

80
2eg



Universidad Nacional Autónoma de México

FACULTAD DE INGENIERIA

PRUEBA DE CORTO CIRCUITO A TRANSFORMADORES
DE DISTRIBUCION.

T E S I S

Que para obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
p r e s e n t a n

JOSE ANTONIO MORALES FLORES
MARIO RAMON MEZA SANCHEZ

Dir. Ing. EUGENIO ALMANZA C.



México, D. F.

Febrero 1987



Universidad Nacional
Autónoma de México



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 está 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

	<u>Pág.</u>
INTRODUCCION	1
 CAPITULO I	
CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA PRUEBA DE CORTO-CIRCUITO.	3
1.1 Introducción al concepto de corto-circuito externo al transformador.	3
1.1.1 Corriente de falla simétrica.	4
1.1.2 Corriente de falla asimétrica.	5
1.1.3 Comportamiento general de una onda de corriente durante la ocurrencia de corto-circuito.	6
1.2 Fuerzas dinámicas en el transformador.	7
1.2.1 Fuerzas radiales.	9
1.2.2 Fuerzas axiales.	10
1.3 Efectos térmicos.	12
1.4 Principio básico de la prueba.	14
1.4.1 Modalidades de la prueba.	17
1.4.2 Valor de la potencia de prueba.	18
1.4.2.1 Potencia necesaria de laboratorio para la prueba.	19
 CAPITULO II	
PRUEBAS DE CORTO-CIRCUITO.	22
2.1 Generalidades.	22
2.2 Duración de las pruebas de corto-circuito.	23
2.3 Magnitud de la corriente de corto-circuito.	24
2.4 Cálculo de la temperatura del devanado durante un corto-circuito.	24
2.5 Cálculo de la corriente de corto-circuito.	25
2.5.1 Corriente simétrica.	26
2.5.2 Corriente asimétrica.	27
2.6 Aplicación de la falla a transformadores de dos devanados.	30
2.7 Conexión de la prueba.	30
2.7.1 Prueba trifásica.	30

	Pág.
2.7.2 Prueba monofásica.	31
2.8 Prueba de corto-circuito cortocircuitando un transformador previamente energizado.	31
2.9 Prueba de corto-circuito por aplicación de voltaje a un transformador previamente cortocircuitado.	32
2.10 Sincronización del tiempo.	33
2.10.1 Control de corriente de falla.	34
2.11 Medición de voltaje.	35
2.11.1 Medición de corriente.	36
2.12 Análisis y técnicas de interpretación de resultados.	38
2.12.1 Formas de onda de voltaje y corriente.	38
2.12.2 Cambios en la impedancia de dispersión.	40
2.12.3 Cambios de corriente de excitación.	41
2.12.4. Interpretación de registros de la prueba ITR (impulso a tensión reducida).	42
2.12.5 Inspección visual.	50
2.12.5.1 Transformadores tipo columna.	50
 CAPITULO III	
LABORATORIO DE PRUEBAS.	52
3.1 Diferencia entre laboratorio de alta tensión y laboratorio de alta potencia.	52
3.2 Definición e importancia de la prueba de alta potencia.	53
3.3 Objeto de un laboratorio de alta potencia-baja tensión.	54
3.4 Laboratorios de alta potencia en el mundo.	56
3.5 Clasificación de los laboratorios de alta potencia.	57
3.6 Características principales de los laboratorios de alta potencia.	58
3.6.1 Diagrama unifilar de un laboratorio de alta potencia.	59
3.7 Laboratorio de alta potencia baja tensión de LAPEM.	63
3.7.1 Diagrama unifilar.	64
3.7.2 Alimentación del laboratorio.	65

	Pág.
3.7.3 Distribución de la superficie del laboratorio.	65
3.8 Tipos de prueba.	67
3.8.1 Equipos a probar.	67
CAPITULO IV	
PRUEBA DE CORTO-CIRCUITO EN EL LABORATORIO.	69
4.1 Antecedentes.	69
4.2 Procedimiento de prueba de corto-circuito aplicada a transformadores de distribución.	71
4.2.1 Objetivo de las pruebas.	71
4.2.2 Características del transformador a probar (datos de placa).	71
4.2.3 Aplicación de la prueba.	71
4.2.4 Requerimientos de prueba.	72
4.3 Circuito de prueba para transformadores monofásicos.	74
4.4 Circuito de prueba para transformadores trifásicos.	75
4.5 Operación del circuito.	76
4.6 Pruebas de calibración.	77
4.7 Pruebas de desarrollo satisfactorio.	77
4.8 Oscilogramas.	78
4.9 Evaluación de resultados y conclusiones.	78
4.10 Prueba de corto-circuito aplicada al transformador 1.	79
4.11 Prueba de corto-circuito aplicada al transformador 2.	94
CONCLUSIONES.	107
APENDICE A: Asimetría de la corriente de falla.	108
APENDICE B: Flujo magnético en el transformador.	112
APENDICE C: Cálculo de los esfuerzos axiales y radiales en un transformador.	122
BIBLIOGRAFIA.	127

INTRODUCCION

Nos hemos abocado a desarrollar el tema de prueba de corto-circuito externo aplicado a transformadores, por considerar que, si bien este tema no es tan nuevo en los países altamente industrializados, sí es de reciente consideración en los países en vías de desarrollo como lo es el caso específico de México.

El objetivo del presente estudio es el de mostrar la potencialidad de esta prueba como una herramienta útil para comprobar el desarrollo tecnológico de los transformadores manufacturados en nuestro país. Y de esta manera repercutir directamente en la confiabilidad en servicio, así como en el abatimiento de costos de estos equipos.

Dado que este tema es de un amplísimo campo de acción, hemos tratado de dar un panorama generalizado, tratando de abarcar los aspectos principales que nos conduzcan al objetivo de la tesis.

Iniciamos con el tratamiento de los conceptos y definiciones generales de la prueba de c.c. lo que nos permite por otro lado, homogenizar términos que se mencionan a lo largo de este estudio.

Posteriormente nos adentramos en la normativa utilizada, que en nuestro caso se basa en las normas ANSI C.57.12.90 y C.57.12.00 de 1980, por considerar que tienen mucha similitud con las que se utilizan en México, además de que los documentos aquí presentados también han seguido esta normativa.

Continuamos con los aspectos inherentes al laboratorio de prueba, en donde afortunadamente nuestro país cuenta con el proyecto de LAPEM (Laboratorios de Pruebas y Ensayos de México), de -

C.F.E., con sede en Irapuato, Guanajuato, que está proyectado para ser el laboratorio de alta potencia más importante de México.

Esto nos dio la oportunidad de enfocar esta parte de la tesis, precisamente a este laboratorio.

Finalmente presentamos dos pruebas de c.c. aplicadas a transformadores de distribución monofásicos de las cuales se dan la evaluación de resultados y conclusiones, con lo que completamos y comprobamos los fines de este estudio.

Asimismo, esperamos que esta tesis sea de ayuda y pueda servir como una guía para todas aquellas personas interesadas en este tema.

CAPITULO I

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LA PRUEBA DE CORTO-CIRCUITO.

1.1 Introducción al Concepto de Corto Circuito (c.c.) Externo al Transformador.

Cualquier transformador requiere tener una capacidad de conducir una corriente de carga ligeramente mayor a su corriente nominal. Sin embargo, existe una condición adicional, para conducir una magnitud de corriente mucho mayor en períodos cortos de tiempo, lo cual no es muy usual pero está asociada con las aplicaciones normales del transformador en los sistemas de potencia.

Cuando ocurre una falla a tierra o entre líneas, en alguna parte del sistema, corrientes de magnitudes muy grandes circulan entre la fuente generadora y la falla, tales corrientes son conocidas como corrientes de corto-circuito.

Dichas corrientes someten al transformador a grandes esfuerzos Electrodinámicos y Térmicos.

La magnitud de la corriente de corto-circuito, está en función del sistema al cual es acoplado el transformador.

La corriente de c.c. está limitada, por la suma de la impedancia del transformador más la impedancia total del sistema entre la fuente generadora y la falla.

$$I_{s.c.} = \frac{I_n}{Z_t + Z_s}$$

donde

I_{sc} = Corriente de corto-circuito simétrica.
 I_n = Corriente nominal
 Z_t = Impedancia del transformador.
 Z_s = Impedancia del Sistema.

Los cálculos normales de corriente de c.c., se calculan en base a magnitudes de corriente rms en estado estable. Pero para fuerzas mecánicas, la consideración de corrientes instantáneas es de tomarse en cuenta, incluyendo cualquier valor transitorio que pudiera existir.

1.1.1 Corriente de Falla Simétrica.

Cuando la falla es aplicada para un instante en el cual tenemos una onda de voltaje senoidal pico, la forma de onda de corriente será senoidal pura (sin componente de c.d.)

La magnitud de pico será igual a 1.414 veces la magnitud en rms, fig. 1.1.

Dicha corriente es conocida como corriente de falla simétrica.

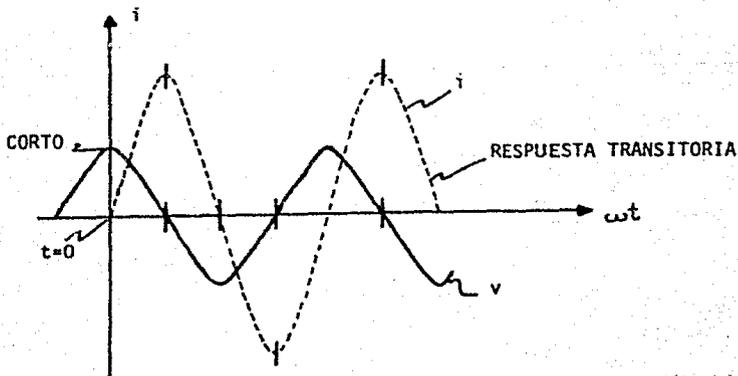


Fig. 1.1

1.1.2 Corriente de Falla Asimétrica.

Sin embargo, si la falla es aplicada en el instante cuando el voltaje es cero, la forma de onda de corriente será una onda senoidal completamente desplazada (componente de c.d.) igual al pico instantáneo de la magnitud de c.a., fig. 1.2. Dicha corriente es conocida como corriente de falla asimétrica.

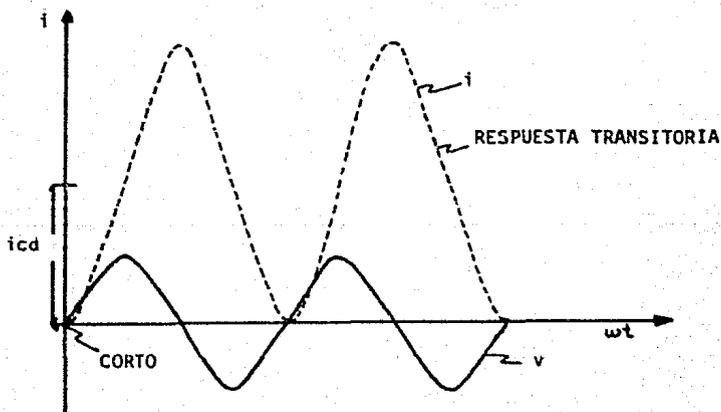


Fig. 1.2

1.1.3 Comportamiento General de una Onda de Corriente Durante la Ocurrencia de Corto-Circuito.

En general en la ocurrencia de una falla de corto-circuito externo en un transformador, la onda de corriente tendrá una componente en estado estable y una componente en estado transitorio, ésta última componente dura alrededor de 3 ó 4 ciclos, y posteriormente la onda tiende a estabilizarse.

En la fig. 1.3 se muestra este comportamiento.

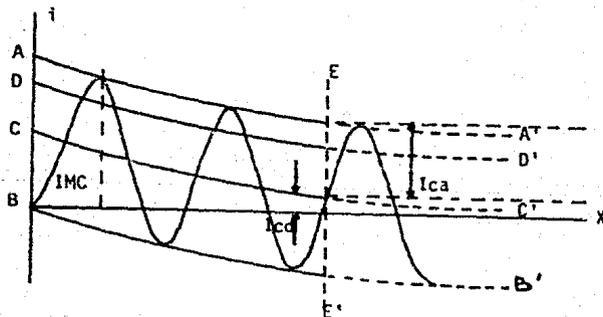


Fig. 1.3

- A A' } = Envolvente de la onda de corriente.
- B B' }
- B X = Línea de cero natural.
- C C' = Desplazamiento de la línea cero de la onda de corriente en cualquier instante (componente de corriente directa).

D D' = Valor eficaz de la corriente simétrica en cualquier instante, medida desde C C'.

E E' = Instante de separación de contactos (real o supuesto).

Ica = Valor de cresta de la componente de c.a. en el instante E E'.

Icd = Componente de corriente directa en el instante E E'.

$\frac{Icd \times 100}{Ica}$ = Porcentaje de la corriente de c.d. en el instante E E'.

I_{sim} = Corriente interruptiva simétrica = $\frac{Ica}{\sqrt{2}}$ (valor eficaz)

I_{asim} = Corriente interruptiva asimétrica.

$$I_{asim} = \sqrt{\left(\frac{Ica}{\sqrt{2}}\right)^2 + (Icd)^2}$$

I_{mc} = Corriente máxima de conexión (en valor cresta).

1.2 Fuerzas Dinámicas en el Transformador.

Los esfuerzos dinámicos en sistemas electromagnéticos son ocasionados por la reacción entre corrientes y campos magnéticos, esto es, los devanados de los transformadores se ven sometidos a fuerzas electromagnéticas al circular corrientes por ellos.

Básicamente estas fuerzas actúan entre conductores de un mismo devanado y entre los devanados. Estas fuerzas también están ligadas a la geometría de las bobinas del transformador.

En la fig. 1.4 tenemos el caso de dos bobinas concéntricas de dos vueltas cada una. Se muestran las fuerzas de atracción entre los conductores de una misma bobina, así como las fuerzas de re

pulsión entre ambas bobinas.

- \Rightarrow FUERZA DE ATRACCION.
 - \Rightarrow FUERZA DE REPULSION.
 - \rightarrow LINEAS DE FLUJO MAGNETICO.
- D_1 - DIAMETRO DE LA BOBINA 1
- D_2 - DIAMETRO DE LA BOBINA 2

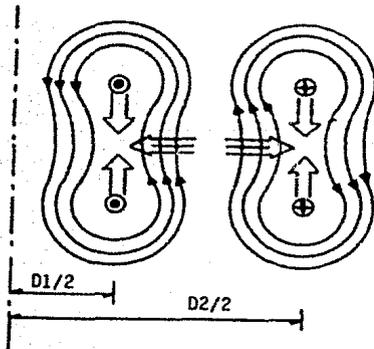


Fig. 1.4

Las fuerzas de repulsión de los devanados son conocidos como - fuerzas radiales.

Y las fuerzas de atracción entre conductores de una misma bobina

na son conocidas como fuerzas axiales de compresión.

1.2.1 Fuerzas radiales.

Si hablamos de un transformador de dos devanados concéntricos - tipo Columna, la componente principal del flujo de dispersión - es axial, y su interacción con la corriente circunferencial - (amp-vuelta) de los devanados, producen las fuerzas radiales.

Estas fuerzas actúan en dirección hacia afuera sobre el devanado exterior y en la dirección hacia adentro sobre el devanado interior, esto con respecto al eje del núcleo, fig. 1.5. y fig. 1.6.

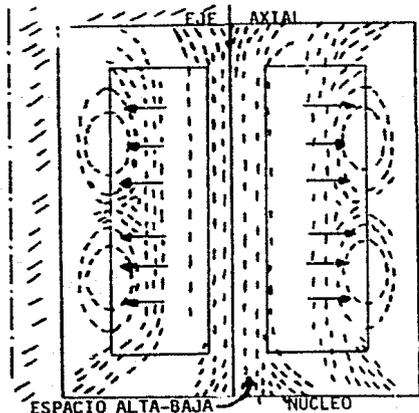


Fig. 1.5

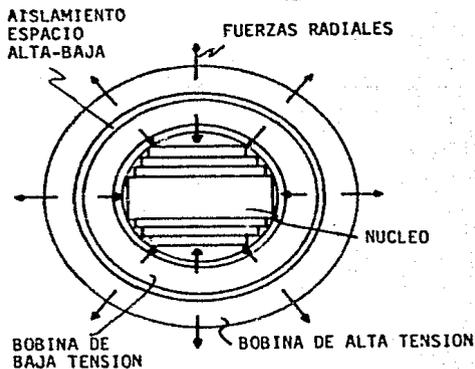


Fig. 1.6

1.2.2. Fuerzas Axiales.

En los extremos de los devanados, el flujo de dispersión tiene una componente radial, debido a su curvatura buscando acortar su trayectoria de regreso, la interacción de la componente radial del flujo de dispersión con la corriente del devanado circunferencial producen fuerzas axiales, las cuales tienden a comprimir las dos unidades aisladoras del devanado, fig. 1.7.

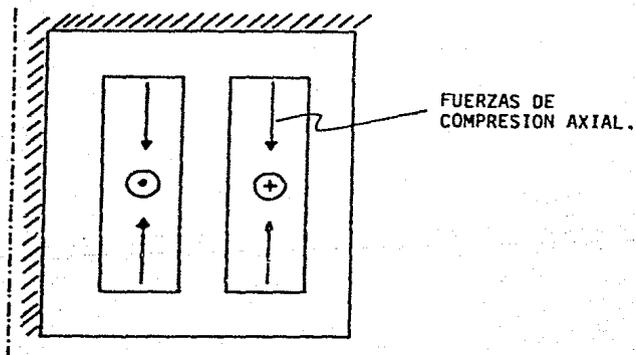


Fig. 1.7

La rigidez axial de la estructura de los devanados es determi-

nada primeramente por las características y dimensiones de las fibras del material aislante, localizadas en las unidades aislantes de la bobina o en el amarre final de la estructura.

La relación entre la respuesta elástica e inercial de las fuerzas de la bobina pueden variar en un rango considerable dependiendo del diseño del devanado y la distribución de la generación de fuerzas.

Aún cuando los esfuerzos axiales son menores que los radiales los primeros ocasionan más problemas ya que no es fácil sujetar axialmente a las bobinas y menos aun a los conductores en forma individual.

La importancia de sujetar convenientemente a los devanados es que, al desplazarse estos por la acción de los esfuerzos dinámicos, tiene lugar un incremento en la asimetría del arreglo de bobinas, y por lo tanto un aumento en el valor de la componente axial de los esfuerzos, fenómeno que se repite hasta que la corriente de corto-circuito deja en mal estado al transformador o bien, este último falla completamente.

El cálculo de los esfuerzos radiales se basa en que el flujo disperso axial se concentra casi exclusivamente al espacio alta-baja, lo que hace el cálculo relativamente fácil.

Por otro lado, el cálculo de los esfuerzos axiales es más complicado ya que el flujo disperso radial en transformadores con bobinas concéntricas no posee una distribución estable y uniforme en los diferentes arreglos de bobinas utilizados, por esto mismo se han desarrollado varios métodos que con diferentes aproximaciones, intentan obtener la solución para cada caso particular.

1.3 Efectos Térmicos.

Cuando un conductor en el devanado, es repentinamente sometido a una corriente de corto-circuito, rápidamente sufre un incremento de temperatura.

El calor producido por las altas temperaturas no puede ser disipado, en la duración de la falla de c.c., sin embargo, el incremento de temperatura puede ser calculado en base al almacenamiento de todo el calor, usando el calor específico del conductor. De la temperatura incrementada pueden resultar tres posibles consecuencias:

- a.- Debilitamiento mecánico del aislante por envejecimiento térmico.
- b.- Descomposición del aislante por efecto de gases.
- c.- Recocimiento del conductor.

Las primeras dos consecuencias están relacionadas estrechamente, una resulta a largo tiempo y la otra a corto tiempo. La degradación térmica de las propiedades mecánicas del aislamiento de celulosa es un bien conocido fenómeno y puede ser ilustrado en la fig. 1.8.

El hecho es que el debilitamiento del aislante será más susceptible a daños por cargas compresivas, flexiones o abrasión durante el corto-circuito. Recientes evaluaciones indican que mientras el envejecimiento térmico, es una consideración válida, el envejecimiento adicional producido por los eventos de c.c., no es significativo comparado con el continuo envejecimiento diario con cargas normales.

La degradación térmica durante la ocurrencia de c.c. producto

de gases de descomposición, ocasionados al someter a altas temperaturas el aislamiento de celulosa, reduce la integridad dieléctrica del transformador. Las burbujas de gas producidas en la superficie del conductor, podrían efectuarse en una región de altos esfuerzos dieléctricos, dado que el gas es mucho más débil dieléctricamente que el aceite o la celulosa; lo que puede ocasionar un rompimiento completo o parcial. Las temperaturas de operación máxima de los aislamientos, (110°C para carga nominal ó 180°C para sobrecarga), liberan gases lentamente, pero la estimación se acelera conforme la temperatura es incrementada.

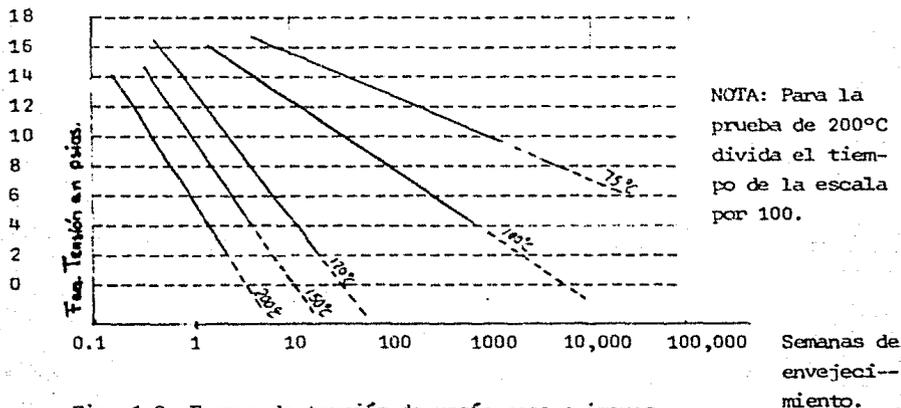


Fig. 1.8. Fuerza de tensión de vacío seco e impregnación de aceite 0.003 aislamiento de papel manila afectado por envejecimiento bajo aceite.

En ocasiones un conductor soporta temperaturas de sobre calentamiento, de hasta 250°C producto de corrientes de corto-circuito, en lapsos breves de tiempo.

La tercera consideración térmica es el recocimiento del conductor, después de un cierto número de ocurrencia de c.c., la elevación de temperatura podría gradualmente recocer el conductor reduciendo sus propiedades mecánicas, si la capacidad para soportar el corto-circuito de un diseño dado, depende de la fuerza producida por la deformación, entonces el efecto de recocido es de consideración.

Para evitar la tendencia de recocido se consideran los siguientes límites de temperatura.

Para conductores de aluminio 200°C y para conductores de cobre normal 250°C para transformadores sumergidos en aceite.

1.4 Principio Básico de la Prueba.

Los equipos de reactancia considerable, principalmente los transformadores, ofrecen dificultades especiales en el laboratorio - que merecen ser estudiadas a fondo:

Supóngase un generador de Fem alterna de valor E, del cual se desea una reactancia interna X_i tal que:

$$P_g = \frac{E^2}{X_i} = \text{cte} \quad (1.1.)$$

En las terminales de tal generador se desea conectar un transformador de reactancia X como se indica en la fig. 1.9. investigar cuál será la máxima potencia XI^2 transferible sobre éste.

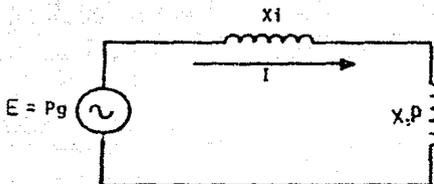


Fig. 1.9
Circuito para el análisis de la prueba de corto-circuito sobre un transformador.

La corriente I que aparece en el circuito es:

$$I = \frac{E}{X + X_1} = \frac{E}{X + \frac{E^2}{P_g}} = \frac{E P_g}{X P_g + E^2} \quad (1.2)$$

La P absorbida por la reactancia X es:

$$P = XI^2 = X \left(\frac{E P_g}{X P_g + E^2} \right)^2 = E^2 P_g^2 \left(\frac{X}{(X P_g + E^2)^2} \right) \quad (1.3)$$

La potencia máxima que puede ser transferida sobre la reactancia es aquella para la cual: $\frac{dP}{dX} = 0$

$$\frac{dP}{dX} = E^2 P_g^2 \left(\frac{(X P_g + E^2)^2 - 2X P_g (X P_g + E^2)}{(X P_g + E^2)^4} \right) \quad (1.4)$$

$\frac{dP}{dX} = 0$ si el numerador es nulo; lo cual se ve de:

$$(XPg + E^2)^2 - 2XPg (XPg + E^2) = 0 \quad (1.5)$$

$$XPg + E^2 \neq 0$$

De donde:

1º) El numerador de la deriva es $\neq 0$

2º) Se puede dividir todo por $(XPg + E^2)$

$$XPg + E^2 - 2XPg = 0$$

$$E^2 - XPg = 0 \quad (1.6)$$

$$X = \frac{E^2}{Pg} = X_i \quad (1.7)$$

En estas condiciones la potencia absorbida por la reactancia tiene el valor máximo P_m siguiente: Substituyendo en (1.3) el valor de (1.7)

$$P_m = E^2 Pg^2 \frac{X}{(XPg + E^2)^2} = E^2 Pg^2 \frac{E^2/Pg}{(E^2/Pg) Pg + E^2)^2} \quad (1.8)$$

$$P_m = \frac{E^4 Pg}{(E^2 + E^2)^2} = \frac{E^4 Pg}{4 E^4}$$

Finalmente

$$P_m = \frac{Pg}{4} \quad (1.9)$$

Por lo tanto no es posible probar un transformador que requiera una potencia mayor de 1/4 de la potencia de corto circuito disponible de la fuente.

La Fem ha sido considerada cualquiera, pero en la condición en que $p = P_m$ la E tiene un valor bien preciso que es de

$$E = (X+X) I = 2XI$$

(1.10)

o sea, que la tensión requerida de la fuente de potencia para la prueba es del doble de la caída de tensión en la reactancia, para lograr la máxima transferencia de potencia.

1.4.1 Modalidades de la Prueba.

Para realizar la prueba de corto-circuito a transformadores, existen dos posibilidades:

- 1a. Energizar el transformador y a continuación aplicar el corto-circuito cerrando un interruptor instalado del lado secundario como se indica en la figura 1.10

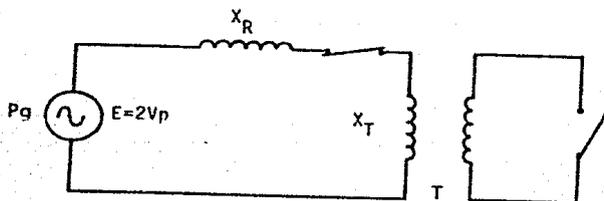


Fig. 1.10

- 2a. Cerrar el corto-circuito del lado secundario y aplicar la potencia por el lado del primario con el transformador desenergizado como se indica en la fig. 1.11

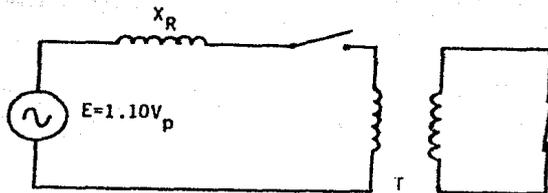


Fig. 1.11

En el primer caso puede ocurrir que la corriente de prueba se sume a los valores de corriente de excitación, esforzando más al transformador; en estas condiciones puede utilizarse una tensión de la fuente $E = 2V_p$, hacer $X = X_i$ y lograr la condición de máxima transferencia de potencia, lo cual es conveniente para el laboratorio, sin embargo, esta forma de prueba frecuentemente no es aceptada por el fabricante del equipo.

El segundo caso la limitante es que desde el inicio de la prueba E debe ser como máximo igual a 1.10 veces la tensión nominal del transformador permitida por la norma ANSI C.57-12.90-1980 parte II-2.1.1 dando como resultado una P_g mayor necesaria del laboratorio hasta más de 8 veces, dependiendo de la relación de las reactancias X_i y X .

1.4.2 Valor de la Potencia de Prueba.

La potencia de prueba P , depende de la tensión de prueba (V_p) y de la corriente por aplicar I , para transformadores trifásicos es igual a

$$P = \sqrt{3} I V_p I \quad (1.11)$$

En donde V_p , es un valor cercano a la tensión nominal (V_n) - del transformador, pero como máximo igual a $1.10 V_n$.

La corriente I , en la anterior expresión es la corriente de corto circuito en valor eficaz; la cual de acuerdo con la norma ANSI, C57.12.00-1980, se calcula por medio de la siguiente expresión.

$$I_{sc} = \frac{I_n}{Z_t + Z_s} \quad 1.12)$$

Donde:

- I_{sc} _____ Corriente de corto-circuito simétrica en rms amperes.
 I_n _____ Corriente nominal sobre una conexión de tap dada en rms Amps.
 Z_t _____ Impedancia del transformador para la misma conexión del tap, en por unidad sobre la misma potencia base como I_n .
 Z_s _____ Impedancia del sistema o de los aparatos permanentemente conectados al transformador.

1.4.2.1 Potencia necesaria de Laboratorio para la Prueba.

En la condición óptima de máxima transferencia de potencia, con la relación de reactividades: X_1/X igual a la unidad, lo cual condiciona a que la tensión de la fuente E sea igual al doble de la caída de tensión en el transformador de prueba, la potencia P_g de la fuente resulta ser cuatro veces mayor a la potencia de prueba P , pero como se mencionó al final de 1.4.1 no siempre es posible usar los valores óptimos desde el punto de vista del laboratorio.

Para valores de X_1/X diferentes a la unidad, la relación de potencias P_g/p adquiere valores mayores de cuatro.

En el circuito de la fig. 1.9, la potencia de la fuente es dada por la expresión (1.1) o sea $P_g = \frac{E^2}{X_i}$

La ecuación que rige el funcionamiento del circuito es:

$$E = (X_i + X) I \quad (1.10)$$

Sustituyendo en (1.1)

$$P_g = \frac{(X_i + X)^2 I^2}{X_i} \quad (1.1')$$

Por otra parte, la potencia consumida por el transformador en prueba es:

$$P = XI^2 \quad (1.3)$$

Dividiendo (1.1') por (1.3)

$$\frac{P_g}{P} = \frac{(X_i + X)^2 I^2}{XI^2} \quad (1.13)$$

Desarrollando la expresión anterior se llega a:

$$\frac{P_g}{P} = \frac{\left[\frac{X_i}{X} \right]^2 + 2 \left[\frac{X_i}{X} \right] + 1}{X_i/X} \quad (1.13')$$

La expresión (1.13') permite graficar la relación de potencias P_g/P en función de diferentes valores de X_i/X , como se indica en la fig. 1.12, de hecho P_g/P es la potencia del laboratorio expresado como un múltiplo de la potencia de prueba.

Puede notarse en la gráfica que el mínimo valor de la función P_g/P es igual a cuatro para un valor unitario de X_i/X , como ya se sabía. Esta condición sólo puede lograrse si se aplica la -

segunda modalidad de prueba.

Si se aplica la primera modalidad de prueba (1.4.1) por limitaciones en la máxima tensión normalizada por aplicar, la relación X_i/X resulta igual a 0.1 (para $E = 1.10 V_n$) y en consecuencia la relación de potencias será mayor a 8 veces como se señala en la gráfica.

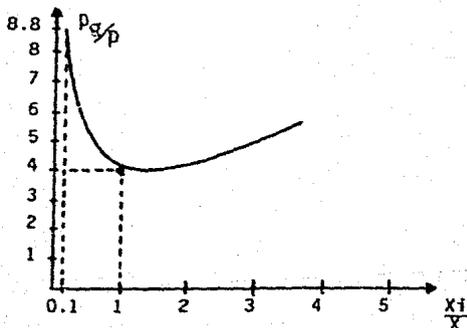


Fig. 1.12

Potencia del laboratorio en función de las reactancias del circuito en la prueba de transformadores.

CAPITULO II

PRUEBAS DE CORTO-CIRCUITO

2.1 Generalidades.

En este capítulo vamos a considerar los aspectos inherentes a la prueba de corto-circuito aplicada a transformadores de distribución, en base a las normas ANSI C57.12.90 de 1980 y a la C57.12.00 1980.

Los transformadores de distribución, de acuerdo a su capacidad, son catalogados como sigue:

- a) Una fase de 5 KVA a 500 KVA.
- b) Tres fases de 15 KVA a 500 KVA.

Los materiales convencionales usados en la construcción de transformadores, tienen un valor límite característico para soportar el esfuerzo producto de un corto-circuito. Por ejemplo, la capacidad que tiene el cobre templado, a soportar el esfuerzo en el devanado exterior del núcleo del transformador.

Sin embargo, en ciertas circunstancias no es posible conocer el esfuerzo a que se someterá al transformador, y en tales situaciones convendría necesariamente limitar la corriente de corto-circuito por medio de una impedancia externa a los devanados del transformador, ya que no es posible diseñar un devanado auxiliar a capacidad reducida para soportar fallas directamente sobre sus terminales, si los requerimientos de la corriente de corto-circuito no pueden cumplirse, los límites de la capacidad de corriente de corto-circuito del transformador, en este caso, deben ser especificados por el fabricante, y de

ben ser incorporados en los datos de placa de los transformadores.

Para transformadores de distribución, los límites de capacidad a soportar el corto-circuito, están dados en la tabla 2.1 y han sido aceptados como representativos para materiales convencionales usados en su construcción.

Monofásicos	Trifásicos	Capacidad de soportar en por unidad de corriente simétrica base el corto circuito.
5 - 25	15 - 75	40
37.5 - 100	112.5 - 300	35
167 - 500	500	25

TABLA 2.1 CAPACIDAD DE LOS TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION PARA SOPORTAR EL CORTO CIRCUITO.

La tabla 2.1 es aplicable a todos los transformadores de distribución, con voltaje nominal en el secundario de 600 volts y abajo de 600 volts. También a los autotransformadores de distribución con voltaje nominal en el secundario arriba de 660 volts, transformadores de distribución de dos devanados con voltaje nominal en sus secundarios arriba de 600 volts, serán diseñados para soportar el corto circuito, limitado solamente por la impedancia de los transformadores.

2.2 Duración de las Pruebas de Corto-Circuito.

Cuando las pruebas de corto circuito son realizadas, la duración de cada prueba será de 0.25 seg. excepto para la prueba de larga duración, la cual se calcula como sigue:

$$t = \frac{1250}{I^2}$$

donde t es la duración en segundos.

$$I = \frac{I_{sc}}{I_B}$$

I - es la corriente de corto-circuito simétrica, expresada como múltiplo de la corriente nominal base.

$$I_{sc} = \frac{I_n}{Z_s + Z_t}$$

I_n - corriente nominal.

Z_t - impedancia del transformador.

Z_s - impedancia del sistema.

Cuando las pruebas son hechas en forma consecutiva, sin dar tiempo para el enfriamiento de los devanados, se debe tener cuidado de no rebasar los límites de temperatura bajo condiciones de corto-circuito como son de 250°C para conductores de cobre ó 200°C para aluminio E.C.

2.3 Magnitud de la Corriente de Corto-Circuito.

La corriente simétrica de corto-circuito será calculada usando la impedancia del transformador solamente, excepto que la magnitud máxima de la corriente simétrica exceda los valores listados en la tabla 2.1, en cuyo caso también será usada la impedancia del sistema.

2.4 Cálculo de la Temperatura del Devanado Durante un Corto-Circuito.

La temperatura final T_f del devanado al final de un corto circuito de duración t , será calculado sobre la base de todo el calor abastecido o suministrado en el material del conductor y su aislamiento. (Todas las temperaturas están en grados celcius).

$$T_f = (T_k + T_s) m (1+E+0.6m) + T_s$$

donde:

$$m = \frac{Wst}{C (Tk + Ts)}$$

Estas ecuaciones son fórmulas aproximadas, y su uso será restringido a valores de $m = 0.6$ y menores.

Para valores de $m > 0.6$ deben ser usadas las siguientes fórmulas:

$$T_f = Tk + Ts \left(e^{2m} + E(e^{2m} - 1) - 1 \right) + Ts$$

donde:

Tk = 234.5 para el cobre.

Tk = 225 para el aluminio E.C.

Ts = temperatura inicial.

donde Ts puede ser:

30°C de temperatura ambiente, más la elevación de temperatura promedio del devanado, más la que recomienda el fabricante al asignarle los sitios más calientes.

30°C temperatura ambiente, más los límites de temperatura en los sitios más calientes, (dependiendo del tipo de transformador más apropiado).

e = base del logaritmo natural = 2.718

E = pérdidas por corriente de Eddy en por unidad, basadas sobre pérdidas en la resistencia Ws cuando empieza a elevarse la temperatura.

$$E = Er \left(\frac{Tk + Tr}{Tk + Ts} \right)^2$$

Er = pérdidas de corriente de Eddy en por unidad, a una temperatura de referencia.

Tr = temperatura de referencia.

Tr = 20°C de temperatura ambiente más la temperatura nominal promedio que alcanza el devanado.

W_s = pérdidas en la resistencia, en watts por libra de material conductor.

$$W_s = \left(\frac{W_r N^2}{M} \right) \left(\frac{T_k + T_s}{T_k + T_r} \right)$$

W_r = pérdida en la resistencia de los devanados, a corriente nominal y temperatura de referencia (pérdidas en watts).

N = magnitud de la corriente de corto circuito simétrica.

M = peso del devanado conductor en libras.

C = promedio de la capacitancia térmica por libras de material conductor y asociadas a las vueltas del aislamiento (en watts segundo por grado celcius). Estas serán determinadas por iteraciones de una u otra de las siguientes ecuaciones empíricas.

$$C = 174 + 0.0225 (T_s + T_f) + 110 \frac{A_i}{A_c} \quad \text{para cobre.}$$

$$C = 405 + 0.1 (T_s + T_f) + 360 \frac{A_i}{A_c} \quad \text{para aluminio.}$$

A_i = área de sección transversal del aislamiento.

A_c = área de sección transversal del conductor.

2.5 Cálculo de la Corriente de Corto-Circuito.

2.5.1 Corriente simétrica (transformador de dos devanados).

La corriente simétrica de corto-circuito está dada por la siguiente fórmula:

$$I_{sc} = \frac{I_n}{Z_s + Z_t} \quad \text{amp r.m.s.}$$

I_n = corriente nominal sobre la conexión del tap dado amp. rms.

Z_t = impedancia del transformador para la conexión del tap dada, en por unidad, sobre las mismas bases - de la potencia aparente como I_n .

Z_s = impedancia del sistema o aparatos conectados permanentemente, en por unidad, sobre la misma base de la potencia aparente como I_n .

$I = \frac{I_{sc}}{I_B}$ corriente simétrica de corto circuito, en múltiplos de corriente de base.

2.5.2 Corriente asimétrica.

El primer ciclo de la corriente pico asimétrica que el transformador soporta será determinado como sigue:

$$I_{sc} \text{ (pkasym)} = K I_{sc}$$

donde:

$$K = \left[1 + (e^{-(\theta + \pi/2)r/x}) \text{ Sen } \theta \right] \sqrt{2}$$

e = base del logaritmo natural.

θ = ang. $\tan x/r$ (en radianes).

x/r = relación reactancia a resistencia tomando corriente alterna efectiva. La reactancia y la resistencia en ohms.

Cuando la impedancia del sistema es incluida en el cálculo de la corriente de falla, la relación x/r de la impedancia externa será tomada igual que la del transformador, si no está especificada.

Los valores de K son dados en la Tabla 2.2

TABLA 2.2
 VALORES DE K

r/x	x/r	K
0.001	1000	2.824
0.002	500	2.820
0.003	333	2.815
0.004	250	2.811
0.005	200	2.806
0.006	167	2.802
0.007	143	2.798
0.008	125	2.793
0.009	111	2.789
0.010	100	2.785
0.02	50	2.743
0.03	33.3	2.702
0.04	25	2.662
0.05	20	2.624
0.06	15.7	2.588
0.07	14.3	2.552
0.08	12.5	2.518
0.09	11.1	2.484
0.1	10	2.452
0.2	5	2.184
0.3	3.33	1.190
0.4	2.5	1.489
0.5	2	1.746
0.6	1.67	1.669
0.7	1.43	1.611
0.8	1.25	1.568
0.9	1.11	1.534
1.0	1	1.509

NOTA: La expresión de K es una aproximación, los valores tabulados de K dados en la tabla 2.2 son calculados de esta aproximación y tienen una precisión del 7% de los valores calculados por métodos exactos.

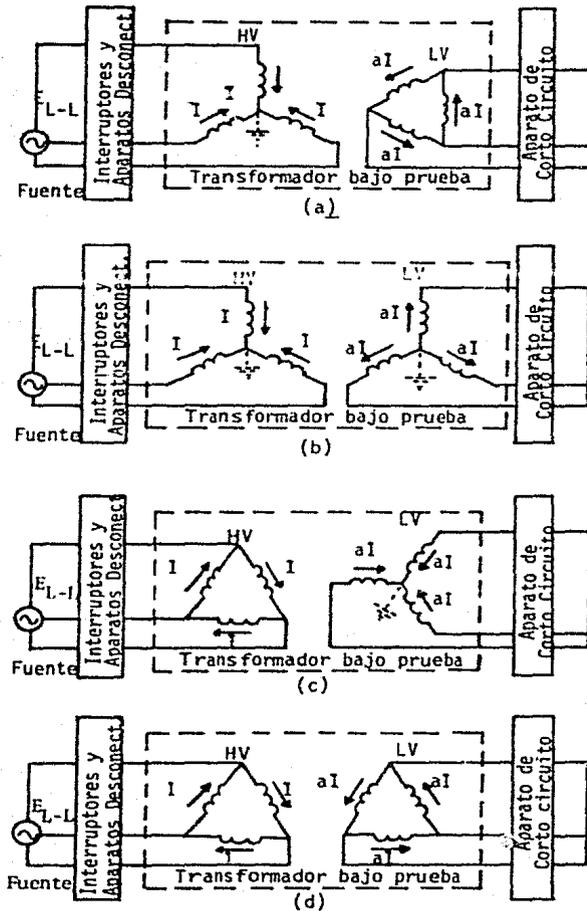


Fig. 2.1

Conexiones típicas de prueba para transformadores trifásicos

- a) Conexión Y - Δ
- b) Conexión Y - Y
- c) Conexión Δ - Y
- d) Conexión Δ - Δ

Es recomendable aterrizar el tanque y el neutro de los transformadores conectados en estrella y se mide la corriente de conexión a tierra.

2.6 Aplicación de la Falla a Transformadores de Dos Devanados.

El corto circuito puede estar aplicado en las terminales del devanado primario o secundario del transformador. Sin embargo, el método que se aplica preferentemente, es corto circuítando el secundario (baja tensión), dado que representa más fielmente la condición típica durante la falla.

Para obtener la corriente de prueba y mantener el voltaje terminal del transformador durante la prueba, el voltaje de la fuente puede ser más alto que el voltaje nominal de los devanados. La fuente de voltaje no debe exceder 1.10 veces el voltaje nominal del devanado, a menos que el responsable del diseño del transformador lo apruebe.

Para transformadores con devanados concéntricos sencillos es recomendable primero corto circuítar el devanador más cercano al núcleo, y posteriormente aplicar la alimentación de voltaje al devanado más alejado del núcleo. Esto evitará la posible saturación del núcleo y la corriente magnetizante, que pudiera sumarse a la corriente de corto circuito durante los primeros ciclos.

2.7 Conexión de la Prueba.

2.7.1 Prueba trifásica.

Para transformadores trifásicos con dos devanados, una fuente de potencia trifásica es usada, dependiendo de la conexión interna del transformador, las conexiones para esta prueba son mostradas en la fig. 2.1

Es recomendable aterrizar el tanque del transformador, el neu

tro de los autotransformadores, y el neutro de los transformadores conectados en estrella.

Es recomendable que la corriente de conexión a tierra sea medida.

2.7.2 Prueba monofásica.

Los transformadores monofásicos serán probados con una fuente de voltaje monofásica, que no debe exceder 1.10 veces el voltaje nominal del devanado.

2.8 Prueba de Corto-Circuito Corto Circuitando un Transformador Previamente Energizado.

Esta es la condición preferente y las mediciones de corriente pueden ser hechas como se describe en las mediciones de voltaje y corriente (2.11.1).

Cuando ambos devanados del transformador son conectados en delta, las mediciones directas de la corriente de fase no pueden ser hechas a menos que el transformador bajo prueba esté provisto con un transformador de corriente interno, de relación apropiada para la prueba.

Cuando no se provee de un transformador de corriente, las corrientes de línea son registradas en un monitor, así como la medición de la corriente asimétrica y el tiempo de aplicación de la falla para el instante en el cual se produce el máximo pico de corriente asimétrica en la fase del devanado requerido.

El máximo pico asimétrico es obtenido cuando el corto circuito es iniciado en el punto cero de la onda de voltaje. La fig. 2.1.1 ilustra este tipo de conexión de prueba.

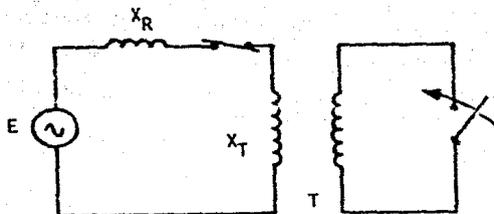


Fig. 2.1.1

2.9 Prueba de Corto-Circuito por Aplicación de Voltaje a un Transformador Previamente Corto Circuitado.

Cuando la prueba es realizada de esta manera fig. 2.1.2, partes del circuito magnético del transformador se saturan, si la saturación ocurre, la corriente de excitación requerida para el flujo necesario, puede ser más grande que la normal. Eso tiene el efecto de bajar la impedancia vista del lado de excitación y como consecuencia se da un incremento de corriente en el devanado de excitación. Por esta razón es recomendable que todas las corrientes bajo esta condición de prueba, sean registradas sobre el lado de la fuente del transformador que está siendo probado.

Para transformadores con conexión delta en el devanado prima-

rio y que no tiene transformadores de corriente interna, la corriente simétrica y la corriente asimétrica deben ser determinadas en la misma forma que la conexión delta - delta - antes mencionada.

Para minimizar o eliminar la saturación del núcleo en un transformador tipo columna, deben ser tomadas las siguientes precauciones:

- 1.- Energizar el devanado exterior y corto circuitar el devanado cercano al núcleo.
- 2.- Polarizar negativamente el núcleo con un flujo remanente, el cual simula la condición de flujo de operación normal en el núcleo, en el tiempo de aplicación de la falla.
- 3.- Una alternativa menos deseable es el desmagnetizar el núcleo antes de cada prueba.

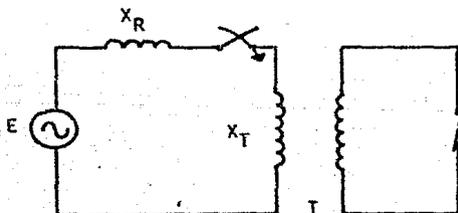


Fig. 2.1.2

2.10 Sincronización del Tiempo.

Para asegurar el control de la corriente asimétrica a tiempo

con la iniciación del corto circuito del transformador, el interruptor que cierra el circuito o el aparato usado para este fin, debe ser calibrado previamente para cada prueba. En algunos casos solamente es necesario hacer este chequeo de sincronización de tiempo antes de la primera prueba. En la mayoría de los casos el control del ángulo de cerrado entre $\pm 15^\circ$ desde el punto cero sobre la onda de voltaje producirá resultados satisfactorios y máxima asimetría.

2.10.1 Control de corriente de falla.

Para pruebas de fábrica es usual hacer una calibración y prueba de tiempo con aproximadamente el 50% de la alimentación de voltaje necesaria para producir la corriente de corto circuito.

Para pruebas de campo, esta prueba de calibración a voltaje reducido, sería hecha en la mayoría de los casos con transformadores de control de cambio de derivación, de la alimentación de voltaje. La magnitud de corriente de corto circuito está en función tanto del ángulo de cierre de falla como de la alimentación de voltaje, la impedancia total y la relación x/r del circuito.

Los métodos usuales del control de corriente de falla, en pruebas de campo o de fábrica, incluyen el ajuste de uno o más de los siguientes parámetros (equipos y circuitos de prueba).

- 1.- Control de la alimentación de voltaje con reguladores de voltaje o transformadores con derivadores.
- 2.- Control de la iniciación de la falla con respecto del ángulo de cerrado en la fuente de voltaje.
- 3.- Colocación de una resistencia adicional para compensar la

reactancia total del circuito.

- 4.- Elección especial de la conexión de falla del transformador o prueba del circuito con neutro aterrizado.

2.11 Medición de Voltaje.

Se registran las mediciones de voltaje en el oscilógrafo sobre el lado de la fuente del transformador bajo prueba, ya que el lado de bajo voltaje estará en cero. El método preferente para realizar las mediciones, es el usar transformadores de potencial de relación apropiada acoplada al aparato de registro de oscilogramas.

Los transformadores de potencial deben ser conectados línea a línea para pruebas trifásicas en transformadores con conexión delta en el devanado primario y línea a neutro para transformadores con conexión estrella, en el devanado primario donde el neutro es accesible.

Cuando el neutro del devanado conectado en estrella es aterrizado o para pruebas monofásicas con una línea aterrizada, si los divisores de capacitancia y resistencia son debidamente acoplados a los oscilogramas, las mediciones de voltaje efectuadas serán satisfactorias.

En todos los casos, la calibración del trazo del oscilógrafo de voltaje debe tener un mínimo de precisión de $\pm 5\%$.

Cuando el corto circuito es aplicado al transformador previamente energizado, la medición de voltaje debe ser hecha tan cerca como sea posible a las terminales primarias del transformador que está siendo probado.

Cuando la prueba es aplicada a un transformador previamente

corto circuitado, la medición de voltaje debe ser hecha sobre el lado de la fuente del interruptor del circuito primario.

2.11.1 Medición de Corriente.

La medición de corriente sobre el oscilograma debe hacerse para cada fase del transformador que está siendo probado.

Cuando las mediciones de corriente pueden ser hechas sobre el lado del secundario aterrizado del transformador y para pruebas monofásicas con una línea aterrizada, las derivaciones de corriente pueden ser usadas para mediciones de corriente de fase.

Las mediciones de corriente para establecer la magnitud de corriente de prueba, son normalmente hechas en las líneas de fase del devanado conectado en estrella para el transformador que está siendo probado.

Cuando este devanado está conectado a la fuente de energía, la corriente de fase es medida directamente. Cuando el devanado en estrella es el devanado secundario, es necesario convertir al devanado de la fuente por la relación de vueltas inversa del transformador.

Durante la prueba de corto circuito es recomendable que el tanque del transformador bajo prueba sea conectado a tierra a través de un aparato de registro de corriente fig. 2.2.

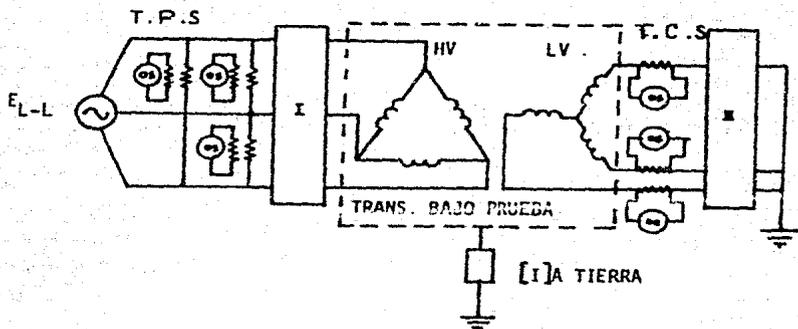


Fig. 2.2 Conexiones típicas de transformadores de potencial y transf. de corriente.

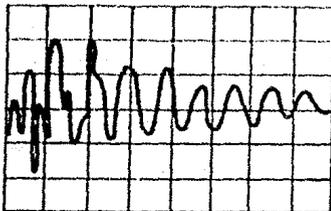
- I Aparatos interruptores.
- II Aparatos de corto circuito.
- T.P.S. - transformadores de potencial.
- T.C.S. - transformadores de corriente.
- OS - registros oscilográficos.

La calibración del trazo del oscilograma debe tener un mínimo de exactitud de $\pm 5\%$.

2.12 Análisis y Técnicas de Interpretación de Resultados.

2.12.1 Formas de onda de voltaje y corriente.

Cambios abruptos, en la forma de onda, ya sea de voltaje o de corriente durante la prueba indican una falla eléctrica interna, fig. 2.3



Antes de la prueba 10V/DIV

Fig. 2.3.a



Después de la prueba 20V/DIV

Fig. 2.3.b

Fig. 2.3

Cualquier incremento o variación mayor del 5% en magnitud - determinadas en los oscilogramas de corriente, ya sea durante el período asimétrico o simétrico, es un indicativo potencial de una falla mecánica o de una falla eléctrica interna.

Arcos externos son usualmente visibles y deben ser investigados antes de proceder con las pruebas siguientes.

Cambios en la magnitud o forma de onda, apreciables en los - oscilogramas de corriente, durante la prueba asimétrica, pueden ser indicativos de una saturación del núcleo o de una medición de tamaño impropio.

Incrementos de magnitud de corrientes insuficientes para operar el circuito de relevadores protectores y no atribuibles a condiciones externas del circuito, indican un rompimiento parcial del aislamiento del devanado (tierra anormal en el ensamble del devanado, arcos parciales, descargas internas, etc.)

Para localización de fallas intermitentes o parciales, se pueden hacer pruebas adicionales, eléctricas de rutina, como son:

- Relación de impedancia
- Pérdidas en el núcleo
- Resistencia de aislamiento

Cambios en la impedancia del transformador, en la regulación de voltaje de la fuente o el sistema de alimentación y sobrecalentamiento de conductores, serán algunas de las extensas - causas de reducciones de magnitud de los oscilogramas de corriente.

Si se presenta una reducción en la magnitud de la corriente - de falla, será necesaria la regulación de la fuente de voltaje o bien mantener el voltaje constante durante el período de falla.

Los mayores cambios en los oscilogramas de voltaje, tales - como colapsos de voltaje (caídas abruptas), indican una falla eléctrica interna, si no es atribuible a las condiciones - externas del circuito.

Cambios pequeños de voltaje durante la prueba, son usualmente indicativos de la necesidad de una mejor regulación de voltaje de la fuente o del circuito de prueba.

2.12.2 Cambios en la Impedancia de Dispersión.

La impedancia de dispersión debe ser medida entre cada par - de devanados, después de cada prueba de corto circuito.

Esta medición normalmente sería hecha por lo menos 15 minutos después de la prueba de corto circuito.

La experiencia demuestra que esta prueba de falla de corto - circuito no es muy sensitiva, incrementos en la impedancia - son un indicativo de movimientos en el devanado.

Pequeños incrementos después de cada prueba sucesiva indican - movimientos progresivos y pueden ser una predicción de falla.

Para los transformadores tipo columna con devanados concentrí - cos, pequeños movimientos en la dirección axial causarán pe - queños movimientos en impedancia, resultando fallas en el - transformador debido a su progresiva naturaleza.

En general, movimientos axiales incrementan fuerzas de corto - circuito, las cuales incrementan a su vez el movimiento, resul - tando finalmente el colapso del devanado.

Si la detección de la falla por prueba de impulso a tensión reducida indica movimiento axial, es recomendable retirar el tanque del transformador.

Por esta razón, una variación grande de impedancia durante las pruebas de corto circuito es permitido para este tipo de construcción de transformadores.

Cualquier cambio en la impedancia es aceptable sólo si la integridad del sistema de aislamiento es mantenido, por esta razón, es recomendable que las pruebas dieléctricas completas - incluyendo pruebas de impulso, sean hechas sobre transformadores con cambios de impedancia aprovechando los límites de la norma de prueba.

2.12.3 Cambios de corriente de excitación.

Pruebas de corriente de excitación deben ser hechas a voltaje nominal, pero pueden ser hechas a voltaje reducido si el núcleo es desmagnetizado antes de cada prueba.

El propósito de esta prueba es detectar cortos entre vueltas de un devanado. En el caso de devanado con conductores de derivación múltiple, se pueden detectar cortos entre diferentes vueltas.

Cualquier decremento en la corriente de excitación no es de significación y es probable que sea debido a una reducción de tensión o esfuerzo mecánico en el núcleo durante la prueba.

Transformadores de distribución con núcleo tipo Wound puede experimentar incrementos hasta del 25% sin perjudicar la fun-

ción del transformador debido a distorsiones pequeñas en el núcleo.

Un corto entre diferentes derivaciones de diferentes vueltas en un devanado con conductores de derivaciones múltiples pueden también incrementar la corriente de excitación para aquella pierna del núcleo en más de un 5% y una falla es nuevamente indicada.

En combinación con reducciones en la corriente de excitación por disminución de tensiones mecánicas, algunas derivaciones en corto pueden causar incrementos en la corriente de excitación que no están detectadas como fallas obvias.

En caso de que una falla sea sospechada, una confirmación puede ser obtenida por una comparación de pérdidas en el núcleo, antes y después de la prueba de corto circuito. Las pruebas de pérdidas en el núcleo deben ser hechas a voltaje nominal.

Para unidades trifásicas, es recomendable realizar las pruebas de pérdidas en el núcleo, por fase, para cada pierna del núcleo, haciendo una cierta concesión por las diferencias en pérdidas de cada pierna debidas a la asimetría del circuito magnético.

Las pérdidas en el núcleo, para una pierna que contenga un devanado en corto circuito usualmente provocará un incremento de por lo menos un 25%.

2.12.4 Interpretación de registros de la prueba ITR (impulso a tensión reducida).

La interpretación de los registros ITR se basa en la experien

cia y no es un procedimiento definido. Sin embargo, hay unos fenómenos básicos, los cuales parecen estar relacionados con tipos de cambios ocurridos dentro del devanado. Usando un circuito diferencial, un cambio grande en magnitud parece indicar movimientos radiales, mientras que los cambios o desplazamientos de fase parecen indicar que una de las piernas tiene movimiento axial.

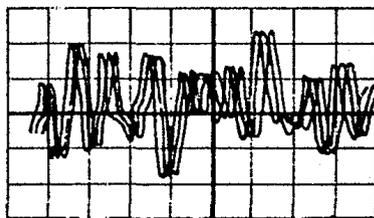
La correlación de este tipo de movimiento o cambio de un registro a otro, depende de la sensibilidad del equipo de prueba, y dado que las respuestas son variadas entre transformadores, es difícil establecer una base verdadera. En general el siguiente criterio es usado entonces para evaluar la posibilidad de daño interno en conjunción con otras pruebas de diagnóstico mencionadas anteriormente.

- 1.- Ningún cambio ocurre en los registros de I T R después de haber aplicado la prueba de corto circuito. La fig. 2.5 muestra registros I T R a la misma escala para mostrar que la amplitud y fase permanecen constantes a través de la prueba. Los registros están superpuestos y ligeramente corridos en la escala del tiempo.



200V/DIV 10 μ S/DIV

IMPULSO HV



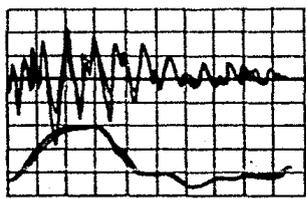
200V/DIV 10 μ S/DIV

IMPULSO LV

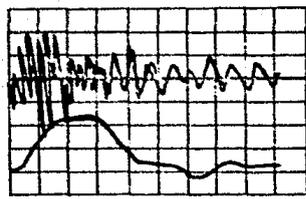
2.- Cambios pequeños pueden ocurrir en los registros ITR -
 antes y después de la primera prueba de corto circuito.
 Sin embargo, si no ocurren otros cambios, daños internos
 no están indicados, fig. 2.6



Superior 0.04 A/DIV
 1.0 S/DIV
 Inferior 20G V/DIV
 0.2 S/DIV



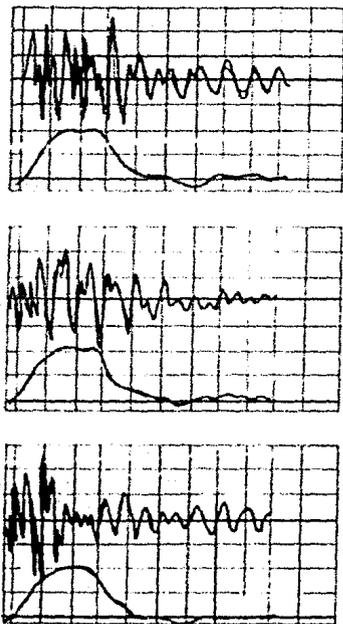
Superior 0.04 A/DIV
 1.0 S/DIV
 Inferior 200 V/DIV
 0.2 S/DIV



Superior 0.04 A/DIV
 1.0 S/DIV
 Inferior 200 V/DIV
 0.2 S/DIV

Fig. 2.6

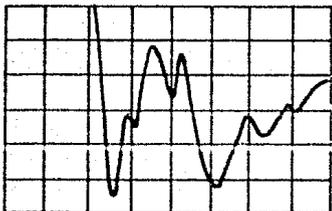
3.- Cambios pequeños pueden ocurrir en los registros ITR entonces sí se restaura la señal a la posición original. Esto indica que no hay daños internos, fig. 2.7



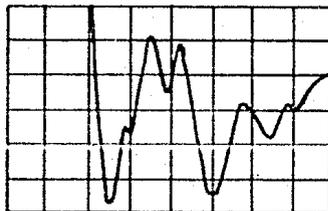
Superior 0.008 A/DIV 2.0 MS/DIV
Inferior 200 V/DIV 0.2 MS/DIV

Fig. 2.7

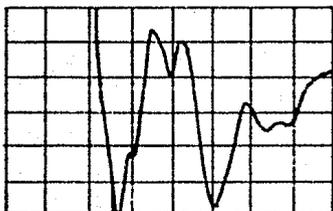
4.- Pequeños cambios pueden ocurrir y continuar creciendo en cada registro subsecuente de ITR, fig. 2.8, daños internos son incrementados y la inspección interna es indicada.



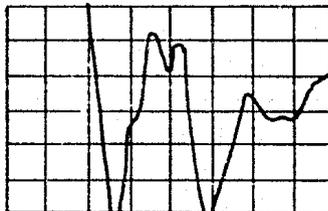
a) 10 V/DIV
10 S/DIV



b) 10 V/DIV
10 S/DIV



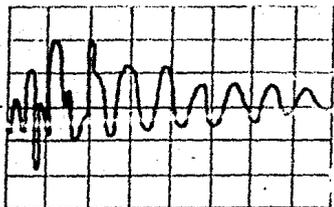
c) 10 V/DIV
10 S/DIV



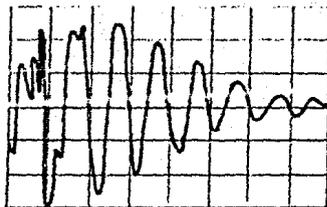
d) 10 V/DIV
10 S/DIV

Fig. 2.8

5.- Cualquier cambio grande indica un daño interno y el deseñ
samble para inspeccionar el devanado es conveniente, fig.2.9



Antes de la prueba 10V/DIV



Después de la prueba 20V/DIV

Fig. 2.9

En el uso del método diferencial, es necesario analizar las tres combinaciones registradas, para determinar qué devanado fue involucrado. Cambios en dos o tres devanados son más difíciles de separar y oscilogramas de corriente por devanado son recomendados para ayudar a determinar qué devanado está dañado.

Como fue mencionado antes, la deformación del devanado en la dirección radial, implica cambios de magnitud y frecuencia -

de los registros ITR mientras que cambios axiales parecen relacionarse con desplazamientos de fase.

Cuando cambios mayores axiales ocurren, la forma de onda puede desplazarse 180°, cambios radiales parecen mantener la componente de la frecuencia inicial, pero resultan cambios en amplitud.

2.12.5 Inspección Visual.

2.12.5.1 Transformadores tipo columna.

Cuando se realiza la inspección visual del transformador, sin tanque y con el yugo retirado, para el desensamblaje de bobinas, se recomienda seguir los siguientes puntos:

1.- Cables conductores y barras conductoras.

Los cables conductores o barras conductoras deben ser inspeccionados, por posibles movimientos mecánicos, atención especial debe dársele a la inspección de conductores de la sección de derivación (taps) y devanados reguladores, ya que estos conductores son frecuentemente difíciles de asegurar.

El daño a conductores que salen de los devanados internos, pueden justificar desensamblajes, para facilitar una inspección más detallada.

Los aparatos de seguridad para cables y barras, tales como estructuras de madera, aisladores y amarres de paño o trapo, deben ser inspeccionados por daños mecánicos.

de los registros ITR mientras que cambios axiales parecen relacionarse con desplazamientos de fase.

Cuando cambios mayores axiales ocurren, la forma de onda puede desplazarse 180°, cambios radiales parecen mantener la componente de la frecuencia inicial, pero resultan cambios en amplitud.

2.12.5 Inspección Visual.

2.12.5.1 Transformadores tipo columna.

Cuando se realiza la inspección visual del transformador, sin tanque y con el yugo retirado, para el desensamblaje de bobinas, se recomienda seguir los siguientes puntos:

1.- Cables conductores y barras conductoras.

Los cables conductores o barras conductoras deben ser inspeccionados, por posibles movimientos mecánicos, atención especial debe dársele a la inspección de conductores de la sección de derivación (taps) y devanados reguladores, ya que estos conductores son frecuentemente difíciles de asegurar.

El daño a conductores que salen de los devanados internos, pueden justificar desensamblajes, para facilitar una inspección más detallada.

Los aparatos de seguridad para cables y barras, tales como estructuras de madera, aisladores y amarres de paño o trapo, deben ser inspeccionados por daños mecánicos.

2.- Devanados.

Los conductores de los devanados deben ser inspeccionados por deformaciones mecánicas y daños eléctricos. Atención especial debe dársele a conductores en las terminales del devanado, - sección de derivación y cruce de conductores.

Normalmente la inspección de devanados de un transformador - que no ha sido desensamblado ~~deberá~~ estar limitado a la fase - del devanado exterior.

3.- Sistemas de aislamiento.

Se inspecciona el alineamiento vertical de las llaves espacia doras, donde es visible, se inspeccionan los cuellos de aislamiento y cilindros del devanado, si se encuentra evidencia de impactos o agolpamientos, puede ser necesaria una inspección más detallada de las estructuras de aislamiento interno y devanados.

4.- Núcleo.

Donde sea visible se inspecciona el alineamiento y laminaciones decoloradas por temperatura, así como la correa o banda - de tierra del núcleo, esto por evidencia de sobrecalentamiento.

5.- Interruptores de selección de relación.

Se inspeccionan los contactos de no carga y de desenergización así como el interruptor de selección de derivación por evidencia de sobrecalentamiento y desalineamiento.

CAPITULO III

LABORATORIO DE PRUEBAS

3.1 Diferencia entre Laboratorio de Alta Tensión y Laboratorio de Alta Potencia.

Desde el punto de vista del laboratorio de pruebas, debemos distinguir con toda claridad entre el laboratorio de alta tensión y laboratorio de alta potencia, ya que en ocasiones se confunden como si se tratara de lo mismo.

Un laboratorio de alta tensión se relaciona con el estudio del comportamiento de los aislantes entre los campos eléctricos que resultan de las altas tensiones.

Un laboratorio de alta potencia estudia el comportamiento de los equipos eléctricos ante los efectos electromagnéticos y térmicos que resultan de las elevadas corrientes que se generan durante un corto circuito.

Expresado de otra manera, en un laboratorio de alta tensión se trabaja con corrientes pequeñas y tensiones muy elevadas, es decir, primordialmente con el parámetro V. Y en un laboratorio de alta potencia se trabaja con corrientes grandes y tensiones relativamente bajas (parámetro I).

Rigurosamente hablando de pruebas de alta potencia, el término prueba de alta potencia no es exacto, ya que también en las pruebas de alta tensión entran en juego potencias instantáneas muy elevadas, pero con tiempos muy cortos del orden de microsegundos, sin embargo, cuando nos referimos a las pruebas de alta potencia se debe entender que son aquellas -

pruebas que suministran una potencia eléctrica muy elevada con una duración que puede ser de centésimas de segundo hasta unos cuantos segundos.

$$P_{cc} = KV_{Icc}$$

en donde:

K es un factor de fase que depende del tipo de prueba, es decir, trifásica o monofásica, el cual es $\sqrt{3}$ en el primer caso y 1 en el segundo; V siempre será la tensión aplicada al objeto en prueba entre fases y de fase a tierra respectivamente. Icc es la corriente de corto circuito de línea.

3.2 Definición e Importancia de la Prueba de Alta Potencia.

Las pruebas de alta potencia se refieren fundamentalmente a las pruebas de corto circuito, (alta corriente), que es preciso aplicar a los distintos equipos que se utilizan en las redes eléctricas y en las instalaciones industriales de alta tensión.

Los equipos eléctricos deben diseñarse y construirse desde el punto de vista de capacidad mecánica y térmica, en base al corto circuito máximo que deben soportar en servicio, el cual los someterá a los mayores y más bruscos esfuerzos.

Las pruebas de alta potencia constituyen uno de los aspectos más importantes por verificar en los equipos de alta tensión y se refiere a su capacidad a las altas corrientes. El otro aspecto es el de las pruebas de alta tensión o dieléctricas.

Tanto en los términos pruebas de alta potencia como pruebas

de alta tensión, se engloban conjuntos de pruebas con características particulares para cada uno de los equipos; ambos tipos de pruebas son de difícil y delicada realización, tanto por su carácter destructivo como por los procedimientos que se deben de seguir.

El desarrollo de la industria eléctrica en otros países, en buena parte se ha debido a los laboratorios de prueba. De aquí que cada vez se decida la instalación de nuevos laboratorios a pesar de su alta inversión.

Podemos dividir las pruebas de alta potencia en dos tipos:

- 1.- Pruebas de investigación y desarrollo. Efectuadas para el estudio del comportamiento de materiales y equipos bajo condiciones particulares de servicio, así como para el desarrollo de nuevos diseños en condiciones normales de servicio.
- 2.- Pruebas de prototipo y aceptación, que se realizan para verificar el comportamiento de un prototipo bajo condiciones normalizadas o para la aceptación de equipos que forman parte de un suministro.

3.3 Objeto de un Laboratorio de Alta Potencia - Baja Tensión (b.t).

La continuidad en el suministro de energía eléctrica a usuarios grandes y pequeños, es uno de los problemas de fundamental importancia en la operación de las instalaciones de distribución. La funcionalidad de los equipos del sistema de distribución y su simplicidad de diseño y construcción, dependen de

la correcta evaluación de sus características eléctricas y -
mecánicas para soportar las condiciones de funcionamiento -
normales y de falla. El constante aumento de la demanda de -
energía eléctrica en baja tensión y por lo tanto, las constan-
tes ampliaciones de las redes de distribución, exigen cada -
vez mejores características de funcionamiento a los equipos -
de transformación, distribución y protección, con la consi-
guiente necesidad de parte de los fabricantes de estos equi-
pos, de modificar constantemente sus características.

Aunque los equipos se pueden sobre-dimensionar o no necesi-
tar de un riguroso control de calidad, garantizando sus condi-
ciones de operación, es indispensable evaluar correctamente -
los parámetros que influyen en la simplicidad del diseño. Esto
sólo se puede realizar disponiendo de un laboratorio que permí-
ta probar las diversas soluciones técnicas.

La utilidad del laboratorio de b.t. en el cuadro general de -
las redes de distribución eléctrica se manifiesta, por lo tan-
to, en los siguientes aspectos.

- a) Provisión de los medios necesarios para una investigación -
aplicada a la industria.
- b) Colaboración en el desarrollo de prototipos.
- c) Prueba de los equipos.

En general una instalación para pruebas de corto circuito en -
b.t. debe disponer de la capacidad suficiente en tensión y co-
rriente para probar los equipos simulando las condiciones de -
falla y funcionamiento que pueden presentarse en los mismos, -
con la duración y modalidad previstas en normas nacionales y -
extranjeras o particulares del comprador.

3.4 Laboratorios de Alta Potencia en el Mundo.

El primer laboratorio de alta potencia en Europa se implementó en Alemania en 1912, este laboratorio constaba de un generador de aproximadamente 150 MVA. A partir de entonces varios fabricantes, compañías suministradoras y otras instituciones particulares han venido instalando también sus laboratorios.

La KEMA de Holanda, por ejemplo, instaló un laboratorio en 1937 de 500 MVA, también a base de un generador.

A la fecha cuenta ya con un laboratorio de potencia de 8400 MVA instalados, que logra absolutamente con generadores de corto circuito.

Este caso es excepcional, desde el punto de vista de que la inversión necesaria para un laboratorio de este tipo con generadores especiales, es enorme. Sin embargo, esto ha sido posible porque se trata de la compañía tradicionalmente más comercial en su ramo en todo el mundo.

Para aspirar a estos niveles de potencia o aún menores, en otros países como por ejemplo en Francia, Italia, Canadá, se ha recurrido a tomar de la red, la potencia necesaria con objeto de disminuir la inversión.

El primer laboratorio de alta potencia con conexión a la red fue el de E.D.F. de Fontenay, Francia, que apareció en 1949.

Recientemente E.D.F. ha construido en Renardieres otro laboratorio de mucho mayor capacidad, 13200 MVA. Lograda con la combinación de alimentación de la red y generadores de corto circuito.

Similarmente el C.E.S.I. de Italia, puso en servicio en 1958 un laboratorio de alta potencia apoyado en la red, con 1500 MVA, la cual amplió posteriormente a 3000 MVA y, próximamente la incrementará por medio de un generador de 2200 MVA para alcanzar finalmente una potencia total instalada de 5200 MVA.

El IREQ de Canadá ha construído recientemente su laboratorio de potencia también apoyado en la red para una potencia de - 7200 MVA.

Aunque algunos fabricantes de interruptores aún recurren exclusivamente a los generadores especiales de corto circuito, la solución de aprovechar la red se ha venido adoptando por la menor inversión y simplicidad que implican. Así, tanto Yugoslavia, que ya cuenta con un laboratorio, como Brasil, que lo construye actualmente, y México, que inicia su proyecto, han adoptado esta opción.

3.5 Clasificación de los Laboratorios de Alta Potencia.

Se pueden clasificar en:

- 1.- Por sus prestaciones y capacidad.
- 2.- Por el tipo de fuente de potencia.
- 3.- Por su utilización.

- 1.- Por sus prestaciones.

Dado que la potencia de corto circuito es el parámetro que caracteriza un laboratorio de alta potencia, la cual tiene valores extremadamente distintos según los diferentes equipos a probar y que además está ligada a los niveles de tensión de prueba, se puede hacer una clasificación con estas bases:

- a) Laboratorio de baja tensión con potencias de orden de 100 MVA
- b) Laboratorios de media tensión con potencias de orden de 2000 MVA.
- c) Laboratorios de alta tensión para potencias superiores como es el caso de los laboratorios para pruebas de c.c. sin tético.

2.- Por el tipo de fuente de potencia.

Existen en la actualidad dos tipos de fuente de potencia y los laboratorios pueden clasificarse en:

- a) Laboratorios con generador de corto-circuito.
- b) Laboratorios con alimentación de la red.

3.- Por su utilización.

- a) Laboratorios de investigación y desarrollo.
- b) Laboratorios de homologación oficial.
- c) Laboratorios de control de calidad.

3.6 Características Principales de los Laboratorios de Alta Potencia.

En general están compuestos de las siguientes instalaciones:

- a) El circuito de prueba, los equipos de comando, sincronización, protección y señalización.
- b) Los equipos de medición y registro.
- c) Las herramientas y equipos para montaje de los equipos a probar.
- d) Las herramientas y equipos para el mantenimiento.
- e) Instalaciones auxiliares de iluminación, fuerza, alimenta-

ciones especiales de corriente directa, de aire a presión, sistema de tratamiento de aceite, teléfonos, equipos contra incendios, etc.

3.6.1 Diagrama unifilar de un laboratorio de alta potencia.

Con respecto al circuito de prueba de la fig. 3.1 se indica diagrama unifilar, con sus componentes.

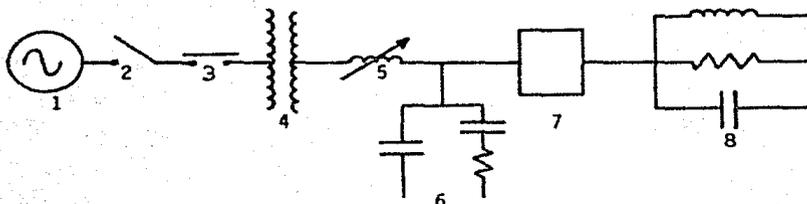


Fig. 3.1

- 1.- Fuente de corto circuito (generador o red pública).
- 2.- Interruptor de respaldo.
- 3.- Interruptor de cierre sincronizado.
- 4.- Transformador de corto circuito de relación variable.
- 5.- Reactores limitadores.
- 6.- Banco de regulación de la TTR.
- 7.- Equipo bajo prueba.
- 8.- Circuito de carga.

1.- Fuente de corto circuito.

a) Generador de corto circuito de diseño especial de baja reactancia interna, con devanados solidamente anclados, con superexcitación, el cual es impulsado por un motor que se desacopla antes de cada prueba, aunque últimamente se ha empezado a utilizar un sistema de arranque a frecuencia variable con componentes de estado sólido, que hace trabajar el generador como motor síncrono hasta alcanzar su velocidad nominal, desconectándose en ese momento para permitir el incremento de la excitación hasta obtener la tensión nominal y proceder a efectuar la prueba.

b) Redes de distribución pública de media y alta tensión.

Sólo en casos muy raros, se tiene una combinación de estas dos fuentes para obtener una mayor potencia disponible, con respecto a las ventajas y desventajas que se tienen al utilizar estas fuentes, se pueden mencionar las siguientes:

- b.1 Tiempo de utilización, que para el generador no tiene limitaciones.
- b.2 Regulación de la tensión de prueba, la cual es posible obtener en forma continua con el generador y en escalones con la red.
- b.2.a Regulación de la corriente, en el caso de los generadores se efectúa con reactores limitadores de una tensión relativamente baja y en su caso la red con reactores de alta y baja tensión.
- b.3 Tensión de retorno a frecuencia industrial y corriente simétrica de corto circuito cuando se utiliza la red, - éstos parámetros son constantes.
- b.4 Frecuencia. Con la red la frecuencia es constante, con

el generador puede tener una frecuencia variable, lo cual es una ventaja pero se tiene también una variación en la frecuencia durante la prueba, lo cual es una desventaja.

- b.5 Tensión transitoria de restablecimiento. A plena potencia, la alimentación con generador da lugar a tensiones transitorias de restablecimiento con una frecuencia única propia, dado que sólo está en juego la capacitancia de los transformadores. Con la alimentación de la red existen numerosas frecuencias propias que influyen sobre esta T.T.R.
- b.6 Pruebas de recierre rápido, durante el tiempo de recierre, generalmente alrededor de 0.3 seg. no es posible impulsar nuevamente el generador, por lo que la segunda apertura tiene una potencia menor. Con la red ésto no sucede.
- b.7 Potencia continua. Los transformadores de la red pueden especificarse para una potencia continua que será siempre mayor que la que proporciona el generador.

En general no se puede decir si un tipo de alimentación es preferible al otro, ya que es necesario considerar los factores particulares.

2. Interruptor de respaldo.

Es un equipo que debe ofrecer las máximas garantías de seguridad de operación, ya que es solicitado en modo excepcional. Por ejemplo, en cada prueba debe primero cerrar en vacío y luego abrir a veces en vacío y a veces bajo corto circuito.

3. Interruptor de cierre sincronizado.

Propiamente hablando, este equipo no es un interruptor, ya

que su función es la de establecer el corto circuito en sin cronización con cualquier punto de la onda de tensión y con una precisión de $\pm 1^{\circ}$ a $\pm 5^{\circ}$ eléctricos con lo que se obtienen las diferentes características de asimetría de la corriente de corto circuito.

4. Transformador de corto circuito.

Estos equipos deben cumplir un gran número de requisitos especiales, tales como:

Resistencia excepcional a los efectos electrodinámicos del corto circuito.

Varios secundarios para obtener diferentes tensiones a potencia plena.

Aislamientos adecuados para soportar las frecuentes tensiones transitorias.

Potencia continua para pruebas de calentamiento.

5. Reactancias limitadoras.

Estas reactancias de limitación de las corrientes de corto circuito, deben tener la posibilidad de una regulación fina dentro de amplios límites, lo cual se logra con las combinaciones de conexiones entre ellas, y con derivaciones, debe considerarse el aislamiento eléctrico y la resistencia mecánica.

6. Banco de regulación de la TTR.

Este banco está formado por resistencias y capacitores de diferentes valores con posibilidad de conexiones diversas, que permiten la regulación de la forma de onda de la tensión transitoria de restablecimiento, de acuerdo a la normativa existente.

7. Equipo bajo prueba.

Son todos los equipos que se desean probar.

8. Circuito de carga.

Estos circuitos están formados por bancos de capacitores, - de conexiones múltiples que permiten efectuar las pruebas - con cargas capacitivas ya indicadas anteriormente. Asimismo, se tienen bancos de cargas resistivas e inductivas, que proporcionan la corriente de carga a diferentes valores del factor de potencia y bancos de inductancia que junto con los bancos de capacitores permiten obtener la corriente de línea.

Junto con estos componentes principales están otros componentes secundarios, pero no por esto menos importantes, como por ejemplo el sistema de barras y seccionadores, que deben diseñarse tanto para las máximas tensiones, como para las máximas corrientes, para lo cual es necesario una construcción muy especial.

Otro equipo muy importante es el de comando, sincronización, protección y señalización que como se dijo, requiere de una - alta precisión, que puede ser obtenida con dispositivos electrónicos complementados con sistemas electromecánicos que aseguren la operación adecuada.

3.7 Laboratorio de Alta Potencia Baja Tensión de LAPEM.

Es un laboratorio de corto circuito para pruebas de equipos - eléctricos de baja tensión, cuya fuente de alimentación es la red del servicio público de 115 KV, con las características - principales siguientes.

3.7.1 Diagrama Unifilar.

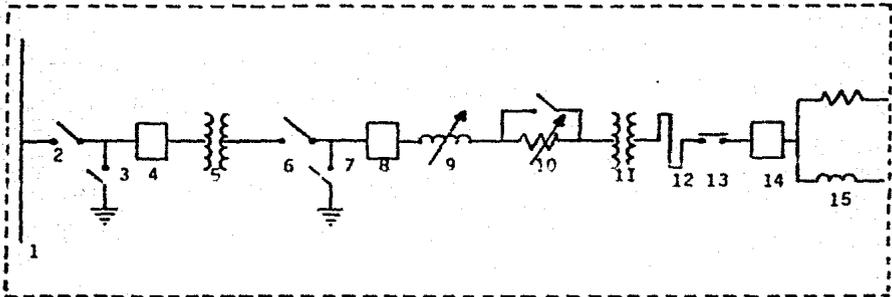


Fig. 3.2

- 1.- Línea de alimentación 115 KV 3Ø 60Hz.
- 2.- Seccionador de línea 115 KV.
- 3.- Cuchilla de puesta a tierra 115 KV.
- 4.- Interruptor de protección 115 KV.
- 5.- Transformador reductor 115/23 KV.
- 6.- Cuchilla seccionadora 24 KV.
- 7.- Cuchilla de puesta a tierra 24 KV.
- 8.- Interruptor de maniobra 24 KV.
- 9.- Reactancias de regulación de la corriente de prueba a 24 KV.
- 10.- Resistencias de regulación de factor de potencia de la fuente en 24 KV.
- 11.- Transformador de corto circuito 150 MVA $\infty \times 1$ seg:

- 12.- Derivadores de medición.
- 13.- Dispositivo de cierre sincronizado.
- 14.- Celdas de prueba.
- 15.- Banco de carga resistiva inductiva en baja tensión.

3.7.2 Alimentación del laboratorio.

El laboratorio se alimentará de una red de 115 KV, con potencia de corto circuito 3 ϕ mínima garantizada de 1200 MVA, con aumento a corto plazo a 2000 MVA, y posteriormente a 5000 MVA. El laboratorio está dimensionado para una potencia de prueba de 150 MVacc x 1 segundo, con potencia de corto circuito de la red de 2000 MVA.

Cuando la potencia de la red supere este valor, se conectará una reactancia adecuada inmediatamente después de la cuchilla desconectadora de 115 KV, para limitar siempre a 2000 MVA la potencia en la entrada al laboratorio.

La tensión de 115 KV se reducirá a 23 KV con un transformador adecuado localizado al exterior, el cual alimentará aquello que se puede considerar como el verdadero circuito del laboratorio, o sea, equipos de regulación, transformador de corto circuito, etc., mismos que se encuentran dentro del edificio del laboratorio.

3.7.3 Distribución de la superficie del laboratorio.

El laboratorio se construirá en forma de "L", con un área de aproximadamente 1140m², los cuales se distribuirán así:

- a) Pruebas complementarias: 240 m²
- b) Circuito de potencia en m.t: 254 m²
- c) Local de observación del circuito m.t: 19 m²
(Antesala).

- d) Celdas de prueba: 220 m²
- e) Sala de control: 88 m²
- f) Resto del edificio (talleres y salas de montaje, oficinas, vestidores, wc, sala fotográfica, almacén, comedor, etc. 319 m²

Al exterior se tendrá un área de aproximadamente 375 m², destinada a la subestación de 115/23 KV.

El laboratorio en "L" se construirá de un sólo edificio de diferente configuración arquitectónica: edificios tipo industrial para el área de pruebas complementarias, circuito de potencia y celdas de prueba. Edificio tipo civil para el resto del laboratorio.

Por lo tanto, el laboratorio estará casi completamente cubierto, y todas las operaciones se efectuarán en el interior del edificio, obteniendo así la doble ventaja de no molestar en el exterior con ruidos indebidos y evitar al personal las molestias causadas por condiciones atmosféricas adversas. Además, los equipos se preservan mejor.

Está ya prevista la posibilidad de duplicación de las instalaciones, incluyendo la modificación de la sala de control.

El muro divisorio de las 2 celdas de prueba está provisto de una puerta que se puede desmontar, en el caso de prueba de objetos demasiado largos.

Para cada celda se cuenta con un taller y sala de montaje, además de una oficina para los clientes, con posibilidad de aislarse completamente del resto del laboratorio, para realizar, con las debidas condiciones de seguridad y guardando

los secretos de fabricación de cada cliente, actividades in dependientes en las 2 celdas.

El laboratorio estará rodeado de una calle de 10 m de ancho, además de un patio de maniobra de aproximadamente 500 m² fren te a las puertas de acceso al área de pruebas complementarias y celda 1, y entrada principal al edificio.

3.8 Tipos de Prueba.

El laboratorio de baja tensión de Irapuato, se proyectó para efectuar las pruebas siguientes principalmente:

- a) Pruebas de interrupción en equipos de maniobras y protección en b.t.
- b) Pruebas de corta duración en equipo vario de b.t. y m.t.
- c) Pruebas de capacidad al corto-circuito en transformadores de distribución.

Nosotros nos concentramos en las tipo c).

El objetivo de este tipo de pruebas es el de verificar la ca pacidad de los transformadores para soportar el corto circu ito en sus terminales.

En este tipo de pruebas, los parámetros importantes con que de be contar la instalación de prueba son: Tensión y Corriente.

3.8.1 Equipos a Probar.

En la tabla siguiente se enlistan algunos de los equipos que se pueden probar en un laboratorio de b.t.

1.- Transformador de distribución tipo seco y OA	1
2.- Transformador de distribución tipo seco y OA	3
3.- Interruptores termomagnéticos de b.t.	1
4.- Interruptores termomagnéticos de b.t.	2
5.- Interruptores termomagnéticos de b.t.	3
6.- Interruptores electromagnéticos de b.t.	3
7.- Fusibles de b.t.	1
8.- Portafusibles de b.t.	1-3
9.- Contactores de b.t.	2
10.- Contactores de b.t.	3
11.- Cuchillas desconectoras de b.t.	1
12.- Cuchillas desconectoras de b.t.	2
13.- Cuchillas desconectoras de b.t.	3
14.- Desconectores en caja de b.t. (interruptores de seguridad).	2-3
15.- Cuchillas desconectoras de m.t. (op. con y sin carga).	1
16.- Cuchillas desconectoras de m.t. (op. con y sin carga).	3
17.- Reactores limitadores.	1-3
18.- Boquillas y pasa muros de b.t. - m.t.	1
19.- Sistemas de barras b.t. - m.t.	3
20.- Cables de potencia y mufas de b.t. - m.t.	1-3
21.- Tableros blindados de b.t. y m.t.	1-3
22.- Transformadores de corriente.	1
23.- Cambiadores de derivación de operación con y sin carga.	-

CAPITULO IV

PRUEBA DE CORTO CIRCUITO EN EL LABORATORIO

4.1 Antecedentes.

Ya hemos mencionado en el desarrollo de la tesis, la importancia de las pruebas de corto circuito. Ahondando en los antecedentes de pruebas de corto circuito a transformadores en México, podemos señalar que no se tiene una gran experiencia en este sentido, ya que en un principio estas pruebas para transformadores de manufactura nacional se llevaron a cabo en el Institut de Recherche D'Hydro-Quebec, en Montreal Canadá, debido a la falta de laboratorios de alta potencia en México.

Las pruebas efectuadas en el laboratorio canadiense se realizaron en una acción conjunta, por un lado del Instituto de Investigaciones Eléctricas, y por el otro de los fabricantes de los transformadores.

Estas pruebas permitieron un avance notable en cuanto a diseño, eficiencia y economía en la construcción de los nuevos transformadores.

Los transformadores enriquecidos con las experiencias de una primera etapa de aplicación de la prueba de corto circuito, fueron vueltos a probar reflejándose en los resultados los adelantos logrados.

En México ya se han empezado a realizar pruebas de corto circuito en el laboratorio de pruebas de LAPP de la CFE con sede en Irapuato, Guanajuato, con una serie de limitaciones.

nes dado que aún no se cuenta con el 100% de las instalaciones proyectadas para este fin.

Conforme se vayan completando las instalaciones del laboratorio, las pruebas a su vez satisfecerán más fielmente los requerimientos de la norma que se use para la aplicación de la prueba.

Por otro lado, cabe mencionar que los resultados de éstas, - son manejados en forma confidencial, dado el carácter de - prueba destructiva en la que está clasificado este evento, y dado que los resultados obtenidos influyen directamente en - el diseño de nuevos transformadores. Las empresas fabricantes de éstos, cuidan la fuga de tecnología de la que pudieran ser objeto, aparte de hacer rentable el gasto que representa el - efectuar dicha prueba.

Por lo anteriormente expuesto, se desprende la dificultad de conseguir información en cuanto al procedimiento, circuitos, oscilogramas, equipo de medición empleado, etc., de las pruebas de corto circuito realizadas en México o para México. Por razones obvias es aún más difícil presenciar una prueba físicamente.

No obstante, en la etapa de investigación de la tesis, tuvimos la oportunidad de tener acceso a este tipo de información, por tratarse de un trabajo de estudio generalizado de la prueba - de corto circuito.

Así, de la información obtenida en las visitas realizadas al IIE en México y Cuernavaca, a algunas fábricas de transformadores, y al laboratorio de LAPEM en Irapuato, hemos elaborado un documento que ilustre una prueba de corto circuito en laboratorio.

Para el planteamiento de esta prueba, nos basaremos en las - normas ANSI, IEEE C.57.12.90 y ANSI IEEE C.57.12.00 de 1980.

Por último, recordamos que el caso que nos ocupa son los - transformadores de distribución y que a ellos nos enfocare-- mos, ya que para transformadores de potencia, el procedimien - to cambia en algunos conceptos.

4.2 Procedimientos de Prueba de Corto-Circuito Aplicada a - Transformadores de distribución.

4.2.1 Objetivo de las pruebas.

La razón principal al realizar esta prueba, es la de conocer la capacidad del transformador a soportar los esfuerzos térmicos y electrodinámicos producto de cortocircuito.

No obstante, existen otras consideraciones adicionales que - van de acuerdo con la particularidad del evento, en este sen - tido la prueba puede clasificarse como de:

- a) Investigación y desarrollo, que se efectúa con el fin de - estudiar el comportamiento de los materiales con los que - fue fabricado el transformador y observar su comportamien - to general al ser sometido a eventos de corto circuito.
- b) Prototipo y aceptación, que es realizada como norma de - control a la adquisición de equipo y así determinar la - confiabilidad del producto bajo condiciones de corto cir - cuito externo.

4.2.2 Características del Transformador a Probar. (datos de placa).

4.2.3 Aplicación de la Prueba. Se consideran los siguientes - casos.

- a) Cortocircuitar el secundario, con el primario del transformador previamente energizado.
- b) Energizar el primario con el secundario previamente cortocircuitado.

4.2.4 Requerimientos de Prueba.

- a) Corriente Simétrica.

$$I_{se} = \frac{100}{\%Z} I_n$$

$$I_{sp} = \sqrt{2} I_{se}$$

donde:

- I_{se} - Corriente de corto circuito simétrica eficaz (amps) lado A.T.
- I_n - Corriente o capacidad plena (amps) de A.T.
- I_{sp} - Corriente de c.c. simétrica pico.
- $\%Z$ - % impedancia del transformador.

- b) Corriente Asimétrica.

$$I_{ap} = K I_{se}$$

$$K = \left[1 + (e^{-(\theta + \pi/2)} r/x) \text{Sen} \theta \right] \sqrt{2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{X}{R} \right) \text{ (en radianes).}$$

donde:

- I_{ap} - Corriente de corto circuito asimétrica (amps) lado de A.T.
- K - Factor de asimetría.
- r - % resistencia del transformador.
- X - Reactancia del transformador.

- c) Incremento de impedancia (% Z)

- $Z = 22.5 - 5(\%Z)$ Para un transformador con $\%Z \leq 2.99$
- $Z = 7.5$ Para un transformador con $\%Z \geq 3.00$

d) Número de pruebas aplicadas.

Se aplican básicamente seis pruebas, y éstas deben satisfacer los requerimientos de corriente simétrica, dos de las cuales también deberán satisfacer el requerimiento de corriente asimétrica, y una de ellas además será de larga duración.

e) Duración de las pruebas.

La prueba de calibración se realiza con aproximadamente 6 ciclos ($\frac{1}{10^5}$).

Las pruebas de corriente simétrica y asimétrica tendrán una duración de 15 ciclos con excepción de la prueba de larga duración, la cual se calcula como en (4.2.3.f).

f) Prueba de larga duración.

$$t = \frac{1250}{I^2}$$

donde:

t - Es el tiempo de duración en s.

I - Es la corriente de corto circuito simétrica expresada como múltiplo de la corriente nominal base.

g) Circuitos de prueba.

Los circuitos de prueba y los parámetros a registrar en el desarrollo de la misma, varían de acuerdo al equipo e instalaciones con las que cuente el laboratorio, y al interés particular del propietario del transformador y de los responsables de la aplicación de la prueba.

En nuestro caso, proponemos un circuito para la aplicación de la prueba como en 4.2.3.b

4.3 Circuito de Prueba para Transformadores Monofásicos.

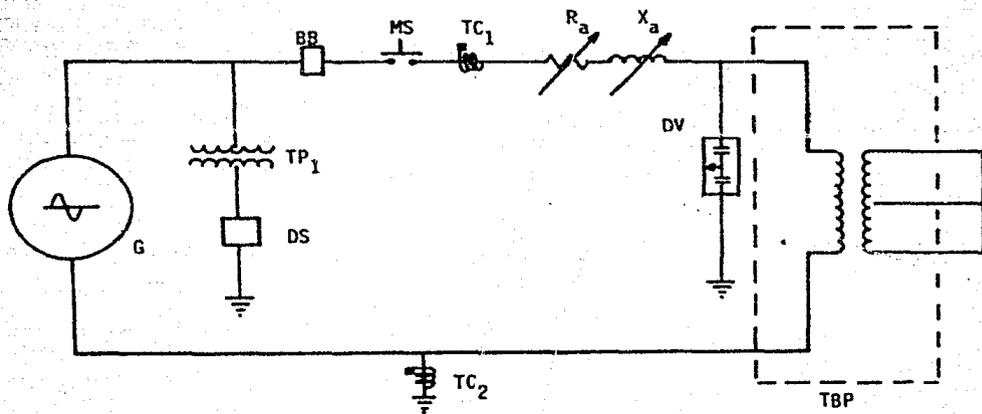


Fig. 41

4.4 Circuito de Prueba para Transformadores Trifásicos.

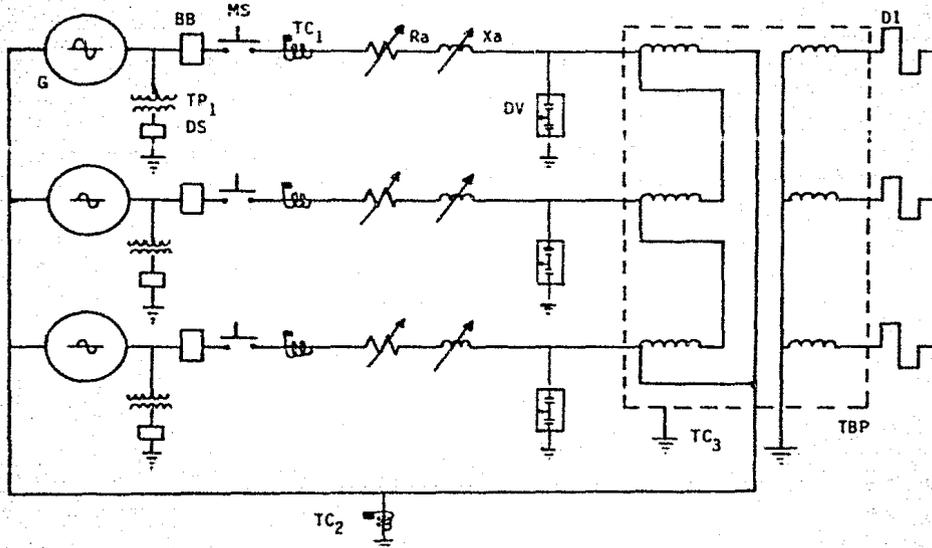


Fig. 1

Donde:

- TBP - Transformador bajo prueba.
- G - Generador.
- TP₁ - Transformador para alimentar el mecanismo de operación del interruptor de maniobra y medición.
- DS - Dispositivo de operación y sincronización del interruptor de maniobra.

- BB - Interruptor de respaldo que se utiliza para -
abrir el corto.
- MS - Interruptor síncrono (MAKING SWITCH) que se -
utiliza para cerrar el corto.
- TC₁ - Transformador de corriente para medir la corrien-
te total.
- Ra - Resistencia adicionada al circuito para ajustar
la corriente de prueba y la relación X/R del -
circuito.
- Xa - Reactancia inductiva adicionada al circuito -
para ajustar la corriente de prueba.
- DV - División de tensión para medir la tensión apli-
cada en las terminales del primario del TFP.
- TC₂ - Transformador de corriente para medición de la
corriente a tierra en caso de existir.
- TC₃ - Transformador de corriente usado para la medi-
ción a través del tanque.
- D₁ - Derivador usado para medición de corriente en -
el secundario del TFP.

4.5 Operación del Circuito.

- a) Primero hay que checar que la relación X/R del transfor-
mador sea igual a la relación X/R del circuito.
Para lograr este ajuste, se hace uso de (Xa y Ra) que
son variables, por otro lado Xa, Ra, tienen la función
de limitar la corriente en caso de que se presentase -
alguna falla en el transformador o en el circuito.
- b) Los requerimientos de simetría y asimetría en las on-
das de corriente se logra por medio del interruptor -
síncrono (MAKING SWITCH MS), que a su vez y en la mis-
ma acción cierra el circuito.

c) La apertura del corto se hace por medio del interruptor BB.

d) Para el registro de las señales medidas durante el desarrollo de las pruebas, se hace uso de aparatos oscilográficos, sistemas de video y cámaras fotográficas.

4.6 Pruebas de Calibración.

Se realiza con el objeto de verificar la operación correcta de los circuitos de prueba y medición.

Para esto se hace circular aproximadamente el 50% de la corriente de corto circuito (aprox. (1/10)I_s).

Es recomendable hacer esta prueba tanto para la posición máxima y mínima del cambiador de derivaciones.

4.7 Pruebas de Desarrollo Satisfactorio.

Estas pruebas se efectúan para evaluar la condición del transformador durante la realización de los eventos de corto circuito.

La prueba de mayor peso y que finalmente marca la aprobación o rechazo del transformador es la medición de impedancia, (incremento) y debe cumplir con 4.2.4.c.

Pruebas complementarias.

- Respuesta de corriente por Impulso a Tensión Reducida (ITR).
- Pérdidas en el núcleo.
- Pruebas dieléctricas.

- Medición de la corriente de excitación ($I_{exc} \leq 5i$).
- Relación de impedancia.

4.8 Oscilogramas.

Los oscilogramas y los sistemas de video son los mecanismos de registro que se utilizan normalmente en el desarrollo de las pruebas de cortocircuito, apoyados con fotografías con película de respuesta rápida.

No obstante, el registro básico lo constituye el oscilograma, ya que en ellos se graban los parámetros de mayor importancia para su posterior proceso, que en la actualidad se realiza por medios computarizados.

4.9 Evaluación de Resultados y Conclusiones.

En este punto es conveniente elaborar una tabla en donde se anoten los parámetros más relevantes que permitan visualizar los cambios que el transformador experimenta durante las pruebas.

Como ya se mencionó, la prueba de mayor peso es la medición de impedancia. No obstante, el resto de las pruebas complementarias son de suma importancia para una mejor evaluación.

Hemos apuntado algunas de ellas en 4.2.7, pero no son las únicas, y de hecho se pueden agregar aquellas que el responsable de la aplicación de la prueba y los fabricantes de los transformadores consideren necesarias.

En general, tanto la evaluación de los resultados como las conclusiones, dependerán de las características así como de

los fines específicos y puntos de importancia particulares a observar del transformador al ser sometido a la prueba de corto circuito.

A continuación se proponen dos transformadores para ser sometidos a la prueba de corto circuito, a los que distinguiremos llamándolos simplemente como Transformador 1 y Transformador 2.

Ambos transformadores tendrán la misma secuencia de prueba para posteriormente comparar sus resultados.

4.10 Prueba de Corto Circuito Aplicada al Transformador 1.

1. Objetivo de la Prueba.

- Aplicación de la prueba en su modo prototipo y aceptación.
- Conocer la capacidad del transformador bajo prueba para soportar los efectos térmicos y esfuerzos electrodinámicos - producto de corto circuito externo.
- Aumentar la confiabilidad en servicio del transformador.

2. Características del Transformador a Probar.

Datos de Placa

Marca/Serie	- Transformador 1
Capacidad	- 50 KVA
Rel. Voltaje	- 13.2 - 0.220/0.110 KV
%Z	- 2.85
Fases	- 1
Frecuencia	- 60 CPS
Temp. Op.	- 55°C

	Posición del - Cambiador - 1	Posición del - Cambiador - 5
Volts A.T.	13 860	12 540
Volts B.T.	240	240
Amps A.T.	3.608	3.98
Ohms Imp.	104.49	89.63

3. Aplicación de la Prueba.

Se considera el caso de energizar el primario con el secundario previamente cortocircuitado.

4. Requerimientos de Prueba.

a) Corriente Simétrica.

$$\text{Ise} = \frac{100}{2.85} (3.608) = 126.596$$

$$\text{Isp} = \sqrt{2} (126.596) = 179.039$$

$$\text{Ise} = \frac{100}{2.85} (3.987) = 139.89$$

$$\text{Isp} = \sqrt{2} (139.89) = 197.84$$

b) Corriente Asimétrica.

$$\begin{aligned} \text{Iap} &= K \text{Ise} \\ K &= 1.685 \\ \text{Iap} &= 1.685 (126.596) = 213.31 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Iap} &= K \text{Ise} \\ K &= 1.685 \\ \text{Iap} &= 1.685 (139.89) = 235.71 \end{aligned}$$

c) Cálculo del incremento de impedancia (ΔZ)

$$\text{para } \%Z = 2.85$$

$$\Delta Z = 22.5 - 5(2.85) = 8.25$$

d) Número de pruebas.

Se realizaron 8 pruebas aplicadas de la siguiente manera: 2 de calibración, 1 para la posición mínima y otra para la posición máxima del derivador (tap). 3 serán del tipo simétrica y las 3 restantes del tipo asimétrica, siendo la última de éstas de larga duración.

e) Duración de las pruebas.

Pruebas de calibración; 5 ciclos

Pruebas simétricas; 15 ciclos

Pruebas asimétricas; 15 ciclos

f) Cálculo de la prueba de larga duración .

$$t = \frac{1250}{\left(\frac{139.0}{3.987} \right)^2} = 1.015 \text{ s} \Rightarrow 61 \text{ ciclos}$$

g) Circuito de prueba.

Como se trata de un transformador monofásico se utiliza el circuito de 4.3.1

5. Pruebas de Desarrollo Satisfactorio.

Medición de la impedancia.

Se utiliza el Método de V-I como en la fig. 4.3 y en base a las lecturas obtenidas, se aplica la ley de Ohm. De las pruebas complementarias no se tiene información.

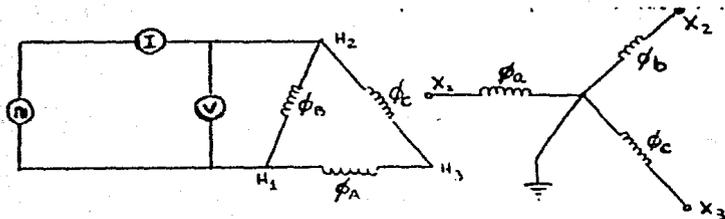


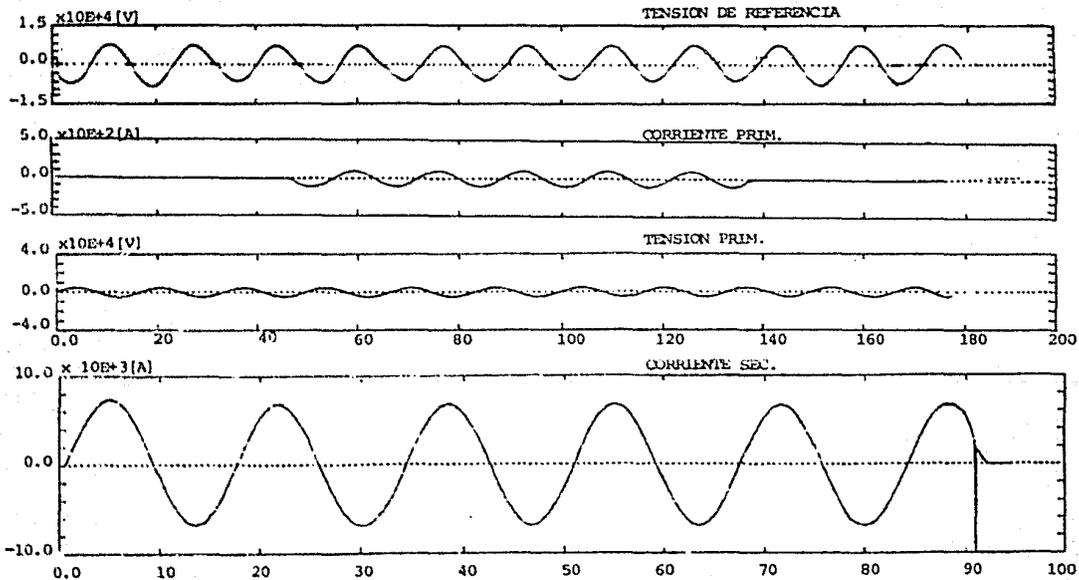
Fig. 4.3

6. Oscilogramas.

Los oscilogramas que se muestran en esta prueba, contienen la siguiente información:

- Número del conjunto oscilográfico
- Tensión de referencia (fuente)
- Corriente en el primario
- Tensión en el primario (terminales)
- Corriente en el secundario (amplificada).

C.O. - 01



E REF. [V]
5 906.7

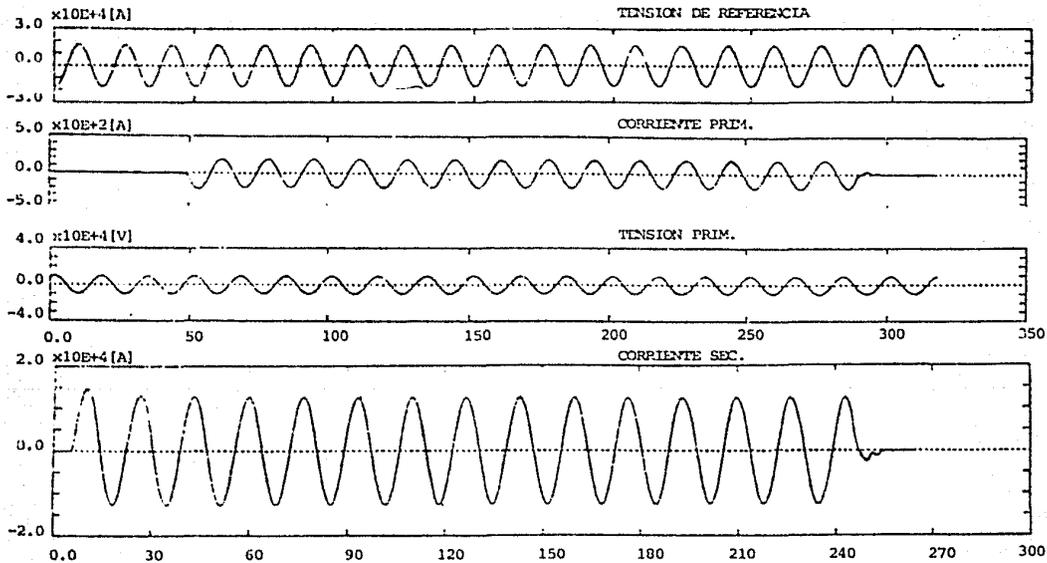
I PRIM. [A]
72.26

E PRIM. [V]
3 397.2

I SEC. [A]
4 814.1

ESC. TIEMPO (MILISEG)

C.O. - 02



E REF. [V]
11 880.0

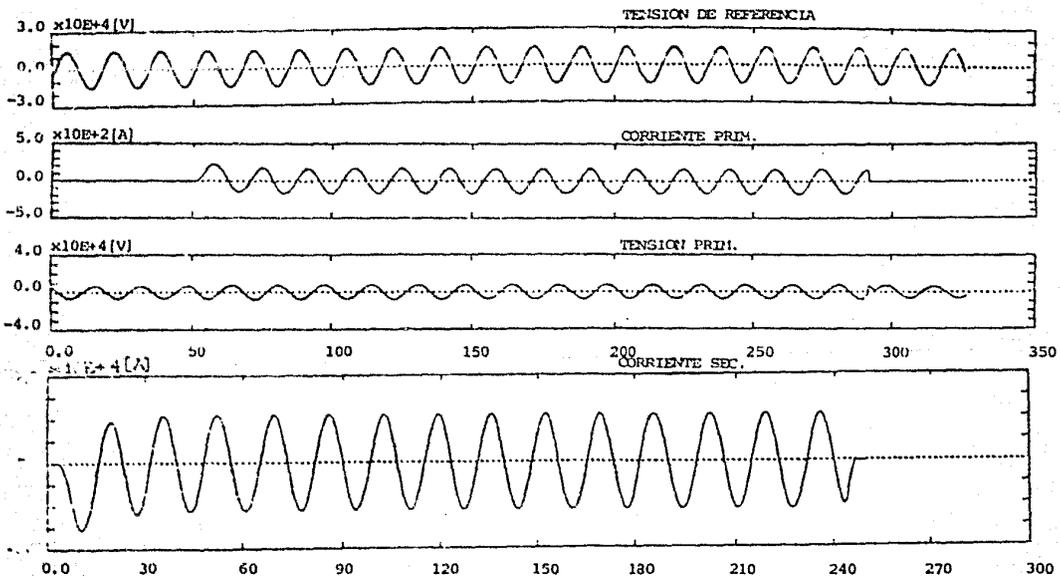
I PRIM. [A]
135.33

E PRIM. [V]
6 789.4

I SEC. [A]
8 849.8

ESC. TIEMPO (MILLISEG)

C.0. - 03



E. REF. [V]
10 460.0

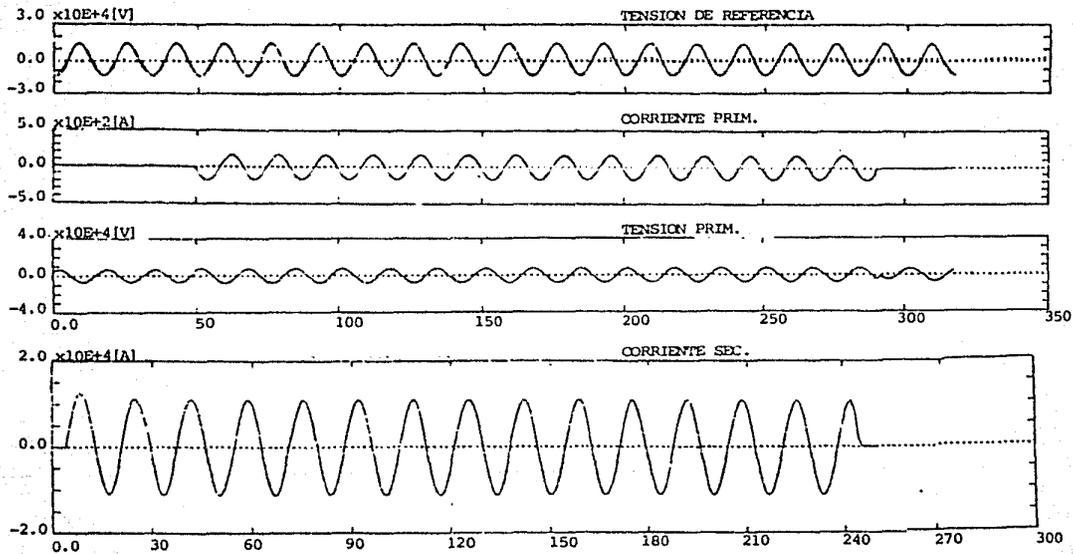
I PRIM. [A]
119.2

E PRIM. [V]
5 326.9

I SEC. [A]
7 729.5

ESC. TIEMPO (MILISEG)

C.O. - 04



E. REF [V]
10 460.0

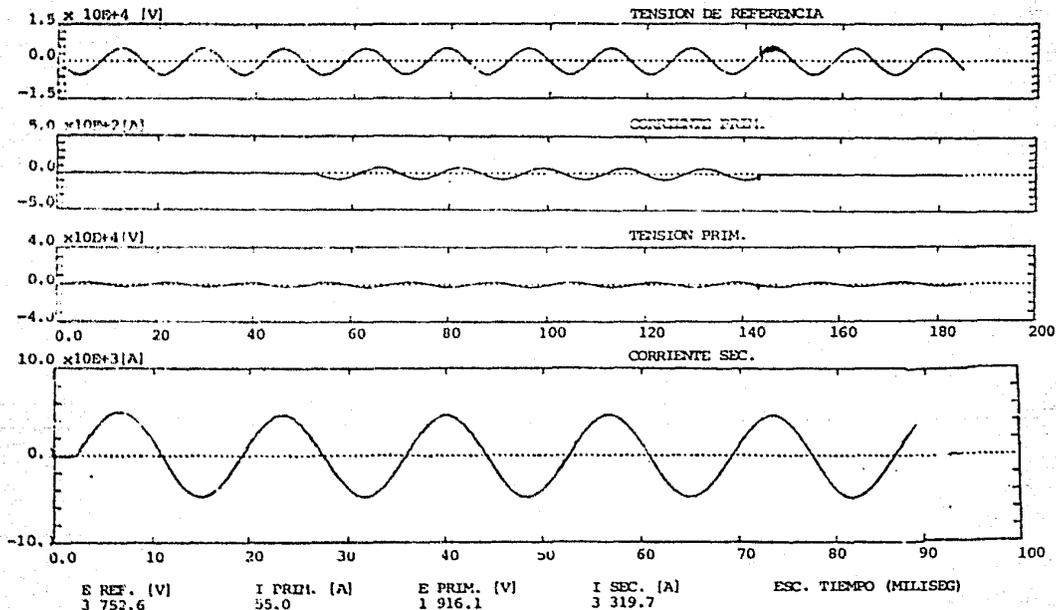
I PRIM. [A]
119.2

E PRIM. [V]
5 320.8

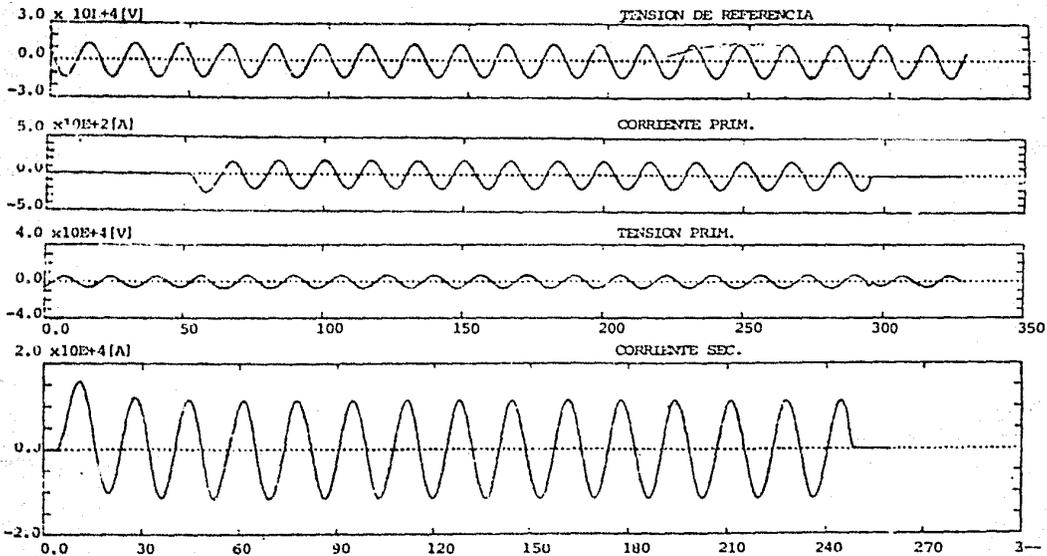
I SEC. [A]
7 793.3

ESC. TIEMPO (MILISEG)

C.O. - 05



C.O. - 06



E REF. [V]
9 664.0

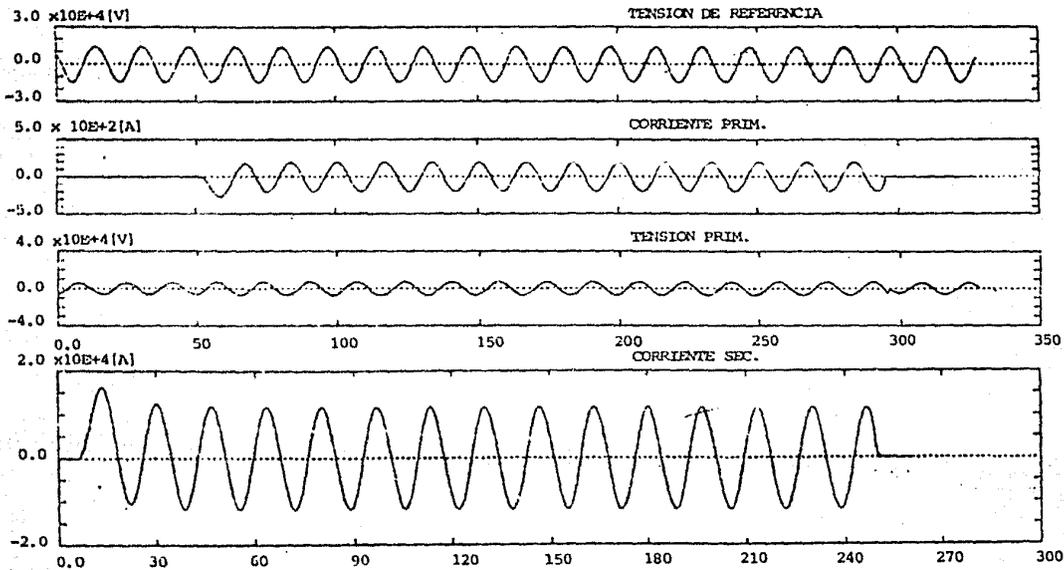
I PRIM. [A]
135.2

E PRIM. [V]
4 907.9

I SEC. [A]
8 187.2

ESC. TIEMPO (MILISEG)

C.O. - 07



E REF. [V]
9 995.9

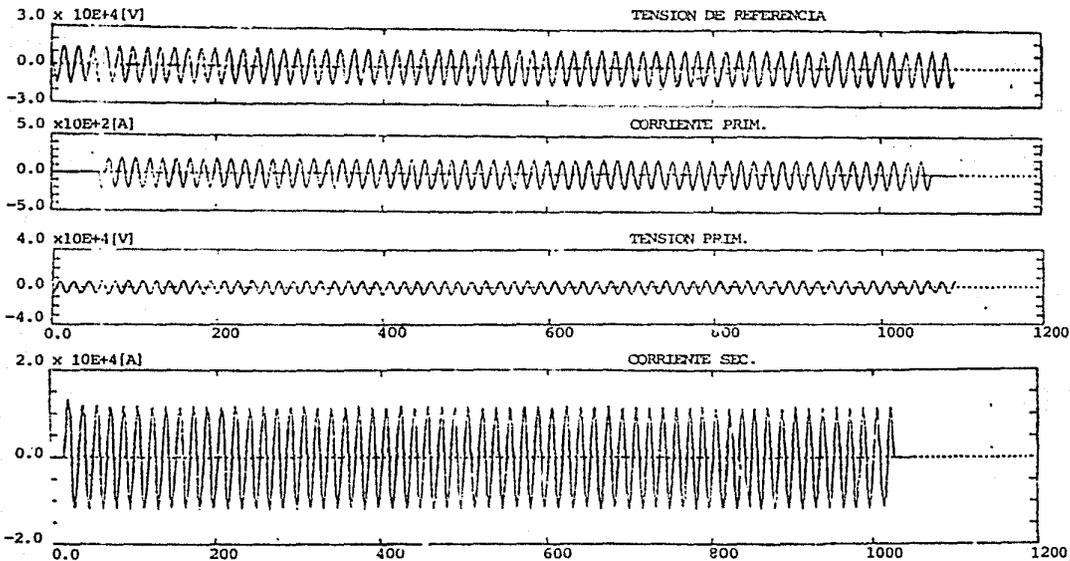
I PRIM. [A]
138.8

E PRIM [V]
5 074.1

I SEC. [A]
8 326.7

ESC. TIEMPO (MILISEG)

C.O. - 08



E REF. [V]
10 060

I PRIM. [A]
138.6

E PRIM. [V]
5 140.3

I SEC. [A]
8 296.8

ESC. TIEMPO (MILISEG)

TABLA DE RESULTADOS - TRANSFORMADOR I

Núm Evento	Posc Camb	Núm Conj C.O.	PRUEBA REALIZADA	Tensión A.T.		Corriente A.T.		Factor de Asim.	IMPEDANCIA			
				Fuente (KV)	Transf (KV)	Simétrica Eficaz (A)	Asimetr Pico (A)		V (Volts)	I (Amps)	Z (Ohms)	Az Z
1	5		Medición del ZZ						83.4	1.039	80.20	-
2	1	01	Calibración	5.986	3.387	7226	111.2	1.54				
3	1	02	Simétrica	11.300	6.789	1135.3	217.8	1.61				
4	1		Medición del ZZ						17.740	0.22	80.63	0.53
5	1	03	Simétrica	10.460	5.327	119.2	188.3	1.95				
6	1	04	Simétrica	10.460	5.321			1.58				
7	1		Medición del ZZ						20.450	0.251	81.27	1.33
8	5	05	Calibración	3.753	1.916	55.0	84.1	1.53				
9	5	06	Asimétrica	9.664	4.908	135.2	259.5	1.92				
10	5	07	Asimétrica	9.996	5.874	438.8	266.4	1.92				
11	1		Medición del ZZ						17.016	0.208	81.79	1.9
12	5	08	Larga Duración	10.060	5.140	138.6	217.6	1.57				
13	1		Medición del ZZ						157.20	0.1909	83.35	2.66

7. Evaluación de Resultados y Conclusiones.

Dado que la prueba de corto circuito aplicada al transformador 1 es ubicada como de prototipo y aceptación, no se realizará inspección visual de devanados, herrajes, etc., ya que para esto será necesario quitar el tanque del transformador, lo que regularmente no es aceptado por los fabricantes.

Por otro lado, en este caso las variaciones de las ondas de tensión y corriente en los oscilogramas respectivos, resultan no ser significativos lo que nos da una guía para suponer que el transformador bajo prueba no sufrió daños severos.

Estas pequeñas variaciones son normales y se corrigen regulando la fuente de alimentación que se esté usando.

El interés fundamental en esta ocasión es el de comprobar -- que el $\Delta \%Z$ no rebasa los límites que marca la norma, con lo cual se corroboraría que el diseño y construcción son adecuados para soportar los eventos corto circuito.

Y en base a esto determinar finalmente la confiabilidad del transformador en operación.

Se han conjuntado una serie de datos en la tabla de resultados, de la que analizaremos los siguientes eventos que corresponden a la medición del $\Delta \%Z$.

En el evento uno, se mide la impedancia (ohms) antes de que el transformador sea sometido a las pruebas, esta medición nos servirá como referencia para las comparaciones siguientes.

En el evento dos, se realiza la prueba de calibración para la

posición 1 del cambiador de derivación.

Después de la sesión de pruebas con requerimientos de corriente simétrica, en el evento siete se checa el \angle %Z siendo de 1.33, hasta este momento el transformador ha soportado muy bien las pruebas, y se encuentra a la mitad de la totalidad de éstas.

Se vuelve a calibrar ahora para la posición 5 del cambiador de derivación para continuar con el período de pruebas con requerimiento de corriente asimétrica y debido a la naturaleza de éstas el transformador será más exigido.

En el evento once la medición del \angle %Z es de 1.9 lo que nos indica que el transformador sigue soportando satisfactoriamente las pruebas.

El evento doce someterá al transformador a un esfuerzo máximo, dado que se trata de la prueba de larga duración en condición asimétrica.

Esta se realiza en este caso en 60 ciclos en lugar de los 15 ciclos de duración de las pruebas anteriores con excepción de las de calibración que aún duran menos.

Finalmente el evento 13 nos mostrará si el transformador soportó o no las pruebas aplicadas.

La medición del %Z nos indica que es de 2.66, ahora lo comparo con el cálculo del %Z permisible para el transformador 1, que es de 8.25 según 410.4.c. entonces:

$$2.66 < 8.25$$

Lo que nos indica que el transformador 1 soportó satisfactoriamente la aplicación de las pruebas de cortocircuito.

4.11 Prueba de Corto Circuito aplicada al Transformador 2.

1. Objetivo de la Prueba.

- Aplicación de la prueba en su modo prototipo y aceptación.
- Conocer la capacidad del transformador bajo prueba para so portar los efectos térmicos y esfuerzos electrodinámicos - producto de corto-circuito externo.

2. Características del Transformador a Probar.

Datos de Placa

Marca/ Serie	-	Transformador 2
Capacidad	-	25 KVA
Rel Voltaje	-	13.2 - 0.240/0.120 (KV)
%Z	-	2.46
Fases	-	1
Frecuencia	-	60 cps
Temp. Op	-	65°C

	Posición del Cambiador -1	Posición del Cambiador-5
Volts A.T.	13 530	12 210
Volts B.T.	240	240
Amps A.T.	1.84	2.07
Ohms Imp.	180.13	146.7

3. Aplicación de la Prueba.

Se considera el caso de energizar el primario con el secun dario previamente cortocircuitado.

4. Requerimientos de Prueba.

a) Corriente Simétrica.

Pos. cambiador - 1

$$I_{se} = \frac{100}{2.46} (1.84) = 74.79$$

$$I_{sp} = \sqrt{2} (74.79) = 105.77$$

Pos. cambiador - 5

$$I_{se} = \frac{100}{2.46} (2.05) = 83.3$$

$$I_{sp} = \sqrt{2} (83.3) = 117.8$$

b) Corriente Asimétrica.

Pos. cambiador - 5

$$I_{ap} = K I_{se}$$

$$K = 1.62$$

$$I_{ap} = 1.62 (74.79) = 121.15$$

Pos. cambiador - 5

$$I_{ap} = K I_{se}$$

$$K = 1.62$$

$$I_{ap} = 83.3 (1.262) = 134.9$$

c) Cálculo del incremento de impedancia ($\% \Delta Z$).

para $\% Z = 2.46$

$$\Delta \% Z = 22.5 - 5(2.46) = 10.20$$

d) Número de pruebas.

Se realizarán 8 pruebas aplicadas de la siguiente manera:

2 de calibración, 1 para la posición mínima y otra para la posición máxima del derivador (tap).

3 serán del tipo simétrica y las 3 restantes del tipo asimétrica, siendo la última de éstas, de larga duración.

e) Duración de las pruebas.

Pruebas de calibración; 6 ciclos

Pruebas simétricas; 15 ciclos

Pruebas asimétricas; 15 ciclos

f) Cálculo de la prueba de larga duración.

$$t = \frac{1250}{\left(\frac{83.3}{2.05}\right)^2} = 0.757 \text{ seg} \Rightarrow 46 \text{ ciclos}$$

g) Circuito de prueba.

Como se trata de un transformador monofásico se utiliza -
el circuito de 4.3

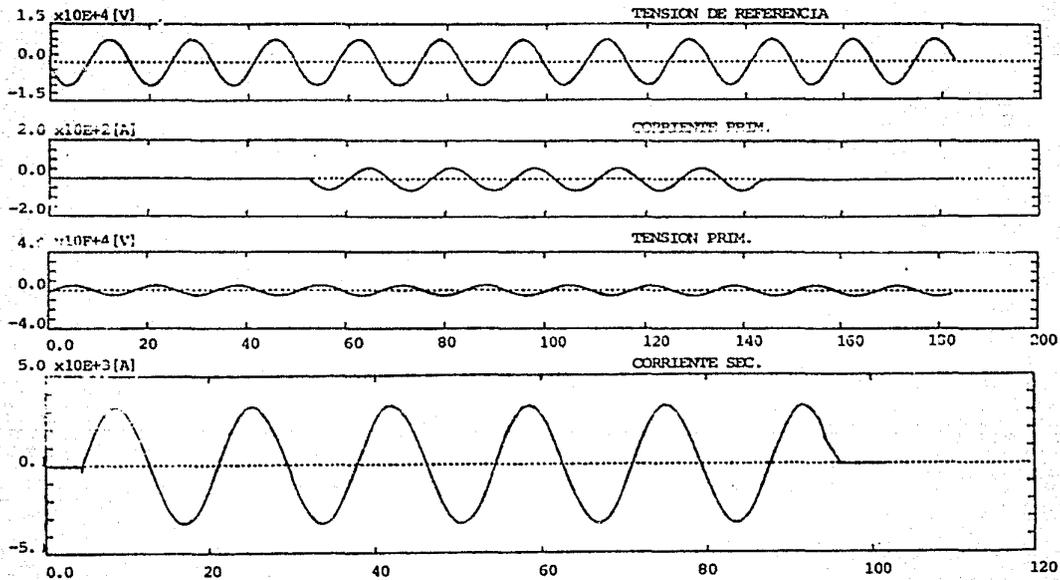
5. Pruebas de Desarrollo Satisfactorio.

Medición de la impedancia, como en 4.10.4.c

6. Oscilogramas.

Como en 4.10.6

C.O. - 09



E REF. [V]
6 392.0

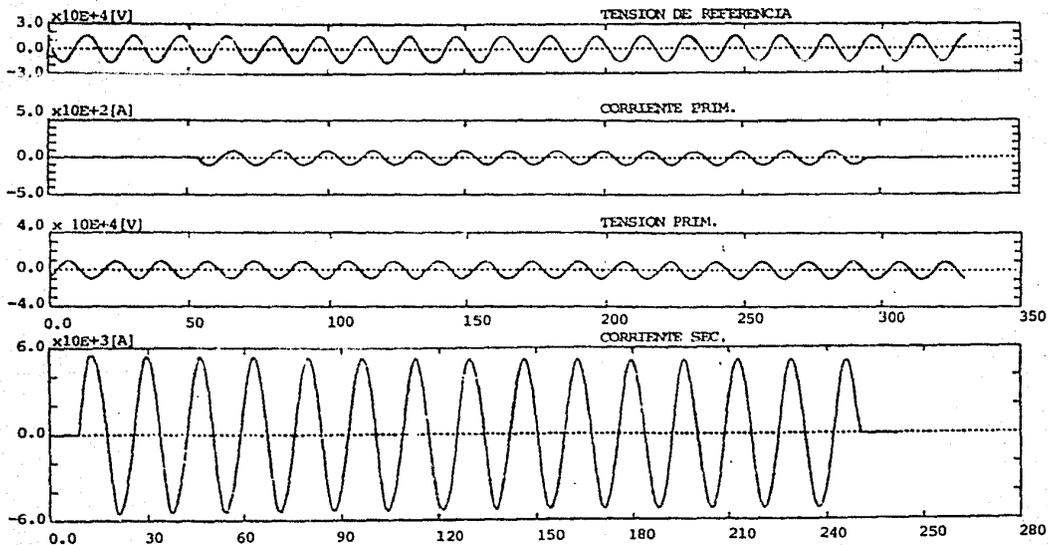
I PRIM. [A]
41.8

E PRIM [V]
3 674.3

I SEC. [A]
2 341.2

ESC. TIEMPO (MILISEG)

C.O. - 10



E REF. [V]
11 300

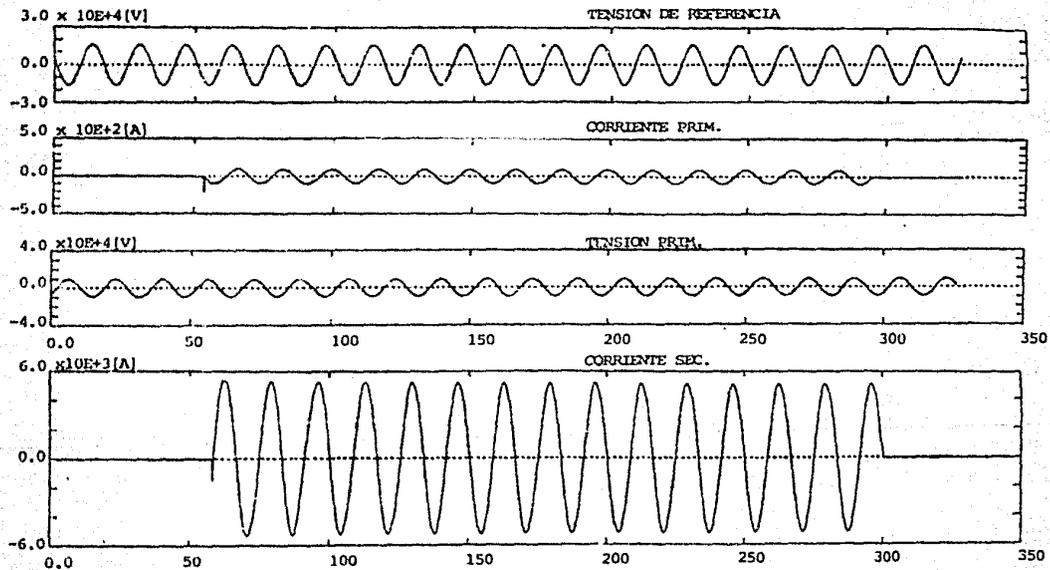
I PRIM. [A]
65.4

E PRIM. [V]
6 489.6

I SEC. [A]
3 654.2

ESC. TIEMPO (MILISEG)

C.O. - 11



E REF. [V]
11 190

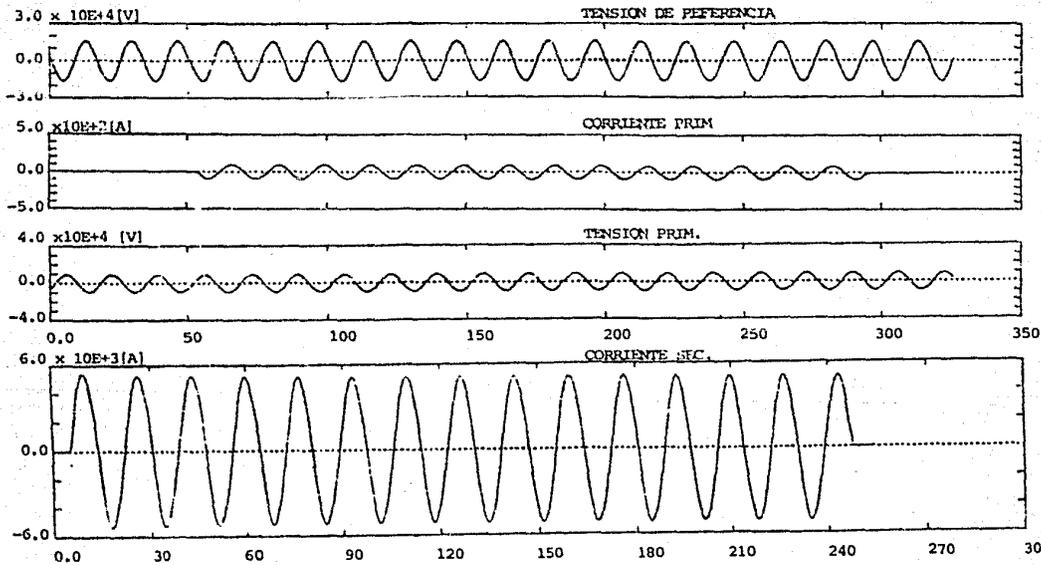
I PRIM. [A]
64.9

E PRIM. [V]
6 538.8

I SEC. [A]
3 627.6

ESC. TIEMPO (MILISEG)

C.O. - 12



E REF. [V]
11 450

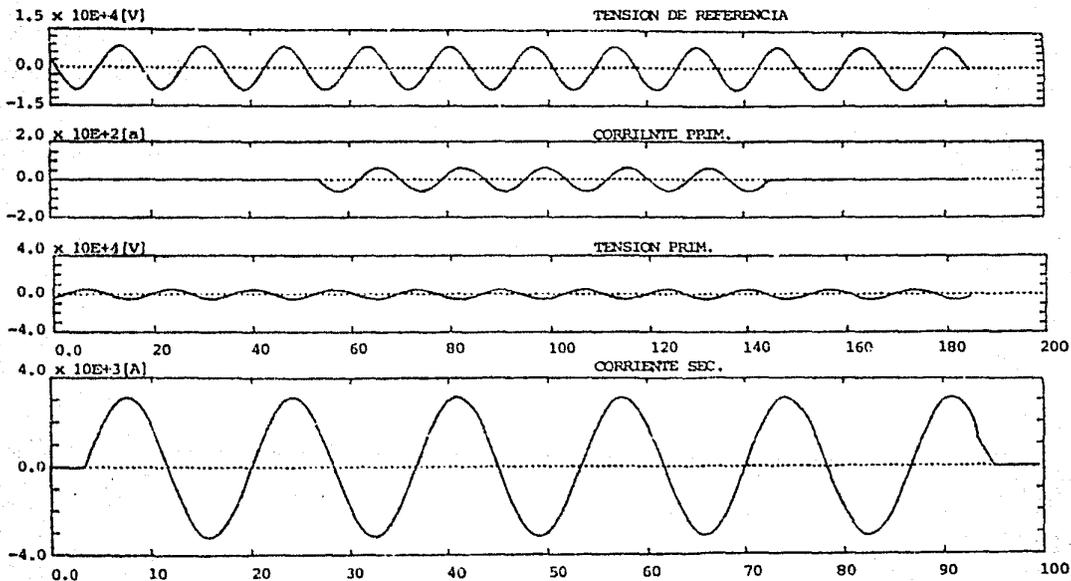
I PRIM. [A]
64.7

E PRIM. [V]
6 561.1

I SEC. [A]
3 599.0

ESC. TIEMPO (MILISEG)

C.O. - 13



E REF. [V]
5 941.8

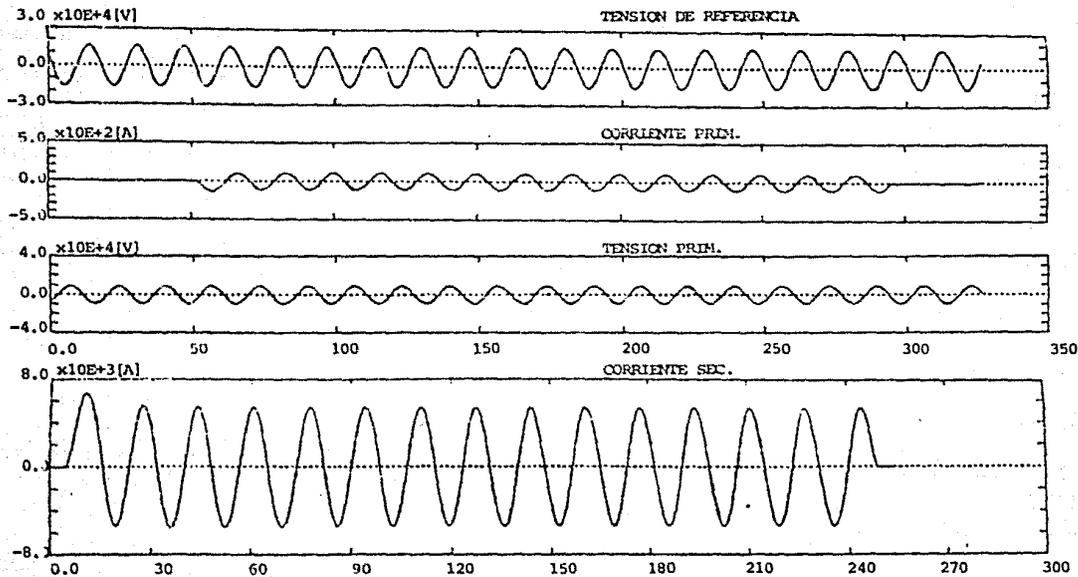
I PRIM. [A]
43.9

E PRIM. [V]
3 411.4

I SEC. [A]
2 216.1

ESC. TIEMPO (MILLISEG)

C.O. - 14



E REF. [V]
11 240.0

I PRIM. [A]
75.5

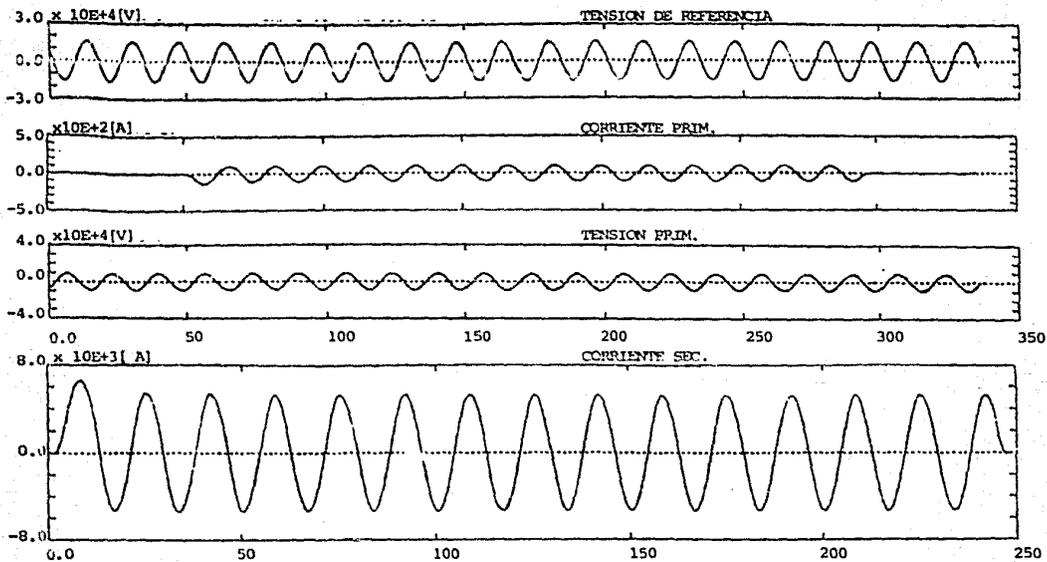
E PRIM. [V]
6 460.2

I SEC. [A]
3 792.2

ESC. TIEMPO (MILISEG)

- 102 -

C.O. - 15



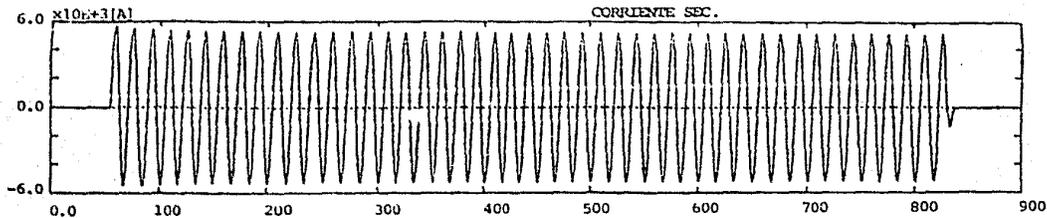
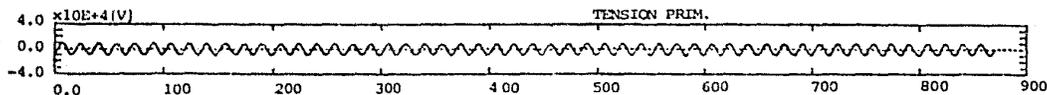
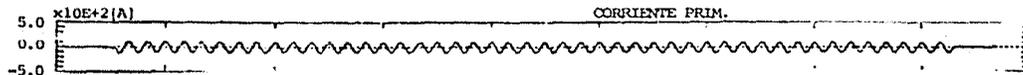
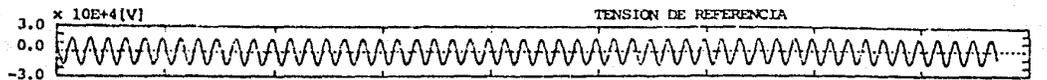
E REF. [V]
11 140.0

I PRIM. [A]
74.7

E PRIM. [V]
6 400.9

I SEC. [A]
3 740.6

ESC. TIEMPO (MILISEG)



E N.F. [V]
11 150

I PRIM. [A]
71.12

E PRIM. [V]
6 401.0

I SEC. [A]

ESC. TIEMPO (MILISEG)

TABLA DE RESULTADOS - TRANSFORMADOR 2

Núm. Evento	Post. Camb.	Núm. Con. (C.O.)	PRUEBA REALIZADA	Tensión A.T.		Corriente A.T.		Factor de Asim.	IMPEDANCIA				
				Fuente (KV)	Transf. (KV)	Simétrico Eficaz (A)	Asim. Pico (A)		V (Volts)	I (Amps)	R (Ohms)	X (Ω)	
1	5		Medición del Z ₀						17.14	0.102	67.0		10.20
2	1	09	Calibración	6392.0	3574.3	41.8	59.77	1.43					
3	1	10	Simétrica	11300	6489.6	65.4	101.3	1.55					
4	1		Medición del Z ₀						17.79	0.113	56.4		3.22
5	1	11	Simétrica	11390	6538.8	64.9	98.64	1.52					
6	1		Medición del Z ₀						2307	0.143	161.3		6.43
7	1	12	Simétrica	11450	6561.1	64.7	97.69	1.51					
8	1		Medición del Z ₀						18.47	0.113	62.5		7.26
9	5	13	Calibración	5941.8	3411.4	43.9	63.65	1.45					
10	5	14	Asimétrica	11240	6460.2	75.5	133.6	1.77					
11	1		Medición del Z ₀						17.07	0.102	66.7		9.97
12	5	15	Asimétrica	11140	6400.9	74.7	131.4	1.76					
13	1		Medición del Z ₀						17.8	0.106	66.8		10.05
14	5	16	Larga Duración	11150	6401	71.12	111.6	1.57					
15	1		Medición del Z ₀						17.11	0.100	69.7		11.97

7. Evaluación de Resultados y Conclusiones.

Vamos a proceder a analizar la tabla de resultados.

En el evento 1 se mide la impedancia del transformador antes de pruebas, la que nos servirá como referencia.

Después de la prueba de calibración se procede a aplicar la sesión de pruebas en condición simétrica.

Al término de las cuales tenemos una medición de $\Delta\%Z$ de - 7.26 la que resulta ser alta tomando en cuenta que en este punto se ha realizado la mitad de las pruebas y este valor - representa más del 50% $\Delta\%Z$ permisible que es de 10.20.

En el evento 3 se calibra para la posición del cambiador de derivación y se procede a efectuar el bloque de pruebas en condición asimétrica.

La medición de $\Delta\%Z$ después de la primera prueba asimétrica, resulta de 9.97 lo que hace evidente que el transformador bajo prueba ha sufrido daño interno severo y predice una falla total ya que aún restan dos pruebas en condición asimétrica - una de las cuales es la de larga duración.

El evento 15 corrobora lo antes apuntado ya que la medición del $\Delta\%Z$ es de 11.97.

Aplicando el criterio de $\Delta\%Z$ permisible:

$$11.97 > 10.20$$

lo que implica que el transformador 2 no soportó las pruebas de corto circuito según la norma usada.

CONCLUSIONES

A lo largo del desarrollo de este trabajo, se hizo hincapié en la dificultad de conseguir información al respecto de este tema, y en gran parte este problema se debe a la poca experiencia que tenemos en México en esta prueba tan importante de laboratorio.

Es indudable que en este aspecto, es necesario contar con el mayor número de experiencias posibles, dado que de esto, se deriva el conocimiento, y la tecnología que gradualmente se va fundamentando en la comparación y mejoramiento de los modelos y diseños de los nuevos transformadores apoyados en los resultados obtenidos.

Por ello nos parece indispensable que se promueva la prueba de corto-circuito externo aplicada a los transformadores manufacturados en nuestro país.

De esta manera se verían beneficiados por un lado los usuarios de los equipos aprobados ya que aumentaría notablemente la confiabilidad en servicio de el producto y por otro lado los fabricantes de los mismos, ante un abatimiento en costos al concentrarse en la fabricación de los diseños que con un alto porcentaje de certeza funcionaran adecuadamente, ganando además en calidad y prestigio de producto terminado.

Finalmente, el principal beneficiado es nuestro país al ver incrementada su infraestructura tecnológica e industrial.

De ahí que el objetivo de esta tesis es válido y comprobamos la importancia que tiene el apoyarse en la prueba de corto-circuito externo aplicada a transformadores para constar que el diseño del transformador bajo prueba sea el adecuado.

APENDICE A

ASIMETRIA DE LA CORRIENTE DE FALLA

Si suponemos que de manera instantánea aplicamos un corto - circuito trifásico en un circuito RL predominantemente inductivo ($X \gg R$) la onda resultante consistirá de dos componentes:

- 1.- Componente de c.a.
- 2.- Componente de c.d.

para lo cual es válido escribir:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = \text{Sen}(\omega t + \alpha) \quad (\text{A.1})$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{R}{L} i = \gamma \frac{P}{L} \cdot \text{Sen}(\omega t + \alpha) \quad (\text{A.2})$$

Con i como variable dependiente.
 t como variable independiente.

Esta ecuación admite como solución:

$$i = \frac{V_p}{Z} \text{Sen}(\omega t + \alpha - \gamma) - \frac{V_p}{Z} \text{Sen}(\alpha - \gamma) e^{-Rt/L} \quad (\text{A.3})$$

donde:

$$\frac{V_p}{Z} \text{Sen}(\omega t + \alpha - \gamma) \quad (\text{A.3.1.}) \text{ componente en estado permanente.}$$

$$\frac{V_p}{Z} \text{Sen}(\alpha - \gamma) e^{-Rt/L} \quad (\text{A.3.2.}) \text{ componente en estado transitorio.}$$

donde: $Z^2 = R^2 + \omega^2 L^2$; $\phi = \text{ang } \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$

α - es el desplazamiento angular expresado en radianes o -
grados, entre el punto $V = 0$ y $t = 0$ medido positivamente o
sea cuando $V = 0$.

y $\frac{de}{dt}$ es positiva, fig. (A.1),

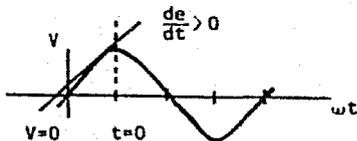


Fig. A.1

$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$; $\phi = \text{ang } \tan^{-1} \frac{\omega L}{R}$

Ahora bien, para que no exista asimetría,

$\frac{Vp}{Z} \text{ Sen} (\alpha - \phi) e^{-Rt/L} = 0$

esto sucede si $(\alpha - \phi) = 0$

Si el circuito como se dijo en un principio es predominantemente inductivo, $\omega L/R$ es grande de tal manera que $\phi = 90^\circ$

$\alpha - \phi = 0$ si $\phi = \pi/2, \frac{3}{2}\pi, \frac{5}{2}\pi$

Esto quiere decir que el transitorio es mínimo en circuitos inductivos cuando el corto ocurre en el punto de máximo voltaje, fig. A.2,

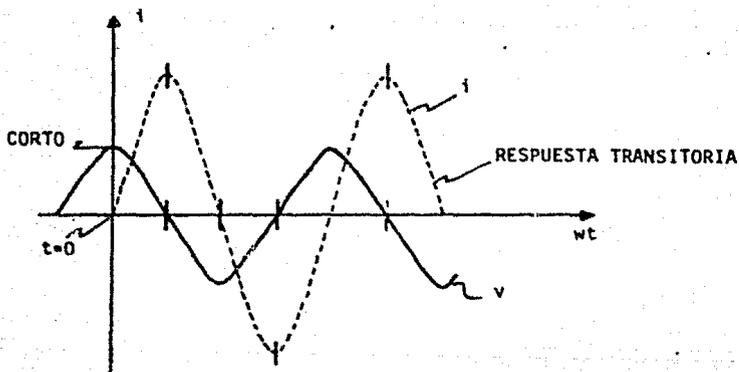


Fig. A.2

Para máxima asimetría $\alpha - \beta = 90^\circ$ ó sea $\beta = 0, \pi, 2\pi$
 de hecho, el transitorio es máximo si $\text{Sen}(\alpha - \beta) = 1$ ó -1
 esto implica que i sea máxima, fig. A.3,

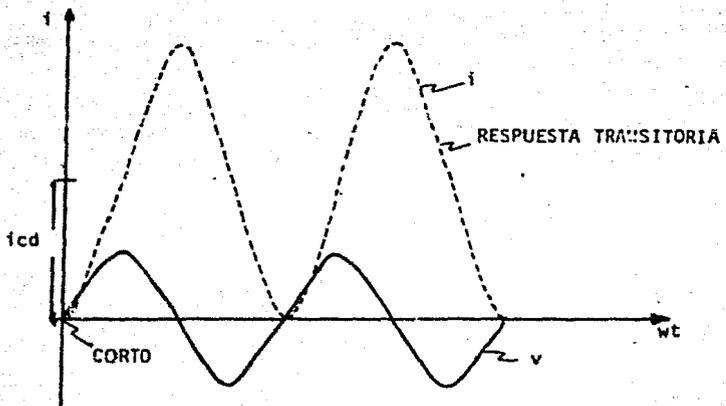


Fig. A.3

APENDICE B

FLUJO MAGNETICO EN EL TRANSFORMADOR

En esta sección se describe, en términos simples, los flujos electromagnéticos producidos en el transformador.

1.- Supongamos dos bobinas compactas con núcleo de aire, como se indica en la fig. B.1, constituyendo un transformador elemental.

Si la bobina 2 está en circuito abierto, y el flujo producido por la corriente i_1 en la bobina 1 es el mostrado en la misma figura, entonces se tiene,

Φ_{11} es el flujo total producido por i_1 compuesto por todas las líneas de flujo indicadas en la figura B.1 (dibujadas _____ y - - - - -).

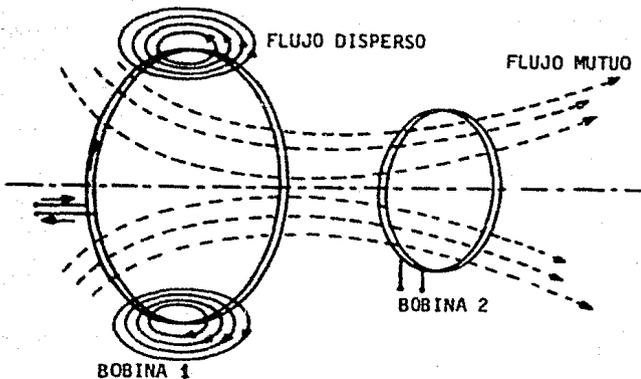


Fig. B.1

ϕ_{12} es el flujo que enlaza a la bobina 2 producido por la corriente i_1 y se denomina "flujo mutuo".

ϕ_{d_1} es aquella parte del flujo producido por i_1 que enlaza únicamente a la bobina 1, de tal forma que:

$$\phi_{d_1} = \phi_{11} - \phi_{12} \quad \text{(B.1)}$$

y se denomina a ϕ_{d_1} "flujo disperso" de la bobina 1 con respecto a la 2.

De igual forma, si es la bobina 1 la que se encuentra en circuito abierto y por la 2 circula una corriente i_2 se tiene:

$$\phi_{d_2} = \phi_{22} - \phi_{21} \quad \text{(B.2)}$$

en donde las definiciones de cada término son semejantes.

Ahora bien, la clara diferencia establecida hasta el momento entre los componentes del flujo en bobinas compactas con núcleo de aire, no es fácil de establecer en un transformador, sin apoyarnos en el concepto de flujo equivalente.

2.- Flujos equivalentes en un transformador sin carga.

Es conveniente simplificar la representación del campo magnético en un transformador, introduciendo el concepto de "flujos equivalentes" de la siguiente forma:

Si λ_{11} representa al total de concatenaciones de flujo con las N_1 vueltas del devanado 1, fig. B.2, producidas por la co-

corriente I_1 en el devanado 1, el flujo que las define es:

$$\phi_{11} = \frac{\lambda_{11}}{N_1} \quad \text{--- (B.3)}$$

en donde ϕ_{11} comprende a todas las líneas de flujo que concatanen al devanado 1, es decir, representa al número de concatenaciones promedio de flujo por vuelta del devanado.

Y si λ_{12} son las concatenaciones con el devanado 2 producidas por la corriente en 1, el flujo correspondiente es:

$$\phi_{12} = \frac{\lambda_{12}}{N_2} \quad \text{--- (B.4)}$$

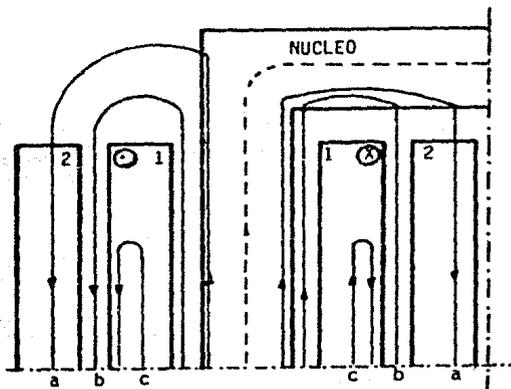


Fig. B.2

Fig. B.2: Se representa la sección transversal de un transformador monofásico de tipo columna, señalando algunas trayectorias del flujo magnético producido por la corriente I_1 en la bobina 1 con la bobina 2 en circuito abierto.

Φ_{12} está representado como la línea marcada 'a' en la fig. B.2

La diferencia entre el flujo total promedio Φ_{11} y el flujo mutuo promedio es el flujo disperso promedio del devanado 1 con respecto al 2.

$$\Phi_{d1} = \frac{\lambda_{11}}{N_1} - \frac{\lambda_{12}}{N_2} \quad \text{---} \quad \text{(B.5)}$$

Con todo esto, se obtiene un esquema como el de la fig. B.3 - en donde las líneas de flujo mostradas representan a los flujos equivalentes de las expresiones (B.3) (B.4) (B.5), por lo tanto, el campo magnético de un transformador real, puede ser visualizado en términos de las componentes equivalentes del flujo mutuo y el flujo disperso, ya que estos flujos equivalentes incluyen en sí a las concatenaciones parciales de flujo producidas por el campo magnético dentro de los espacios del devanado.

De igual forma, cuando el devanado 1 está en circuito abierto, y por el 2 fluye una corriente I_2 , resultarán:

$$\Phi_{22} = \frac{\lambda_{22}}{N_2}$$

$$\Phi_{21} = \frac{\lambda_{21}}{N_1}$$

$$\phi_{d_2} = \frac{\lambda_{22}}{N_2} - \frac{\lambda_{21}}{N_1}$$

ϕ_{22} - flujo total promedio producido por I_2

ϕ_{21} - flujo mutuo promedio que enlaza a la bobina 1 y a la 2.

ϕ_{d_2} - flujo disperso promedio de la bobina 2 con respecto a 1

El flujo disperso equivalente tiene una trayectoria de aire o sin hierro en su mayor parte, por lo tanto la reluctancia de la parte de hierro de las trayectorias de dispersión es pequeña comparada con la reluctancia del aire. De donde se tiene que el flujo disperso es casi directamente proporcional a la corriente que lo produce. Esta propiedad simplifica el estudio de los transformadores de núcleo de hierro.

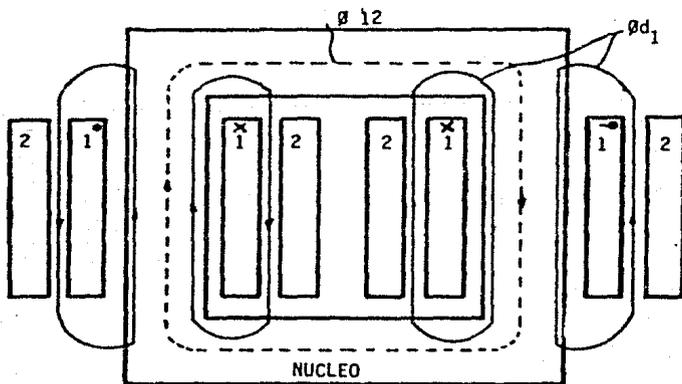


Fig. B.3

Flujos magnéticos equivalentes producidos por la corriente I, de la bobina 1.

$$\phi_{11} = \phi_{12} + \phi_{d_1} - \text{flujo total} \quad (\text{B.6})$$

3.- Flujos magnéticos equivalentes en un transformador con carga.

Cuando en ambos devanados del transformador circula corriente, el campo magnético resultante depende de los valores instantáneos de ambas corrientes.

En estas condiciones, determinar la distribución del campo magnético resulta más difícil. Por esta razón, es conveniente descomponer los flujos resultantes en las componentes equivalentes producidas por cada corriente en forma independiente. Se asume que la permeabilidad magnética del hierro es constante, para con ello poder hacer uso del principio de Superposición. Los componentes de flujo para cada devanado son:

- a) Flujo disperso debido a la corriente en el devanado.
- b) Flujo mutuo debido a la corriente en el devanado.
- c) Flujo mutuo debido a la corriente en el otro devanado.

el flujo resultante que concatena al devanado 1 es:

$$\phi_1 = \phi_{d_1} + \phi_{12} + \phi_{21} \quad \text{-----} \quad (\text{B.7})$$

para el devanado 2

$$\phi_2 = \phi_{d_2} + \phi_{21} + \phi_{12} \quad \text{-----} \quad (\text{B.8})$$

De la expresión (B.1) tenemos:

$$\phi_{11} = \phi_{d_1} + \phi_{12}$$

Sustituyendo la (B.5) en (B.7)

$$\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{21} \quad (\text{flujo resultante})$$

que dice que el flujo resultante ϕ_1 que concatena a la bobina 1, es la suma del flujo ϕ_{11} producido por la corriente 1 sola, más el flujo mutuo ϕ_{21} producido por la corriente 2.

En forma similar, el flujo resultante para la bobina 2 es:

$$\phi_2 = \phi_{22} + \phi_{12}$$

De las expresiones (B.7) y (B.8) podemos definir para simplificar, lo siguiente:

$$\phi = \phi_{12} + \phi_{21}$$

$$\therefore \phi_1 = \phi_{d_1} + \phi$$

$$\phi_2 = \phi_{d_2} + \phi$$

Esto significa que el flujo que enlaza a cada bobina se considera como la suma del flujo disperso debido a la corriente en el devanado mismo, más el flujo mutuo resultante producido por las fuerzas magnetomotrices de ambos devanados, 1 y 2.

4.- Flujo Disperso.

Es proporcional a los amperes vueltas de los devanados primario y secundario. En general el flujo disperso afecta a:

- La inductancia de dispersión de los devanados.
- Las fuerzas magnéticas producidas dentro y entre los devanados, especialmente bajo condiciones de corto circuito.
- Las pérdidas de carga (en el cobre).
- Las corrientes circulantes en el tanque del transformador.
- La regulación de tensión (% Z).

Por esto, se estudia a continuación un procedimiento general para calcularlo, pues no es la finalidad perseguida en esta tesis.

La expresión general para calcular el flujo magnético es:

$$\phi = \mu_0 \mu_r \frac{F \cdot a}{l} = \mu_0 \mu_r \frac{NIa}{l} \quad \text{--- (B.9)}$$

- F = NI \Rightarrow la fuerza magnetomotriz en amperes vuelta.
- a = la sección transversal de la trayectoria del flujo.
- l = la longitud de la trayectoria del flujo en m.
- ϕ = el flujo magnético en Wb.

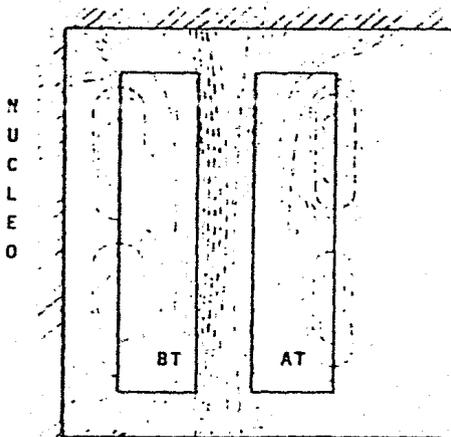
Considerando 'a' y 'l' como las cantidades que definen la trayectoria de dispersión, en algún caso particular, entonces la expresión (B.9) nos permite calcular la magnitud del flujo disperso ϕ_d , y que puede redefinirse en función de la permeabilidad magnética Δ de la trayectoria como: $\phi_d = F \cdot \Delta$

donde:

$$\Delta = \mu_0 \mu_r \frac{a}{l} \quad \text{[wb/ amperes - vuelta]}$$

La geometría de las trayectorias del flujo disperso es muy com

plicada, principalmente en los extremos, fig. B.4, y por lo tanto no es fácil de estimar.



(Trayectorias típicas del flujo disperso para un transformador con devanados concéntricos.)

Fig. B.4

Por lo general se asume que las partes de las trayectorias de dispersión que pasan por el hierro, requieren una fuerza mag-

netomotriz despreciable, de donde el problema se reduce a determinar la permeabilidad de las partes no magnéticas de las trayectorias del flujo.

Si se evalúa la distribución del flujo disperso por algún método, entonces las trayectorias se dividen en secciones, y en cada sección se puede estimar un coeficiente de permeabilidad dado por:

$$\alpha_i = \frac{a_i}{l_i}$$

∴ para n secciones

$$\Delta = \mu_0 \sum_{i=1}^n \alpha_i = \mu_0 \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{l_i}$$

donde:

$\mu_r = 1$ si la trayectoria es aire

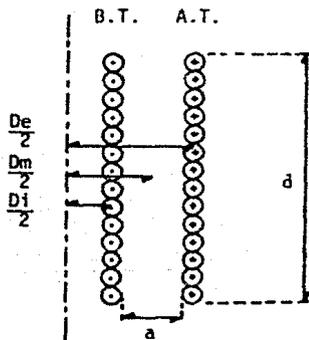
$$\phi_d = \mu_0 F \sum_{i=1}^n \frac{a_i}{l_i}$$

APENDICE C

CALCULO DE LOS ESFUERZOS RADIALES Y AXIALES EN EL TRANSFORMADOR

C.1 Esfuerzos Radiales.

Se parte de la consideración de que el flujo disperso está confinado en su mayor parte al espacio Alta-Baja de los devanados, entonces se supone que dicho flujo es equivalente al producido por un solenoide con diámetro igual al espacio alta-baja como en la fig. C.1



donde:

- a - ancho del espacio Alta-Baja
- d - altura de las bobinas
- D_m - diámetro medio de las bobinas
- D_e - diámetro promedio de la bobina más externa (A.T.)
- D_i - diámetro promedio de la bobina más interna (B.T.)

Fig. C.1

Para conocer la densidad del flujo magnético en el centro de un solenoide, cuyo radio es pequeño comparado con su longitud es:

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r NI}{d} \quad (C.1)$$

y como el medio físico que atraviesan las líneas de flujo - magnético es aire (o aceite)

$$\mu_r = 1$$

entonces:

$$B = \frac{\mu_0 NI}{d} \quad (C.1')$$

donde:

B - densidad de flujo magnético
 μ_0 - constante de permeabilidad magnética del vacío
 NI - amperes - vueltas de cada devanado
 d - es la altura de los devanados.

La densidad de flujo promedio que concatena ambos devanados es:

$$B_p = \frac{B}{2} = \frac{\mu_0 NI}{2d} \quad (C.1'')$$

de donde la fuerza radial que actúa sobre el devanado más externo (A.T.) de acuerdo con la regla de fuerza magnética de Ampere es:

$$Fre = B_p FL = B_p N I l \quad (C.2) \text{ sust. } (C.1'') \text{ y } l = NI; l = De \pi$$

$$Fre = \frac{\mu_0 NI}{2d} NI \pi De$$

$$Fre = \frac{\mu_0 \pi}{2} \frac{(NI)^2 De}{d} \quad (C.2')$$

en donde:

Fre - esfuerzo dinámico radial (Nw)

- NI - Fuerza magnetomotriz del arreglo (amperes - vueltas)
 De - Diámetro promedio del devanado de AT (m)
 d - Longitud del espacio Alta - Baja. Altura de los devanados.

de igual forma para el devanado de BT se tiene:

$$F_{ri} = \frac{\mu_r (NI)^2}{2d} D_i \quad (C.3)$$

en donde:

F_{ri} - Esfuerzo dinámico radial que actúa sobre el devanado más interno.

D_i - Diámetro promedio del devanado de B.T. (m)

Para conocer los esfuerzos dinámicos bajo condiciones de falla, se debe sustituir el valor de la corriente de corto circuito.

C.2 Esfuerzos Axiales en el Transformador.

Aunque existe un número considerable de métodos para el cálculo de estos esfuerzos, y todos ellos son aproximados, consideremos el caso del método de los amperes - vueltas residuales.

Para un transformador con bobinas uniformes de igual altura - sin desplazamiento axial ni derivaciones.

En ambos devanados las fuerzas generadas actúan en dirección al punto medio de cada uno (ver fig. C.2) y la expresión que permite calcularlas consideradas como la suma para ambos devanados es:

$$F_{ac} = \frac{2 \mu_r^2 (NI)^2 D_m}{d^2} \left(a + \frac{b+c}{3} \right) \times 10^{-11}$$

en donde:

- Fac - Fuerza de compresión axial (Ton)
- NI - Amperes - vueltas de un devanado
- Dm - Diámetro promedio de ambos devanados (m)
- d - Altura o construcción axial de los devanados (m)
- a - Dimensión radial del espacio Alta - Baja (m)
- b - Dimensión radial de la bobina de Alta Tensión (m)
- c - Dimensión radial de la bobina de Baja Tensión (m)

Esta expresión proporciona un valor total para ambos devanados, de ésto, una parte que va de 2/3 a 3/4, corresponde al devanado más interno (Baja Tensión) y de 1/4 a 1/3 al devanado de Alta Tensión.

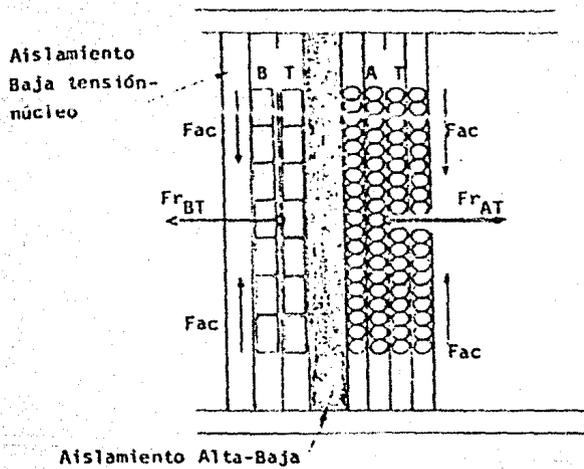


Fig. C.2 Fuerzas electromagnéticas balanceadas entre las bobinas primaria (a.t.) y secundaria (b.t.) de un transformador.

BIBLIOGRAFIA

1. Dynamic Response of power transformers under axial short circuit forces.
Mukund R. Patel
General Electric Company
Pittsfield, Mass.
2. Short circuit characteristics of transformers.
W.J. McNutt, Fellow, I.E.E.E.
General Electric Company
Pittsfield, Mass.
3. Diseño y Fabricación de equipo eléctrico
Características de corto circuito de transformadores.
División de Educación Continua.
Facultad de Ingeniería UNAM
Expositores:
Ing. José Manuel de la Barrera.
Ing. Arturo García Guerrero.
4. Cálculo de Fallas en Sistemas de Potencia.
Ing. Rafael Guerrero C.
Gerencia General de Planeación y Programa.
C. F. E.
5. Laboratorio de Alta Potencia de L.A.P.E.M.
Ing. José Magaña Hernández
Ing. Carlos Villalobos Romo
Ing. Carlos L. Cabrera Rueda
C. F. E.
6. Norma A.N.S.I./I.E.E.E.
C.57.12.00 - 1980

7. Norma A.N.S.I./I.E.E.E.

C. 57.12.90 - 1980

8. Transformer short - circuit strenght and standards

A state of the art paper.

I.E.E.E.

7. Norma A.N.S.I./I.E.E.E.

C. 57.12.90 - 1980

8. Transformer short - circuit strenght and standards

A state of the art paper.

I.E.E.E.