas correspondientes a cada uno de los grupos anteriores.

1. PRUEBAS DE PROTOTIPO

Las principales pruebas de prototipo son:

1.1 Elevación de temperatura de los devanados.

Para la realización de esta prueba se requiere que el transformador se encuentre totalmente ensamblado, con todos sus accesorios y con el líquido aislante hasta el nivel indicado.

El método de corto circuito es el preferido por los fabricantes para transformadores sumergidos en aceite y consiste en cortocircuitar uno de los devanados, ya sea de alta o baja tensión según convenga y alimentando por el otro devanado de forma tal que obtengamos las pérdidas correspondientes. Se mantiene la prueba hasta que se alcance la temperatura de estabilización del nivel superior del líquido aislante con respecto a la del ambiente, y una vez obtenida esta temperatura se ajustan las corrientes de los devanados a los valores nominales manteniéndose esta excitación durante una o dos horas, posteriormente se abre el corto circuito, se desconecta el transformador y se mide la resistencia de los devanados, conociendo por tanto la temperatura máxima de operación y como afecta a nuestros devanados.

1.2 Prueba de impulso.

Para demostrar la rigidez del aislamiento contra un voltaje de impulso debido a una descarga atmosférica se aplica la prueba de impulso. Los transformadores son diseñados para tener cierto nivel básico de rigidez llamado nivel básico de impulso (NBI) el cual es calculado por el ingeniero de diseño de acuerdo a las condiciones de la instalación y basándose en las tablas existentes de norma de acuerdo al voltaje de operación. Por lo que esta prueba se realiza aplicando este voltaje del nivel básico de impulso en tres formas diferentes, a tensión reducida, dos ondas cortadas y una onda completa; las cuales pueden ser aplicadas al transformador secuencialmente observando su tiempo de recuperación para cada caso y ésta es la reacción de los aislamientos en su resistencia. (Figura No. 19).

2. PRUEBAS DE RUTINA

Las principales pruebas de rutina aplicada a todo transformador de potencia son las siguientes:

2.1 Medición de resistencia ohmica de los devanados.

La resistencia de un devanado se mide con suma precisión por medio de aparatos tales como el puente de Wheatstone y el puente de Kelvin, en donde el primero nos mide re-

TRANSFORMADORES DE POTENCIA

CLASE DE AISLAMIENTO	NIVEL BASICO DE IMPULSO
kv	kv
1.2	45
2.5	60
5.0	75
8.7	95
15	110
25	150
34.5	200
46	250
69	350
92	450
115	550

Fig. 19. NBI para transformadores de potencia.

sistencias altas, mientras que el segundo nos mide resistencias pequeñas.

Básicamente esta prueba tiene los siguientes propósitos:

- a) Es necesario para determinar la temperatura de los devanados.
- b) Nos sirve para el cálculo de las pérdidas por efecto Joule en los devanados.
- c) Es muy útil en la determinación de fallas en los devanados debido a falsos contactos.

2.2 Resistencia de aislamiento.

La resistencia de aislamiento depende del grado de humedad y limpieza del mismo, siendo por tanto el motivo de esta medición el determinar si el aislamiento ha sido secado adecuadamente y no presenta contaminación.

Esta prueba consiste en encontrar el valor ohmico del - aislamiento del transformador. Con este valor podemos - determinar su grado de humedad entre devanados o entre - devanado y tierra, y al mismo tiempo determinar si el aparato está capacitado para soportar las pruebas dieléctricas a que será sometido.

2.3 Relación de transformación.

La prueba de relación de transformación tiene como principal objetivo, la determinación de la relación entre el número de vueltas del devanado primario y el secundario.

o sea, que determina si la tensión suministrada puede ser transformada a la tensión deseada.

2.4 Polaridad.

El objetivo de ésta prueba es el poder determinar la polaridad y por tanto el desplazamiento angular y la secuencia de fases del transformador.

La polaridad nos indica el sentido relativo instantáneo del flujo de corriente en las terminales de alta tensión con respecto a la dirección del flujo de corriente en las terminales de baja tensión.

2.5 Pérdidas en vacío

Las pérdidas en vacío o de excitación de un transformador las constituyen principalmente las pérdidas del núcleo, las cuales como hemos visto se componen de las pérdidas por histéresis mas las pérdidas por corrientes parasitas. Esta prueba consiste en determinar las pérdidas que tiene el transformador cuando se alimenta un devanado con su voltaje y frecuencia nominales, y el otro devanado se encuentra abierto.

2.6 Corriente de excitación.

La corriente de excitación es la corriente que toma un transformador al estar operando en vacío, y su medición

tiene como objetivo el determinar las formas en que está trabajando el circuito magnético, así como la comprobación de la adecuada construcción del núcleo.

2.7 Impedancia y pérdidas de carga.

Las pérdidas con carga son la energía consumida por los conductores al circular en ellos la corriente nominal del transformador. La tensión de impedancia de un transformador visto desde las terminales del devanado excitado, es la tensión requerida para hacer circular su corriente nominal teniendo el otro devanado en corto circuito.

Es decir, esta prueba consiste en colocar el devanado de baja tensión en corto circuito, mientras que el devanado de alto voltaje es ajustado de manera que fluya en el mismo corriente nominal determinándose el valor de las pérdidas con carga, que al sumarse a las de vacío obtenemos las pérdidas totales del transformador y simultáneamente al leer el voltaje podemos calcular el porcentaje de impedancia del equipo.

El conocimiento del valor de la impedancia de un transformador es necesario para la correcta selección de protecciones tanto para el transformador como para el sistema completo, ya que dicha impedancia será la limitadora de corriente en caso de un corto circuito, por lo que debemos ajustarlo a los valores normalizados, así como en el sistema de protección de todo el circuito.

2.8 Prueba de potencial aplicado.

La prueba de potencial aplicado consiste en verificar que la clase y cantidad de material aislante son adecuados.

La tensión de prueba debe ser la correspondiente a la clase de aislamiento del devanado.

2.9 Prueba de potencial inducido.

Esta prueba se aplica para comprobar el aislamiento entre vueltas, capas y secciones de un devanado, por este medio se detectará algún punto débil de los aislamientos. El proceso consiste en inducir básicamente en los devanados del transformador una tensión del 200% de la tensión nominal.

Dado que durante esta prueba se incrementan los volts por vuelta del transformador, la frecuencia de la tensión de prueba debe ser lo suficientemente alta para limitar la densidad del flujo en el núcleo. La frecuencia mínima para lograr dicha condición está dada por la siguiente fórmula:

$$\text{Frecuencia mínima} = \frac{\text{Tensión inducida a través del devanado}}{1.1 \text{ Tensión nominal del devanado}} \times \text{Frecuencia nominal}$$

Sin embargo, si se usan frecuencias mayores a 120 Hz, la severidad de la prueba se incrementa por lo que debemos reducir el tiempo de duración de acuerdo a la siguiente tabla:

FRECUENCIA HZ	TIEMPO S
120 ó menos	60
180	40
240	30
360	20
400	18

2.10 Prueba de hermeticidad.

Un transformador debe garantizar hermeticidad absoluta durante su larga vida útil, debido a que la existencia de fugas en el tanque propicia la entrada de humedad, o fugas de aceite, ocasionándose de esta manera una futura falla en el transformador.

2.11 Rigidez dieléctrica del aceite.

El aceite empleado en los transformadores es un producto altamente refinado, pero no químicamente puro, lo cual significa que contiene impurezas en su composición, algunas de las cuales en particular son sumamente destructivas para sus propiedades y resistencia dieléctrica. Los factores más dañinos son el agua, el oxígeno y las muchas combinaciones de compuestos que se forman por la acción combinada de éstas a temperaturas elevadas. Estas son las razones por las cuales se efectúa la prueba de rigidez dieléctrica, la cual consiste en verificar si el líquido aislante cumple con las condiciones de limpieza y

grado de humedad necesarias para el desarrollo de su cometido dieléctrico, entre devanados y entre devanados y tierra.

3. PRUEBAS OPCIONALES.

Las pruebas opcionales se ven limitadas a las necesidades propias del equipo y de lo que desee conocer de él, el ingeniero de diseño o proyecto. Algunas de ellas se enumeran a continuación.

3.1 Pérdidas, corriente de excitación e impedancia a tensiones y/o cargas diferentes a las nominales.

El objetivo de esta prueba es obtener información sobre el comportamiento de los transformadores bajo diferentes regímenes de carga y tensión. Dichas pruebas se realizan en la misma forma que sus similares a valores nominales.

3.2 Elevación de temperatura de los devanados a capacidades distintas a las nominales.

Es prácticamente el mismo caso de las anteriores.

3.3 Prueba de nivel de ruido.

Esta prueba tiene como función fundamental verificar que los niveles de ruido de operación del transformador son aceptables. Para esto el equipo se coloca en un lugar de

superficies de reflexión acústica dentro de un área de -
por lo menos 3 metros a su alrededor con un ambiente que
tenga un nivel de ruido de 7dB como mínimo, además de -
energizar el transformador a tensión y frecuencia nomi-
nales sin carga.

4. PRUEBAS DE ACEPTACION.

Las pruebas de aceptación son aquellas que se definen en el -
pedido u orden de compra-venta entre comprador y fabricante -
para aceptar o rechazar el equipo especificado.

El comprador o ingeniero de proyectos deberá tener cuidado de
solicitar aquellas pruebas que le garanticen el correcto cum-
plimiento de su especificación.

Normalmente el listado de pruebas de aceptación se compone con
las pruebas de rutina y cuando es un aparato especial o de nue-
vo diseño para el fabricante se solicitan las pruebas de proto-
tipo.

CAPITULO V

**CRITERIOS DE SELECCION DE UN TRANSFORMADOR
DE MEDIA POTENCIA TIPO SUB-ESTACION
SUMERGIDO EN ACEITE.**

Una vez estudiados los primeros cuatro capítulos del presente trabajo, podemos decir que conocemos las principales características teórico-prácticas de un transformador tipo columna sumergido en aceite.

Hemos analizado sus características teóricas desde el punto de vista eléctrico, conociendo sus principales parámetros tales como capacidad, voltajes y corrientes de operación, impedancia, o pérdidas - entre otros; así mismo hemos revisado los tipos de construcción de cada una de sus partes, los sistemas de preservación de aceite, los sistemas de enfriamiento y los accesorios que podemos implantarle para la correcta operación del transformador en nuestro sistema. - Que gran importancia tiene la temperatura de operación del equipo - tanto en función de su vida útil, como de la posibilidad de una sobrecarga mientras menor sea dicha temperatura.

En el presente capítulo mostraremos algunos de los criterios de selección que se pueden aplicar al especificar un transformador tipo columna sumergido en aceite de capacidad mayor a 500 kva y menor de 5,000 kva en voltajes de operación no mayores a 34,500 volts en - 60 Hz.

Para poder definir y comprender nuestros criterios de selección los vamos a dividir en cuatro secciones básicas:

1. Criterios de selección de acuerdo al lugar de operación.
2. Criterios de selección de acuerdo a las características eléctricas.

3. Criterios de selección de acuerdo a las características térmicas.
4. Criterios de selección de acuerdo a las características mecánicas.

Una vez determinados los criterios anteriores el ingeniero de proyecto podrá elaborar una correcta especificación particular de su equipo para su instalación específica, logrando el realizar una correcta compra y adquiriendo un equipo útil y funcional.

1. CRITERIOS DE SELECCION DE ACUERDO AL LUGAR DE OPERACION.

Antes de empezar nuestro proyecto es conveniente el conocer - cuales son las características del lugar donde va a operar - nuestro equipo, que condiciones presenta y analizar de que manera nos pueden afectar en nuestra especificación técnica.

1.1 Lugar donde se va a instalar el transformador.

Debemos determinar y considerar si nuestro equipo va a estar a la intemperie o dentro de un cuarto cerrado, ya que no debemos olvidar que nuestro equipo necesita "respirar" y mantener una temperatura de operación baja para un buen funcionamiento y larga vida útil. Es importante el considerar las medidas de seguridad que deberán existir cuando el equipo esté funcionando ya que tendrá partes donde se manejan altos voltajes y altas corrientes. En algunos proyectos específicos, debido a la construcción de los

sistemas aledaños al transformador, se fuerza a que éste -
tenga que cumplir con ciertas dimensiones, para lo cual -
habrá que consultar al fabricante para ver la posibilidad
de obtener el transformador deseado con esas dimensiones.
La mayoría de los fabricantes en el país elaboran sus -
transformadores con acabados para intemperie, los cuales
al ser instalados en una sub-estación interior no se ven -
afectados en su operación y ofrecen mayor duración de sus
componentes siempre y cuando se le de una correcta venti-
lación.

1.2 Temperatura ambiente.

De acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-J-284-1987, to
dos los transformadores son diseñados para operar a una -
temperatura ambiente promedio de 30°C y una máxima de 40°C,
por lo que si nuestro lugar de operación, ya sea interior
o exterior, presenta temperaturas ambientes mayores o me-
nores a éstas debemos notificarlo al fabricante para que
realice el correcto diseño del equipo.

1.3 Altura de operación.

Es importante conocer a que altura sobre el nivel del mar
va a trabajar nuestro equipo, ya que al existir un aumen-
to en la altitud se produce disminución en la densidad -
del aire, lo cual a su vez incrementa la temperatura del
transformador, sobre todo en aquellas en que depende del

aire su disipación. Por lo tanto debemos de tomar en cuenta lo siguiente para transformadores construidos para operar a una altura de 1,000 msnm y que se desean instalar a mayor altura:

- a) Dichos transformadores pueden operar a capacidad nominal a mayores altitudes, siempre que la temperatura ambiente promedio máxima, no exceda de los valores indicados en la siguiente tabla:

TIPO DE ENFRIAMIENTO	ALTITUD EN METROS			
	1,000	2,000	3,000	4,000
Auto-enfriados	30°C	28°C	25°C	23°C
Enfriados con aire forzado	30°C	26°C	23°C	20°C
Enfriados con aire y líquido aislante	30°C	26°C	23°C	20°C

- b) En caso de que la temperatura ambiente promedio máxima exceda los valores antes mencionados, pero sin sobrepasar su temperatura media ambiente de diseño podrá operar a capacidad reducida utilizando el factor de corrección señalado a continuación:

TIPO DE ENFRIAMIENTO	FACTOR DE CORRECCION CADA 100 m (%)
Auto-enfriados	0.4
Enfriados por agua	0.0
Enfriado por aire forzado.	0.5
Enfriado con aire y líquido forzados	0.5
Enfriado con agua y líquido aislante forzados	0.0

No debemos olvidar que esta operación a capacidad reducida puede afectar al transformador y sobre todo a los aislamientos, si no se tienen las precauciones debidas.

1.4 Condiciones especiales del lugar de operación.

En algunas ocasiones, debido a las características de los procesos industriales que se realizan alrededor del lugar de operación de nuestro transformador, debemos considerar ciertas condiciones tales como:

- a) Vapores dañinos, exceso de polvo, ambiente salino o corrosivo, humedad excesiva, etc.
- b) Vibraciones excesivas debidas a procesos industriales, así como la determinación de una zona sísmica.
- c) Dificultad para su almacenaje o instalación.
- d) En general cualquier circunstancia física o atmosférica que pueda afectar al equipo.

2. CRITERIOS DE SELECCION DE ACUERDO A LAS CARACTERISTICAS ELECTRICAS.

Para la correcta selección de nuestro equipo el ingeniero de proyecto deberá analizar todas las características eléctricas del sistema que el transformador va a alimentar, ya que de un correcto y completo estudio dependerá la selección del transformador adecuado.

Una vez realizado este estudio debemos determinar los siguientes parámetros básicos:

- a) Capacidad.
- b) Número de fases.
- c) Frecuencia de operación.
- d) Voltaje primario y secundario así como el tipo de conexión para sus devanados.

2.1 Parámetros básicos.

- a) Capacidad.

La capacidad nominal de un transformador se define como los kva que su devanado secundario es capaz de operar por un tiempo específico, bajo condiciones de tensión y frecuencia de diseño, sin que la temperatura promedio de un devanado excede la temperatura de operación para la cual fue diseñado. Es sumamente importante el cálculo de esta capacidad del transformador, pues de lo contrario se puede llegar a la situación de tener capacidad ociosa, lo cual representa valores altos de corriente de excitación y una inversión no amortizable.

Desgraciadamente es práctica usual el sumar todas las capacidades de las cargas a alimentar y el total considerarlo la capacidad del transformador, cuando la demanda máxima no sobrepasa el 40 ó 50% de dicha capacidad, teniendo un transformador sobra

do con capacidad ociosa injustificable.

b) Número de fases.

Por versatilidad del sistema, así como por normalización de los sistemas industriales se pueden utilizar equipos monofásicos o trifásicos, siendo estos últimos los mas populares.

El ingeniero de proyecto puede seleccionar cualquiera de las dos formas existentes para tener un suministro trifásico:

- Transformador trifásico.
- Banco trifásico formado con tres transformadores monofásicos.

Esta última opción ofrece la versatilidad de poder tener un transformador de reserva el cual podrá sustituir cualquiera que falle manteniendo la continuidad del servicio.

Además, podemos tener la opción de conectarlos de diversas formas, delta, estrella o incluso en delta abierta.

c) Frecuencia de operación.

La frecuencia de operación se encuentra normalizada por el sistema de alimentación del equipo. En la República Mexicana todo el sistema de distribución, transmisión y generación de energía eléctrica se encuentra normalizado en 60Hz.

d) Voltaje primario y secundario así como el tipo de -

conexión de los devanados.

El voltaje de alta tensión o de alimentación primario lo conoceremos de acuerdo al suministro con que cuenta nuestro proyecto. Podemos tener una sola sub-estación o varias dependiendo de la tensión de suministro y la carga a alimentar.

Para nuestro caso en que estamos analizando la forma de seleccionar un transformador de media potencia son voltajes no mayores a 34,500 volts, se utiliza normalmente una sola sub-estación para reducir el voltaje a voltaje de operación, es decir, podemos instalar aparatos con relación 34,500/220 ó 34,500/440 volts con una operación óptima.

En el voltaje secundario o de baja tensión es recomendable el contar con una conexión estrella, ya que forzosamente tendremos cargas trifásicas y monofásicas y dicha conexión nos puede ofrecer los valores de tensión normalizados en la industria como es el 480/277 volts, 440/254 volts y el 220/127 volts. Al quedar especificado la tensión o voltaje de operación, automáticamente estamos estableciendo la clase de aislamiento, el valor de voltaje de la prueba de aplicado así como el nivel básico de impulso.

Debido a que el sistema de alimentación presenta un voltaje nominal con ciertas tolerancias y variacio-

nes es conveniente el colocar un cambiador de derivaciones en el devanado de alta tensión para mantener siempre el mismo voltaje secundario y de esta manera no afectar la carga instalada.

Por norma, el valor de la variación que se obtenga con las derivaciones no debe exceder del 10% de la tensión nominal. El número mas usual de derivaciones es cuatro, cada una de 2.5% del voltaje nominal, colocadas dos arriba y dos abajo del mismo.

2.2. Parámetros técnicos.

Una vez determinados los parámetros básicos es necesario definir algunos otros que son importantes para la buena selección de nuestros componentes tanto del propio transformador como del resto del sistema.

A continuación enumeraremos los parámetros técnicos que a mi juicio son importantes para una buena selección del transformador. Cabe mencionar que es práctica común que estos valores no sean proporcionados por el ingeniero de proyecto sino solicitados al fabricante y evaluados posteriormente.

a) Pérdidas del transformador.

Como sabemos existen básicamente dos tipos de pérdidas, en vacío y con carga, las cuales nos ayudan a conocer la eficiencia del transformador, y por tanto determinar la calidad del equipo.

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

b) Corriente de excitación.

Mientras menor corriente de excitación tengamos, menores pérdidas tendremos y por tanto mayor eficiencia; esta corriente es la que tiene la función de hacer trabajar al circuito magnético.

c) Impedancia.

El conocimiento del valor de la impedancia de un transformador, es necesario para la selección de protecciones adecuadas tanto del propio equipo, como para el sistema completo. Hay que recordar que en caso de un corto circuito el transformador es un alimento mas del sistema, siendo una impedancia limitadora de corriente. Para los valores de norma, favor de referirse al Apéndice I.

d) Regulación.

El porcentaje de regulación será la diferencia existente del voltaje con carga y sin carga entre el voltaje con carga, por lo tanto va a ser función directa de las pérdidas y del factor de potencia en operación normal.

e) Desplazamiento angular.

El desplazamiento angular de un transformador polifásico es el ángulo entre el vector que representa la tensión de línea a neutro de una fase de alta tensión, y el vector que representa la tensión de línea a neutro, en la fase correspondiente en el -

tado de baja tensión.

Estos son sólo los principales parámetros eléctricos que debemos considerar, mas no los únicos. El ingeniero de proyecto podrá ampliar esta información de acuerdo a su propio proyecto.

3. CRITERIOS DE SELECCION DE ACUERDO A LAS CARACTERISTICAS TERMICAS.

Como hemos visto a lo largo de este estudio la temperatura es un parámetro sumamente importante para el diseño como la operación de nuestro equipo.

3.1 Sobre-elevación de temperatura.

La elevación de la temperatura de un transformador o partes de éste, sobre la temperatura ambiente, cuando se prueba de acuerdo a su capacidad o en operación no debe de exceder de 55°C ó 65°C según su propio diseño. Se puede lograr la combinación de las dos sobre-elevaciones de temperatura en lo que se conoce como sobre-elevación de temperatura de 55/65°C en la cual el transformador es diseñado y construido con aislamientos para 65°C de sobre-elevación de temperatura y con un área de disipación de 55°C. Dicha construcción permite al transformador operar a plena carga con una sobre-elevación de temperatura y se puede proveer una sobrecarga constante del 12% al operar

a 65°C sin ocasionar daño alguno al transformador.

3.2 Sistemas de enfriamiento.

Para mantener una buena temperatura de operación se debe seleccionar correctamente el sistema de enfriamiento. Es te puede depender tanto de las condiciones climatológicas del lugar de operación, así como de las condiciones de - carga.

Si eventualmente se van a aplicar sobrecargas al sistema puede resultar conveniente el colocar ventiladores (siste ma FA), para mantener una correcta temperatura de opera- ción, asimismo si las condiciones ambientales suelen ser en ocasiones extremas en cuanto a temperatura puede ser - conveniente este sistema.

Para transformadores tipo sub-estación de media potencia - se manejan como sistemas de enfriamiento básicamente dos tipos:

- a) Auto enfriado (OA)
- b) Auto enfriado con aire forzado (OA/FA)

Además del diseño 55/65 que en un transformador hasta de 2,000 kva nos puede ofrecer un incremento de carga hasta del 28.8% implementándose el aire forzado, mientras que para aparatos de mas de 2,001 kva puede llegar este por- centaje de sobrecarga a 40. Todo esto sin representar - un gran incremento en la inversión.

4. CRITERIOS DE SELECCION DE ACUERDO A LAS CARACTERISTICAS MECANICAS.

La determinación de las características mecánicas del transformador están en función en gran parte de las características eléctricas, térmicas y ambientales ya determinadas.

4.1 Construcción del tanque.

El tanque de cualquier transformador deberá estar construido de tal manera que, totalmente ensamblado, pueda soportar sin deformación permanente una presión 25% mayor que las presiones máximas de operación que resulten del sistema de preservación de líquido aislante empleado.

Va a ser diseñado con registros de mano en la cubierta del tanque para la realización de inspecciones visuales en caso de falla sin tener que desoldar o desatornillar toda la tapa.

Para el correcto diseño del tanque requerimos conocer cual va a ser el sistema de preservación de líquido a utilizar.

4.2 Sistemas de preservación de aceite.

Como hemos visto podemos tener básicamente dos tipos de sistemas de preservación de aceite, los cuales son tanque sellado, con aire o gas inerte, y tanque conservador; siendo recomendado el primero para transformadores de ca-

pacidades de 3,000 kva o menores.

4.3 Base del transformador.

Dependiendo del tipo de instalación que se quiera realizar podemos especificar la base en dos formas:

- a) Deslizable.
- b) Ruedas orientables.

Debemos considerar que cuenten con provisión para anclaje o fijación, así como con provisión para maniobras como pa-
lanqueos y uso de gatos.

4.4 Cubierta o tapa del tanque.

La cubierta del tanque podrá ser soldada o atornillada te-
niendo cuidado de utilizar convenientes empaques de neo-
preno que nos garanticen las condiciones de hermeticidad.

4.5 Accesorios.

Estos deberán de ser especificados de acuerdo a los siste-
mas solicitados y en función de los dispositivos de pro-
tección y alarma que requieramos en nuestro sistema.

5. CONCLUSIONES.

Los criterios mencionados en este capítulo son una guía para
el diseño de una completa y correcta especificación de un -
transformador tipo subestación de media potencia; sin olvidar

que ésta será tan amplia como el ingeniero de proyecto desee.

En el Apéndice II se enumeran las principales normas nacionales e internacionales que pueden ser un complemento sumamente útil, así como el consultar a los diversos fabricantes para conocer sus propias normas de fabricación nos dará la pauta para la correcta selección de nuestro equipo.

Es importante definir cuales son las pruebas de aceptación que solicitaremos al fabricante para la verificación del diseño y fabricación del transformador en base a nuestras necesidades.

CONCLUSIONES

Como hemos visto a lo largo de nuestro estudio, el transformador, a pesar de ser una máquina estática, puede ser sumamente sofisticada, ya que presenta parámetros eléctricos sumamente importantes que hay que cuidar en la fabricación, tales como son pérdidas, eficiencia y regulación. Asimismo presenta parámetros térmicos y mecánicos que no pueden despreciarse. La temperatura de operación será un factor determinante para la implantación de varios sistemas y accesorios; esto sin olvidar las condiciones de servicio a las que trabajará el transformador.

De una correcta selección del sistema de preservación de aceite y del sistema de enfriamiento, obtendremos una larga vida útil del transformador operando a condiciones normales.

De lo anterior podemos concluir que de una correcta selección de sistemas, y de un correcto mantenimiento del aceite dependerá la vida del equipo de los aislamientos.

Cabe hacer notar que el transformador puede ser tan versátil como deseemos, ya que podemos variar los parámetros de acuerdo a las condiciones de servicio inmediatas y pensar a un mismo tiempo en las futuras.

Es importante hacer mención que el ingeniero de proyectos deberá tener un enfoque general de todo el sistema para poder seleccionar un transformador, ya que esto se ve afectado tanto por la línea

de alimentación como por los procesos productivos que va a alimentar.

Paralelamente el ingeniero de proyectos debe de tener en cuenta el aspecto económico, ya que el transformador es un equipo de alto valor. Por ejemplo, en la actualidad un transformador de 1,000 kva OA, tres fases de clase 25 kv tiene un costo aproximado en el mercado actual de \$25'000,000.00.

Por esta razón es importante especificar correctamente un transformador para su operación inmediata y futura, ya que la incorrecta selección de sistemas y accesorios adicionales puede ocasionar el tener que hacer una inversión muy elevada a futuro, siendo quizás mínima actualmente. El implementar actualmente un sistema completo de ventilación forzada puede representar un aumento del 8% aproximadamente del valor del equipo auto enfriado, así como el solicitar un equipo diseñado para operar a una sobreelevación de temperatura de 55/65°C puede representar un 5% adicional en el precio.

Por lo tanto, una correcta selección técnico-comercial nos permitirá tener el transformador adecuado para nuestro proyecto a un buen precio y con grandes beneficios productivos en el momento de iniciar su operación, así como para un futuro.

Es importante tomar en cuenta que el transformador tiene una vida útil larga, pero no es eterno y siempre se encuentra expuesto a fa

llas, incluso de tipo atmosférico, por lo que es conveniente pensar en como hacer versátil nuestro sistema. Lo anterior lo podemos lograr con la implantación de dos transformadores en lugar de uno, - operando simultáneamente, logrando que al fallar uno podamos tener parte de la planta operando, o bien la adquisición de dos transformadores similares para guardar uno de reserva. Esto puede ser conveniente si analizamos los índices de inflación existentes en el - país.

Por último, no olvidemos que este trabajo tiene la función de orientar al ingeniero de proyectos y al comprador en como realizar la selección de un transformador, mas su conocimiento no debe de parar - en este estudio, sino que es recomendable el ampliar la información hasta donde sea necesario.

El transformador será por tanto, especificado, seleccionado y fabricado de acuerdo a las necesidades específicas de cada proyecto, pudiendo ser tan versátil y sofisticado como el ingeniero de proyectos y de diseño deseen.

APENDICE I

TABLAS DE DATOS NOM-J-284.

TABLA 1.

CAPACIDADES PARA TRANSFORMADORES AUTO ENFRIADOS Y CON PASOS FORZADOS DE ENFRIAMIENTO.

MONOFASICOS KVA			TRIFASICOS KVA		
AUTO ENFRIADO	PRIMER PASO	SEGUNDO PASO	AUTO ENFRIADO	PRIMER PASO	SEGUNDO PASO
833	958	-	750	862	-
1,000	1,250	-	1,000	1,150	-
1,250	1,437	-	1,500	1,750	-
1,667	1,917	-	2,000	2,300	-
2,500	3,125	-	2,500	3,125	-
3,333	4,167	-	3,000	3,750	-
5,000	6,250	-	3,750	4,687	-
6,667	8,333	-	5,000	6,250	-
8,000	10,000	-	7,500	9,375	-
10,000	13,333	16,667	10,000	12,500	-
12,500	16,667	20,833	12,000	16,000	20,000
16,667	22,222	27,777	15,000	20,000	25,000
20,000	26,667	33,333	18,000	24,000	30,000
25,000	33,333	41,666	20,000	25,000	30,000
33,333	44,444	55,555	24,000	32,000	40,000
55,000	85,000	110,000	30,000	40,000	50,000
			37,500	50,000	62,500
			45,000	60,000	75,000
			50,000	66,667	83,333
			60,000	80,000	100,000
			75,000	100,000	125,000
			100,000	133,333	166,666

TABLA 2.

TENSIONES NOMINALES

volts

440
480
2,400
4,160
6,000
13,800
23,000
34,500
69,000
85,000
115,000
138,000
161,000
230,000
400,000

TABLA 3.

IMPEDANCIA REFERIDA A 60 HZ.

CLASE	NBA1	kv		Z (tanto por ciento)		
		ALTA TENSION	BAJA TENSION	OA	FA, FOA 1er.PASO	FA, FOA 2o.PASO
15	110	15	1.2-15	4.0- 7.0	4.0- 7.5	-
25	150	25	1.2-15	4.0- 7.0	4.0- 7.5	-
34.5	200	34.5	1.2-15	4.5- 7.5	4.5- 8.0	-
46	250	46	1.2-25	5.0- 8.0	5.0-10.5	
69	350	69	1.2-34.5	5.0- 9.0	6.0-12.0	7.0-15.0
92	450	92	15 -34.5	5.0- 9.0	7.0-12.0	8.0-15.0
115	550	115	15 -34.5	6.0- 9.5	7.0-14.0	8.0-16.0
138	650	138	15 -34.5	6.0-10.0	7.0-14.0	8.0-16.0
161	750	161	15 -69	6.0-10.0	8.0-15.0	9.0-17.0
196	900	196-230	15 -69	7.0-11.0	9.0-15.0	10.0-18.0
230	1,050	230	15 -69	7.0-12.0	9.0-16.0	10.0-19.0
315	1,425	315-400	15 -25	8.0-12.0	10.0-16.0	10.0-20.0
315	1,425	315-400	34.5-161	9.0-13.0	10.0-17.0	10.0-21.0

TABLA 4.

TRANSFORMADORES DE POTENCIA

CLASE DE AISLAMIENTO	NIVEL BASICO DE IMPULSO
kv	kv
1.2	45
2.5	60
5.0	75
8.7	95
15	110
25	150
34.5	200
46	250
69	350
92	450
115	550

APENDICE II

NORMAS APLICABLES A TRANSFORMADORES

NORMAS.

Para transformadores de potencia existen entre otras:

CONNIE
Consejo Consultivo Nacional de Normalización de la Industria Eléctrica.

Norma para Transformadores de Potencia.

ANSI
American National Standard Institute.

ANSI C57.12.00-1973 / IEEE Std - 462 - 1973.
General Requirements for Distribution, Power and Regulating Transformers.

ANSI C57.12.10-1969.
Requirements for Transformers, 138,000 volts and below 501 through 10,000/13,333/16,667 kva, single phase 501 through 30,000/40,000/50,000 kva, three-phase.

ANSI C57.12.21-1969
Requirements for pad-mounted compartmental-type, single phase distribution transformers (high voltage, 16,340 GROV/9,430 volts and below; low voltage, 240/120; 167 kva and smaller.

DGN
Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
Dirección General de Normas.
Norma Oficial Mexicana.

NOM-J-271-1985
Técnicas de prueba en alta tensión.

NOM-J-116-1987
Productos eléctricos, transformadores de distribución tipo poste y tipo estación.

NOM-J-123-1982
Aceite aislante no inhibido para transformadores.

NOM-J-169-1987

Productos eléctricos - transformadores y autotransformadores de distribución y potencia - métodos de prueba.

NOM-J-284-1986

Productos eléctricos - transformadores de potencia.

BIBLIOGRAFIA

BEAN, RICHARD L.
CHACKAN, JR., NICHOLAS.
MOORE, HAROLD M.
WENTZ, EDWARD C.

TRANSFORMERS FOR THE ELECTRIC POWER INDUSTRY

McGraw Hill Book Company, Inc.
U.S.A., 1959.

CAMARENA M., PEDRO

TRANSFORMADORES ELECTRICOS INDUSTRIALES .
Reparación, Diseño y Construcción.

Compañía Editorial Continental, S.A. de C.V.
México, 1985.

CANTU, LUIS L.

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

Límusa.
México, 1981.

ENRIQUEZ HARPER, GILBERTO.

CURSO DE TRANSFORMADORES Y MOTORES TRIFASICOS DE INDUCCION

Límusa.
México, 1979.

EDMINISTER, JOSEPH A.

CIRCUITOS ELECTRICOS

McGraw Hill de México, S.A. de C.V.
México, 1982.

GENERAL ELECTRIC

POWER TRANSFORMERS.

General Electric the Company.
Inglaterra, 1970.

GROSS, CHARLES A.

POWER SYSTEM ANALYSIS

John Wiley & Sons.
U.S.A., 1979.

PROLEC, S.A. de C.V.

TRANSFORMADORES PARA ELECTRIFICACION E INDUSTRIA

Prolec.
México, 1984.

SISKIND, CHARLES S.

ELECTRICAL MACHINES.
Direct and Alternating Current.

McGraw Hill International Book Company.
Tokyo, Japan, 1966.

SPURWAY, M.A.

TRANSFORMADORES INDUSTRIALES
Instalación y Conservación.

Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana.
España, 1965.