



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA**



***Metodología para Medición de la Reactancia
de Dispersión en Transformadores***

Tesis

Para obtener el título de:
Ingeniero Electricista.

Presenta:
Juan Carlos Jiménez Hernández.

Asesor:
Ingeniero Víctor Quintero Rojas.

Morelia Mich., Marzo del 2010.

Agradecimientos.

A la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, que me brindo la oportunidad de realizar mis estudios.

Al personal del Laboratorio de Ingeniería Eléctrica, por facilitarme el equipo requerido para alcanzar los objetivos trazados en esta tesis.

Al profesor M.C. José Alberto Avalos por apoyo brindado y facilitarme el uso de las instalaciones y equipo en el edificio de posgrado de Ingeniería Eléctrica.

A familiares y amigos, que de alguna manera contribuyeron a lograr mis objetivos.

Hago extensivo mi más sincero agradecimiento a todas estas personas, sin duda alguna esta tesis no sería la misma sin su ayuda...

Juan Carlos Jiménez Hernández.

Dedicatoria.

A mis padres

*A quienes me han heredado el
tesoro más valioso que pueda
dársele a un hijo, amor.*

*A quienes sin escatimar esfuerzo alguno
han sacrificado gran parte de su vida, me
han formado y educado.*

*A quienes la ilusión de su existencia
ha sido verme convertido en persona
de provecho.*

*A quienes nunca podre pagar todos
los desvelos ni con las riquezas más
grandes del mundo...*

Resumen.

Una de las preocupaciones de las empresas encargadas de la distribución de energía eléctrica, es el detectar oportunamente posibles fallas en los transformadores, logrando con ello importantes ahorros en los costos operativos de las redes eléctricas.

A pesar de los esfuerzos del personal involucrado en el mantenimiento y operación de los transformadores instalados, siguen ocurriendo fallas tanto en transformadores viejos como nuevos, esto debido a que los transformadores se van deteriorando con el tiempo, además de que pueden dañarse rápidamente a causa de un sobreesfuerzo, y lo más probable es que muestren pocas señales de envejecimiento o daño por sobreesfuerzo ya que todo sucede internamente.

Los sobreesfuerzos son una de las causas principales de falla en los transformadores ya que estos reducen significativamente la expectativa de vida y resulta en alto riesgo de tener una falla prematura en el sistema. Uno de los esfuerzos causantes de más fallas son los mecánicos, ya que cada vez que un transformador aporta corriente a una falla, sus devanados deben soportar fuerzas electromagnéticas de varios cientos de newtons las cuales los deforman mecánicamente.

En algunos casos estos esfuerzos deforman parcialmente los devanados sin dañar el aislamiento entre las espiras, pero debido a que son repetitivos pueden romper las terminales, deformar las bobinas o cambiar de sitio algunos componentes internos, lo mencionado anteriormente también puede suceder por golpes causados en el momento del traslado o manipulación del transformador.

Cuando esto sucede, el daño mecánico causado puede ser determinado por medio de la interpretación de la reactancia de dispersión, y sobre la cual tratara esta tesis.

Índice.

Agradecimientos	ii
Dedicatoria	iii
Resumen	iv
Índice	v
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	x
Lista de Símbolos y Abreviaturas	xi

Capítulo 1 Introducción

1

1.1 Antecedentes, Descripción General del Proyecto	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Justificación	3
1.4 Hipótesis	3
1.5 Metodología	3
1.6 Marco Teórico	4

Capítulo 2 Transformadores

5

2.1 Historia	5
2.2 Las Máquinas Eléctricas y los Transformadores	6
2.3 Producción de un Campo Magnético	6
2.3.1 La Ley de Ohm de los Circuitos Magnéticos	10
2.4 Inducción Mutua y Autoinducción	13
2.5 Funcionamiento de un Transformador	14
2.5.1 Transformador Ideal	16
2.6 Funciones de las Partes Principales de un Transformador	18
2.6.1 El Núcleo de los Transformadores	19
2.6.2 Herrajes o armadura	21
2.6.3 Los devanados de los transformadores	22
2.7 Tipos y Aplicaciones de Transformadores	24

2.7.1 Transformador de Potencia	25
2.7.2 Tipos de Transformadores de Distribución	25
Capítulo 3 Reactancia de Dispersión	33
3.1 Introducción	33
3.2 ¿Por qué Fallan los Transformadores?	33
3.2.1 Deformaciones Mecánicas en Devanados	35
3.3 Reactancia de Dispersión	38
3.3.1 Análisis de la Reactancia de Dispersión	40
3.4 Circuito Equivalente del Transformador	42
Capítulo 4 Método Utilizado para la Medición	50
4.1 Introducción	50
4.2 Prueba en corto circuito	52
4.3 Medición de Impedancia en un Transformador de dos Devanados ...	53
4.4 Medición de Impedancia en un Transformador Trifásico de dos Devanados	54
4.5 Medición de Impedancia en un Transformador de tres Devanados ...	54
4.6 Recomendaciones para Realizar la Prueba de Reactancia de Dispersión	55
4.7 Equipos para Realizar la Prueba de Reactancia de Dispersión	56
Capítulo 5 Ensayo Realizado	67
5.1 Introducción	67
5.2 Ensayo de un Transformador de 5kVA	67
Conclusiones y Trabajos Futuros	79
Apéndices	83
A Pruebas por fase, conexión Delta-Estrella y pruebas de equivalente trifásico, conexión Delta-Estrella	83
Referencias	85

Lista de Figuras.

2.1	Alambre cargado de electricidad, Alambre cargado en presencia de un campo magnético, Alambre en movimiento en presencia de un campo magnético, Campo magnético variable	7
2.2	Núcleo magnético sencillo	8
2.3	Circuito eléctrico simple, Circuito magnético análogo a un núcleo de transformador	11
2.4	Esquema básico del transformador	14
2.5	Esquema de un transformador ideal y su símbolo esquemático	16
2.6	Partes de un transformador	18
2.7	Transformador tipo núcleo, Transformador tipo acorazado	20
2.8	Transformador de potencia	25
2.9	Transformador de distribución tipo poste	26
2.10	Transformador encapsulado en resina	27
2.11	Transformador hermético	27
2.12	Transformador rural	28
2.13	Transformador subterráneo	29
2.14	Autotransformadores	30
2.15	Transformadores autoprotegidos	30
2.16	Transformador de corriente TT/CC	31
2.17	Transformador de potencial TT/PP	32
3.1	Deformaciones mecánicas en devanados ocasionadas por fuerza horizontal y vertical	35
3.2	Deformación entre vueltas de un devanado	35
3.3	Deformación de bloques espaciadores	36
3.4	Pandeo de conductores	36

3.5	Deformación radial	36
3.6	Pandeo radial	37
3.7	Inclinación en conductores	37
3.8	Pandeo entre espaciadores	37
3.9	Trayectorias de flujo mutuo y flujo de dispersión	38
3.10	Canal de dispersión	39
3.11	Análisis de la reactancia de dispersión	40
3.12	Circuito resultante al considerar las condiciones 2 y 3	43
3.13	Consecuencia de las condiciones 4 y 5	43
3.14	Introducción de las reactancias de fuga	46
3.15	Circuito descrito por las ecuaciones 3.19 y 3.21	48
3.16	Circuito lineal equivalente de un transformador	48
3.17	Circuito equivalente del transformador simplificado	49
4.1	Diagrama de la prueba de corto circuito	52
4.2	Equipo doble M4110	57
4.3	Transformador de dos devanados, conexión de la prueba 1, para Delta-Estrella	58
4.4	Transformador de dos devanados, conexión de la prueba 1, para Estrella-Delta	59
4.5	Transformador de dos devanados, conexión de la prueba 1, para Delta-Delta	60
4.6	Transformador de dos devanados conexión de la prueba 1, para Estrella-Estrella	61
4.7	Auto _ transformador, conexión para la prueba 1	62
4.8	Medidor de impedancia de dispersión ETP-4	63
4.9	ETP-4, conexión para transformador de dos devanados	65
4.10	Pantalla de medida	65
4.11	Pantalla de análisis de resultados	66

4.12	Pantalla de configuración de resultados	66
5.1	Geometría del núcleo acorazado del transformador monofásico	68
5.2	Transformador monofásico de 5KVA	69
5.3	Placa de datos del transformador	69
5.4	Núcleo a modificar del transformador	72
5.5	Vista transversal del núcleo del transformador	73
5.6	Núcleo del transformador con devanados alineados correctamente, Núcleo del transformador con devanados desplazados en direcciones opuestas	75
5.7	Diagrama fasorial de Impedancia	78
5.8	Distribución del flujo de dispersión magnética	79
A1	Pruebas por fase, conexión Delta-Estrella	83
A2	Pruebas de equivalente trifásico, conexión Delta-Estrella	84

Lista de Tablas.

4.1	Conexión para Delta-Estrella	58
4.2	Conexión para Estrella-Delta	59
4.3	Conexión para Delta-Delta	60
4.4	Conexión para Estrella-Estrella	61
4.5	Conexión para Auto _ transformadores	62
4.6	Conexión para Auto _ transformadores	63
4.7	Conexión para Delta-Estrella	65

Lista de Símbolos y Abreviaturas.

A	Amperio unidad de corriente
V	Volts unidad eléctrica
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
X	Reactancia
I	Corriente
L	Inductancia
Z	Impedancia
Ah	Amperio-hora
Hz	Unidad de frecuencia Hertz
mm	Milímetros
W	Watts unidad de potencia
H	Intensidad de campo magnético
lc	Longitud de recorrido medio
N	Número de vueltas en la bobina
B	Densidad de flujo magnético
λ	Elases de flujo
μ	Permeabilidad
Φ	Flujo magnético
Fmm	Fuerza magnetomotriz
$\mathfrak{R}$	Reluctancia
P	Permeancia
θ	Angulo
$\mathfrak{R}_{eq}$	Reluctancia equivalente
R	Resistencia
%	Cantidad porcentual
VA	Voltamperios unidad de potencia aparente
K	Prefijo Kilo (10^3)

“Metodología para Medición de la Reactancia de Dispersión en Transformadores”

P.I.E. Juan Carlos Jiménez Hernández

Para el Trabajo de Tesis titulado “Metodología para Medición de la Reactancia de Dispersión en Transformadores”, presentado por el Pasante de Ingeniería Eléctrica Juan Carlos Jiménez Hernández, y en cumplimiento parcial de los requisitos para optar al Título de Ingeniero Electricista, fungieron como Jurado;

Ing. Víctor Quintero Rojas

Presidente

M.C. José Alberto Avalos González

Vocal 1

Ing. Gustavo Saucedo Zavala

Vocal 2

Ing. María Alejandra Martínez Gutiérrez

Suplente 1

Ing. Enrique Báez García

Suplente 2

Capítulo 1.

Introducción.

Quizás el momento más decisivo para la humanidad haya sido el descubrimiento del fuego, y gracias a él, la humanidad comenzó a ser capaz de controlar o modificar muchos procesos que hasta ese momento dependían únicamente de la naturaleza. Desde entonces la energía ha sido un elemento indispensable en la satisfacción de las necesidades cotidianas de todas las formas de organización social, partiendo de los usos y equipos más elementales, como la cocción de alimentos con fogones de tres piedras, hasta los sofisticados aparatos electrónicos.

Es por eso que ya sean necesidades pasadas, presentes o futuras, la energía a sido un motivo para desarrollar y poner en práctica la capacidad inventiva del ser humano y así de esta forma poder crear y lograr artefactos que nos ayuden a su manipulación, uno de tantos, el transformador que desde su invención ha sido una máquina eléctrica muy importante puesto que con relativa facilidad cambia el nivel de voltaje, a valores que se requieren en los diferentes subsistemas de distribución, y traslada la energía adecuadamente a diferentes distancias realizando todo esto con eficiencia.

Por lo mencionado anteriormente, es necesario realizar un diagnóstico y mantenimiento preventivo de los transformadores, con la finalidad de mantener en condiciones óptimas los equipos e identificar posibles condiciones de operación críticas o hasta incluso fallas, la realización de pruebas para el diagnóstico, como la medición de la reactancia de dispersión, nos permiten detectar de manera oportuna fallas incipientes en transformadores.

En la actualidad la mayoría de las fallas no están relacionadas directamente con daño térmico en el aislamiento, sino con fallas mecánicas resultantes de fuerzas electromagnéticas de gran magnitud, ocasionadas por corrientes de cortocircuito, y la

incapacidad de la estructura para soportar tales fuerzas, ya que tales fuerzas son proporcionales al cuadrado de la corriente de los devanados. Por ejemplo, una corriente veinte veces la corriente nominal producirá una fuerza de $(20)^2$ o 400 veces a la producida a valores normales de corriente.

No obstante también pueden surgir anomalías por un mal ensamblado al momento de ser reparados o fabricados, o simplemente por su traslado, ya que puede sufrir impactos y movimientos severos durante su transporte o maniobra.

Por lo que en esta tesis se da una interpretación de lo que es la reactancia de dispersión, y cómo es posible utilizarla como herramienta de diagnóstico en la determinación de desplazamientos o distorsión de devanados de transformadores.

1.1 Antecedentes.

Los efectos de la corriente eléctrica que circula sobre un conductor son dos principales, el calórico y el magnético. El calórico es llamado de efecto Joule y es el que calienta una resistencia de una plancha para ropa, un filamento de lamparilla, un fogón eléctrico, o una parrilla de interiores. El efecto magnético pone en marcha los motores eléctricos, se usa en el reactor de tubo fluorescente para limitar la corriente circulante, produce una chispa eléctrica en un encendedor de cocinas del tipo "magic click" o está presente en los chisperos de encendido en cocinas que ya lo integran, etc.

Ahora bien, si la corriente circulante es del tipo que cambia de sentido periódicamente o corriente alterna, tanto el efecto calórico como el magnético variarán de acuerdo con leyes físicas ya conocidas, siendo el efecto magnético el que más interesa en este asunto. La ley de Lenz dice que todo conductor sometido a un campo magnético variable, crea en sí una corriente inducida que tiende a oponer sus efectos a la causa que la produce. Llamamos a la oposición de la circulación, reactancia. Para una bobina o inductancia es denominada reactancia inductiva.

1.2 Objetivo.

El objetivo de esta tesis radica en obtener una metodología para realizar un diagnóstico y mantenimiento preventivo de los transformadores, con la finalidad de mantenerlos en condiciones óptimas e identificar posibles condiciones de operación crítica o incluso fallas.

1.3 Justificación.

Debido a que la mayoría de las fallas no están relacionadas directamente con daño térmico sino con daño mecánico, esto debido a que los transformadores aportan corriente a fallas en el sistema de potencia, sometiendo a sus devanados a grandes fuerzas electromagnéticas las cuales los deforman mecánicamente, la magnitud de estas fuerzas se entiende mejor cuando se sabe que éstas son proporcionales al cuadrado de la corriente en sus devanados, tales fuerzas pueden afectar a los transformadores tanto en su eficiencia como en su vida útil e incluso dañándolos permanentemente.

1.4 Hipótesis.

“Utilizar la reactancia de dispersión como indicador para detectar distorsión o desplazamiento en devanados del transformador, ya que cuando ocurre una distorsión en los devanados cambia la reluctancia de la trayectoria del flujo magnético, resultando con ello un cambio en la reactancia de dispersión medida”.

1.5 Metodología.

El tipo de investigación fue documental, la cual consistió, en un artículo de CFE del laboratorio LAPEM, en la recopilación de información de libros, revistas, artículos de Internet, experimental, además de recibir asesorías metodológicas y orientación del asesor.

1.6 Marco Teórico.

La manera en la que se va organizar el contenido de esta tesis, es en cinco capítulos de la manera que se indica a continuación.

Capítulo 1.- Se presenta una breve introducción, así como el objetivo que se desea alcanzar en esta tesis, su justificación explicando el por qué se decidió desarrollar este tema, su hipótesis donde se propone una solución anticipada del problema, además se describe la metodología utilizada para alcanzar el objetivo.

Capítulo 2.- Se presenta una breve historia del inicio de los transformadores, se muestra también conceptos básicos como campo magnético, analogías del circuito magnético con el eléctrico, teoría sobre el funcionamiento del transformador, así como partes más importantes que lo conformar, también se mostrarán algunos tipos y aplicaciones de los transformadores.

Capítulo 3.- Se presenta el significado de la reactancia de dispersión asociada a los transformadores, como se ven afectados cuando ésta cambia, se verá su circuito equivalente, para de esta forma poder conocer los valores que nos ayuden en el cálculo de la reactancia.

Capítulo 4.- Se presenta el método utilizado para la medición de la reactancia de dispersión en transformadores monofásicos, trifásicos y autotransformadores, a demás les daremos a conocer unos de los módulos que miden la reactancia de dispersión, sus diagramas, conexiones y su representación en pantalla.

Capítulo 5.- Se presenta el ensayo realizado a un transformador monofásico con núcleo acorazado de 5kVA, a demás de las conclusiones del trabajo desarrollado, así como trabajos a futuro.

Capítulo 2.

Transformadores.

2.1 Historia.

El primer transformador fue, de hecho, construido por Faraday cuando realizó los experimentos en los que descubrió la inducción electromagnética. El aparato que usó fueron dos bobinas enrolladas una encima de la otra. Al variar la corriente que circulaba por una de ellas, cerrando o abriendo el interruptor, el flujo magnético a través de la otra bobina variaba y se inducía una corriente eléctrica en la segunda bobina. Pues bien, este dispositivo es precisamente un transformador. Faraday no puso mayor atención en este aparato ya que estaba interesado en otras cuestiones. En el transcurso de los años varios experimentadores trabajaron con diferentes versiones de transformadores.

El primer sistema de distribución de electricidad lo puso en servicio Edison, en Nueva York, en el año 1882. Se trataba de una pequeña central eléctrica que suministraba corriente continua a 120V. Esta tensión tan baja requería que por los cables circularan grandes corrientes, lo que daba lugar a enormes caídas de tensión y enormes pérdidas. De modo que en la práctica una central sólo podía alimentar a una manzana de edificios.

La invención del transformador y los desarrollos de las fuentes de corriente alterna, resolvieron los graves problemas que tenía la distribución de energía eléctrica en corriente continua. Si se eleva por ejemplo en diez veces la tensión en la distribución, la corriente se reduce justamente en esas diez veces, con lo que las caídas de tensión también se reducen en ese factor, y las pérdidas en los cables en 100 veces.

En el año de 1886 la electricidad se transmitió a 2000 volts en corriente alterna a una distancia de 30 kilómetros, en una línea construida en Cerchi, Italia. A partir de estas pequeñas aplicaciones iniciales, la industria eléctrica en el mundo, ha crecido en tal forma,

que en la actualidad es un factor de desarrollo en los pueblos, formando parte importante en esta industria, el transformador.

La elección correcta de un banco de transformadores no es tarea que se pueda tomar a la ligera, por lo que el conocimiento a fondo de esta máquina es indispensable para todo proyectista eléctrico, por otra parte, poner fuera de servicio un transformador representa un serio problema para las empresas que se ocupan de prestar servicio de electricidad a las comunidades, ya que ello siempre trae consigo un apagón más o menos prolongado de un sector poblacional.

2.2 Las Máquinas Eléctricas y los Transformadores.

Una maquina eléctrica es un artefacto que transforma bien sea energía eléctrica en energía mecánica o bien energía mecánica en energía eléctrica. Cuando tal artefacto se utiliza para transformar energía mecánica en energía eléctrica, se denomina generador, y cuando el artefacto transforma energía eléctrica en energía mecánica se llama motor. Otro artefacto íntimamente relacionado con los anteriores es el transformador, aparato que transforma energía eléctrica de CA de un nivel de voltaje dado, en energía eléctrica de CA a otro nivel de voltaje. Puesto que los transformadores operan bajo los mismos principios que los motores y generadores, los tres dependen de la acción del campo magnético para lograr el cambio de nivel de voltaje.

2.3 Producción de un Campo Magnético.

Tal como se menciona previamente, los campos magnéticos son los mecanismos fundamentales por medio de los cuales la energía pasa de una forma a otra, aquí cuatro principios básicos que describen como se utilizan los campos magnéticos en las máquinas eléctricas:

1. Un alambre cargado de electricidad produce un campo magnético a su alrededor.
2. Un alambre cargado de corriente en presencia de un campo magnético tiene una fuerza inducida sobre él.
3. Un alambre en movimiento, en presencia de un campo magnético, tiene un voltaje inducido en él.
4. Un campo magnético de tiempo variable induce un voltaje en una bobina de alambre, si pasa a través de dicha bobina.

Estos cuatro principios básicos son mostrados un poco más explícitamente en la figura 2.1, la cual se muestra a continuación;

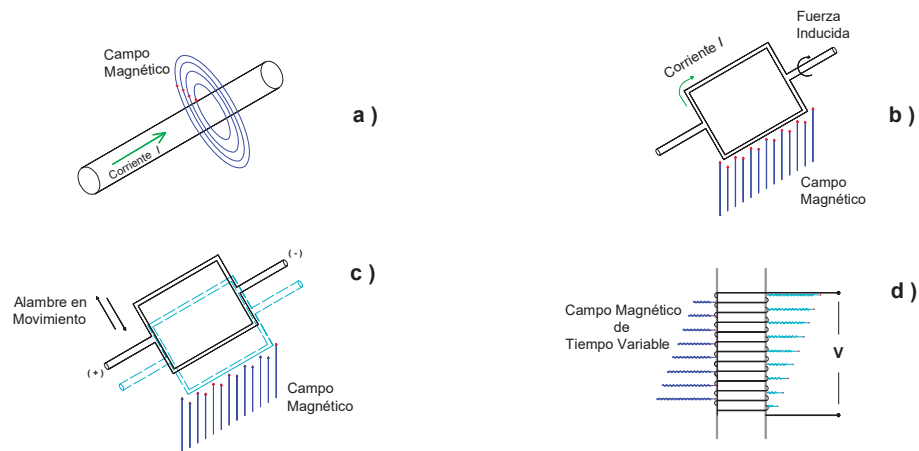


Figura 2.1 a) Alambre cargado de electricidad, b) Alambre cargado en presencia de un campo magnético, c) Alambre en movimiento en presencia de un campo magnético, d) Campo magnético variable

La ley que rige la producción de un campo magnético por medio de una corriente es la ley de Ampere,

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint_s \vec{J} \cdot d\vec{S} = I_{enc} \quad \text{Ec. (2.1)}$$

en donde H es la intensidad del campo magnético producido por la corriente I_{enc} , donde I está dado en amperios y H se mide en amperio-vuelta por metro.

Para darle un mejor significado a la ecuación anterior tenemos la figura 2.2, donde mostramos un núcleo rectangular con un embobinado de alambre de N vueltas en torno a una columna del núcleo.

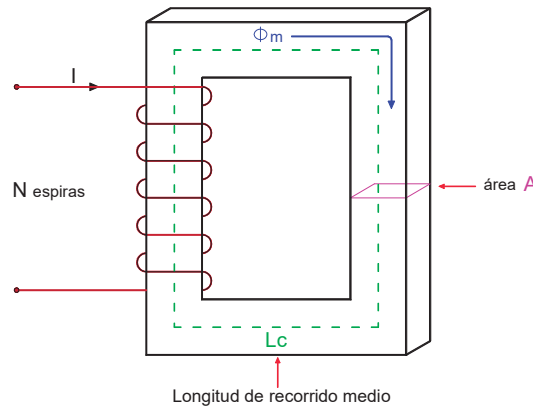


Figura 2.2 Núcleo magnético sencillo.

Y debido a que el campo magnético producido por la corriente permanece esencialmente dentro del núcleo, el recorrido de la integración en la ley de Ampere es la longitud media del recorrido del núcleo L_c , y la corriente que pasa dentro del recorrido de la integración I_{sec} es entonces NI , esto debido a que la bobina abraza el recorrido N veces mientras conduce la corriente I.

Por consiguiente, la magnitud de la intensidad del campo magnético en el núcleo, debido a la corriente que se le aplica es:

$$H = \frac{NI}{L_c} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

La intensidad del flujo magnético producido depende del material del cual esté hecho el núcleo. Así la relación entre la intensidad de campo magnético H y la densidad del flujo magnético resultante dentro de un material, está dada por la ecuación:

$$B = \mu \cdot H \quad \text{Ec. (2.3)}$$

Donde H = Intensidad de campo magnético.

μ = Permeabilidad magnética del material (Henrios por metro).

B = Densidad del flujo magnético resultante (Webers por metro cuadrado, conocidas como Teslas).

De estos términos se tiene que;

B .- representa una propiedad del material en donde se crea el campo.

H .- representa el esfuerzo que ejerce la corriente para establecer un campo magnético.

μ .- representa el esfuerzo que realiza la corriente para establecer un campo magnético en un material dado.

La permeabilidad de un material el cual se quiera comparar con la permeabilidad del espacio, se denomina permeabilidad relativa y se calcula:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad \text{Ec. (2.4)}$$

Donde μ_r = es la permeabilidad relativa.

μ_0 = es la permeabilidad de espacio libre que es igual a $4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

Por lo que, el metal del cual está hecho el núcleo del transformador cumple un importante papel al incrementar y concentrar el flujo magnético, esto debido a que la permeabilidad del hierro es mucho más grande que la del aire y gracias a esto permanece dentro del núcleo, tal y como se muestra en la figura 2.2, en vez de correr por el aire circundante que tiene menos permeabilidad.

La poca filtración de flujo que abandona el núcleo de hierro es muy importante para determinar el enlace de flujo, que se produce entre las dos bobinas y los coeficientes de autoinducción de las bobinas de los transformadores.

Y el flujo total de un área dada se determina por:

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad \text{Ec. (2.5)}$$

Donde Φ .- es el flujo magnético total.

dA .- es la unidad diferencial de área.

El flujo magnético Φ , es una medida de la cantidad de magnetismo, y se calcula a partir del campo magnético, la superficie sobre la cual actúa, y el ángulo de incidencia formado entre las líneas de campo magnético y los diferentes elementos de dicha superficie. La unidad de flujo magnético en el Sistema Internacional de Unidades es el weber y se designa por Wb (motivo por el cual se conocen como weberímetros los aparatos empleados para medir el flujo magnético). En el sistema cegesimal se utiliza el maxwell (1 weber =108 maxwells). Si el campo magnético $\mathbf{B}$ es normal a la superficie de área $\mathbf{A}$, el flujo Φ que pasa a través de dicha área es simplemente el producto del valor absoluto de ambos vectores:

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \quad \text{Ec. (2.6)}$$

Concentración del flujo magnético por una espira. En muchos casos el campo magnético no será normal a la superficie, sino que forma un ángulo θ con la normal, por lo que podemos generalizar un poco más tomando vectores:

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} = |\mathbf{B}| |\mathbf{A}| \cos \theta \quad \text{Ec. (2.7)}$$

2.3.1 La Ley de Ohm de los Circuitos Magnéticos.

En un circuito eléctrico, el voltaje o fuerza electromotriz genera un flujo de corriente. En forma similar en un circuito magnético, quien genera un flujo magnético, es una fuerza denominada fuerza magnetomotriz.

El campo magnético creado por la bobina es directamente proporcional a la corriente I y al número de espiras o vueltas N que se encuentran alrededor del núcleo de la Figura 2.2. Por comparación con la tensión eléctrica, llamaremos tensión magnética o fuerza magnetomotriz fmm. al producto de I por N , de tal manera que, resulta la siguiente ecuación:

$$F = N \cdot I \quad \text{Ec. (2.8)}$$

Donde: F : Fuerza magnetomotriz (Amper – vuelta).

N : Número de vueltas del bobinado.

I : Corriente aplicada, (Ampere).

Esta ecuación indica claramente que un incremento en la cantidad de vueltas o en la corriente que pasa por el alambre, producirá una mayor “Fuerza” en el sistema para establecer líneas de flujo a través del núcleo.

La polaridad de la fmm en una bobina de alambre puede determinarse haciendo una modificación de la regla de la mano derecha, es decir, si los dedos de la mano derecha se enroscan en dirección del flujo de la corriente en la bobina, entonces el dedo pulgar señalará la dirección de la fem positiva.

La analogía entre circuito eléctrico y circuito magnético se muestran a continuación en la figura 2.3;

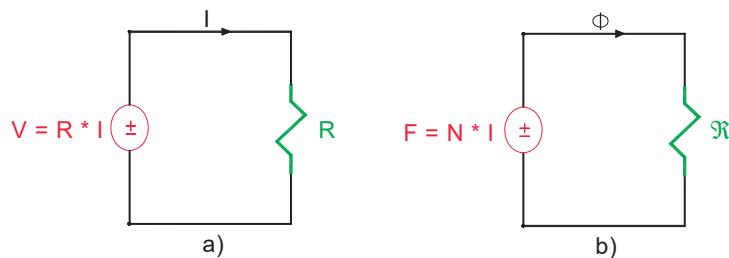


Figura 2.3 a) Circuito eléctrico simple, b) Circuito magnético análogo a un núcleo de transformador.

En un circuito eléctrico, el voltaje aplicado causa el flujo de una corriente I , de igual modo, en un circuito magnético la fuerza magnetomotriz aplicada causa la producción de un flujo magnético Φ . La relación entre voltaje y resistencia en un circuito eléctrico es la ley de ohm, $I = V/R$; de manera semejante, la relación entre fuerza magnetomotriz y reluctancia es:

$$\Phi = \frac{F}{\mathfrak{R}} \quad \text{Ec. (2.9)}$$

Donde F : Fuerza magnetomotriz;

Φ : Flujo magnético (weber).

$\mathfrak{R}$: Reluctancia del circuito (amperes – vuelta por weber).

Además hay también una analogía magnética de conductancia, así como la conductancia de un circuito eléctrico es la recíproca de la resistencia, la permeancia (P) de un circuito magnético es la recíproca de su reluctancia.

$$P = \frac{1}{\mathfrak{R}} \quad \text{Ec. (2.10)}$$

Entonces la relación entre la fuerza magnetomotriz y el flujo magnético puede expresarse como:

$$\Phi = F \cdot P \quad \text{Ec. (2.11)}$$

Las reluctancias en un circuito magnético obedecen las mismas reglas a que obedecen en un circuito eléctrico.

La reluctancia equivalente en un circuito serie es:

$$\mathfrak{R}_{eq} = \mathfrak{R}_1 + \mathfrak{R}_2 + \mathfrak{R}_3 + \dots + \mathfrak{R}_n \quad \text{Ec. (2.12)}$$

La reluctancia en un circuito paralelo es:

$$\frac{1}{\mathfrak{R}_{eq}} = \frac{1}{\mathfrak{R}_1} + \frac{1}{\mathfrak{R}_2} + \frac{1}{\mathfrak{R}_3} + \dots + \frac{1}{\mathfrak{R}_n}$$

Ec. (2.13)

2.4 Inducción Mutua y Autoinducción.

En sus primeras experiencias sobre el fenómeno de la inducción electromagnética Faraday no empleó imanes, sino dos bobinas arrolladas una sobre la otra y aisladas eléctricamente. Cuando variaba la intensidad de corriente que circulaba por una de ellas, se generaba una corriente inducida en la otra. Este es, en esencia, el fenómeno de la inducción mutua, en el cual el campo magnético es producido no por un imán, sino por una corriente eléctrica.

La variación de la intensidad de corriente en una bobina da lugar a un campo magnético variable. Este campo magnético origina un flujo magnético también variable que atraviesa la otra bobina e induce en ella, de acuerdo con la ley de Faraday-Henry, una fuerza electromotriz. Cualquiera de las bobinas del par puede ser el elemento inductor y cualquiera el elemento inducido, de ahí el calificativo de mutua que recibe este fenómeno de inducción.

El fenómeno de la autoinducción, como su nombre indica, consiste en una inducción de la propia corriente sobre sí misma. Una bobina aislada por la que circula una corriente variable, puede considerarse atravesada por un flujo también variable debido a su propio campo magnético, lo que dará lugar a una fuerza electromotriz autoinducida. En tal caso a la corriente inicial se le añadirá un término adicional correspondiente a la inducción magnética de la bobina sobre sí misma.

Todas las bobinas en circuitos de corriente alterna presentan el fenómeno de la autoinducción, ya que soportan un flujo magnético variable; pero dicho fenómeno, aunque de forma transitoria, está presente también en los circuitos de corriente continua. En los

instantes en los que se cierra o se abre el interruptor, la intensidad de corriente varía desde cero hasta un valor constante o viceversa. Esta variación de intensidad da lugar a un fenómeno de autoinducción de duración breve, que es responsable de la chispa que se observa en el interruptor al abrir el circuito; dicha chispa es la manifestación de esa corriente adicional autoinducida.

2.5 Funcionamiento de un Transformador.

El transformador, es un dispositivo que no tiene partes móviles, el cual transfiere la energía eléctrica de un circuito a otro bajo el principio de inducción electromagnética. La transferencia de energía la hace por lo general con cambios en los valores de voltajes y corrientes.

Está constituido por dos o más bobinas de alambre, aisladas entre sí eléctricamente por lo general, y arrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético, tal y como vemos en la figura 2.4.

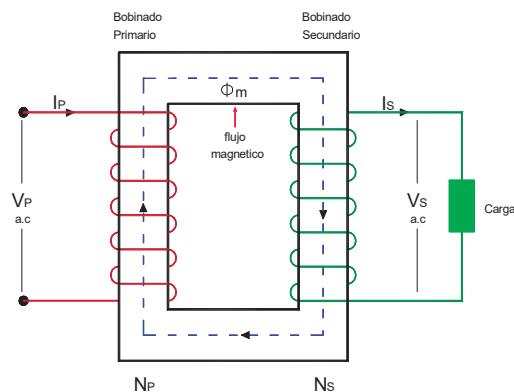


Figura 2.4 Esquema básico del transformador.

El transformador es un aparato electromagnético que puede realizar las siguientes funciones:

- 1.- Elevar o reducir el voltaje o la corriente
- 2.- Actuar como un dispositivo de acoplador de impedancias
- 3.- Aislar una parte de la red de otra

La teoría del funcionamiento de un transformador es la que sigue:

1. Cuando se conecta el primario a una fuente de fem alterna, por el bobinado comienza a circular una corriente alterna.
2. En cuanto fluye una corriente por un conductor se crea un campo magnético alrededor de él. Si la corriente cambia continuamente en magnitud y la polaridad, el campo magnético que se origina en el núcleo de hierro hará lo mismo.
3. El campo magnético alterno está, por tanto, continuamente expandiéndose y contrayéndose. Como el circuito magnético es cerrado, la variación del campo magnético es la misma en cualquier parte del núcleo.
4. Las líneas magnéticas al expandirse y contraerse cortarán a los conductores situados en cualquier parte del núcleo, y de acuerdo con el experimento de Faraday, en éstos aparecerá una fem inducida.
5. Como a cada conductor sobre el núcleo le corta el mismo flujo, la fem inducida por vuelta será la misma. Por tanto, el voltaje en cada bobinado será proporcional al número de vueltas; expresado matemáticamente, esto es;

$$\frac{N_p}{N_s} = \frac{T_p}{T_s}$$

Ec. (2.14)

Donde N_p , N_s son el número de espiras, y T_p , T_s , son las tensiones del primario y del secundario respectivamente.

6. Se puede ver en esta ecuación que el voltaje del secundario se puede aumentar o disminuir

eligiendo una relación de vueltas. Un transformador es un dispositivo capaz de variar los valores de voltaje y corriente de un nivel a otro nivel sin variar la frecuencia, solamente mediante acoplamiento magnético. Su importancia reside en el hecho de que al aumentar el voltaje se reduce la corriente, y esto lo hace indispensable en los sistemas de potencia para transmitir energía eléctrica a grandes distancias disminuyendo las pérdidas.

2.5.1 Transformador Ideal.

Se puede considerar un transformador ideal, aquel en el que no existe ningún tipo de pérdida, ni magnética, ni eléctrica. La ausencia de pérdidas supone la inexistencia de resistencia e inductancia en los bobinados, en la figura 2.5 se muestra el esquema de un transformador ideal así como su símbolo esquemático.

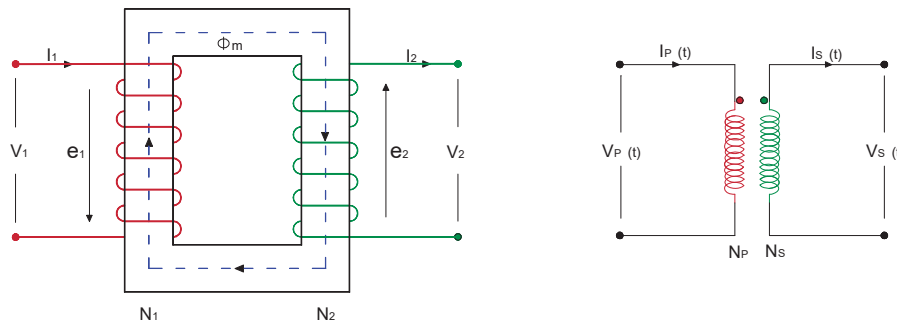


Figura 2.5 Esquema de un transformador ideal y su símbolo esquemático.

El transformador tiene N_P espiras de alambre sobre su lado primario y N_S de espiras de alambre en su lado secundario. La relación entre la tensión $V_P(t)$ aplicada al lado primario del transformador y la tensión $V_S(t)$ inducido sobre su lado secundario es:

$$\frac{V_P(t)}{V_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} = \alpha$$

Ec. (2.15)

En donde (a) se define como la relación de espiras del transformador. La relación entre la corriente $I_p(t)$ que fluye en el lado primario del transformador, y la corriente $I_s(t)$ que fluye hacia fuera del lado secundario del transformador es:

$$\frac{N_P}{N_S} = \frac{I_s(t)}{I_p(t)} \quad \text{Ec. (2.16)}$$

$$\frac{I_p(t)}{I_s(t)} = \frac{1}{a} \quad \text{Ec. (2.17)}$$

En términos de cantidades fasoriales, estas ecuaciones son:

$$\frac{V_P}{V_S} = a \quad \text{Ec. (2.18)}$$

$$\frac{I_P}{I_S} = \frac{1}{a} \quad \text{Ec. (2.19)}$$

Nótese que el ángulo de la fase de V_P es el mismo que el ángulo de V_S y la fase del ángulo I_P es la misma que la fase del ángulo de I_S . La relación de espiras del transformador ideal afecta las magnitudes de las tensiones e intensidades, pero no sus ángulos.

Como podemos observar en la figura 2.5, en el transformador ideal no hay dispersión de flujo magnético, por lo que el flujo se cierra íntegramente sin ningún tipo de dificultad. Las tensiones cambian de valor sin producirse ninguna caída de tensión, puesto que no se producen resistencias en los bobinados primario y secundario.

En la práctica, en un transformador el cual es conectado a una red eléctrica, las bobinas ofrecen una determinada resistencia al paso de la corriente eléctrica, provocando una caída de tensión que se deberá tener en cuenta en ambos bobinados (R_1 y R_2). Igualmente, el flujo magnético que se origina en el bobinado primario no se cierra en su totalidad con el secundario a través del núcleo magnético, sino que una parte de este flujo atraviesa el aislante y se cierra a través del aire. Ambas bobinas no se enlazan por el mismo flujo, la pérdida de flujo magnético se traduce en la llamada inductancia de dispersión (X_d).

2.6 Funciones de las Partes Principales de un Transformador.

Un transformador consta de numerosas partes que se muestra en la figura 2.6; siendo las principales las siguientes:

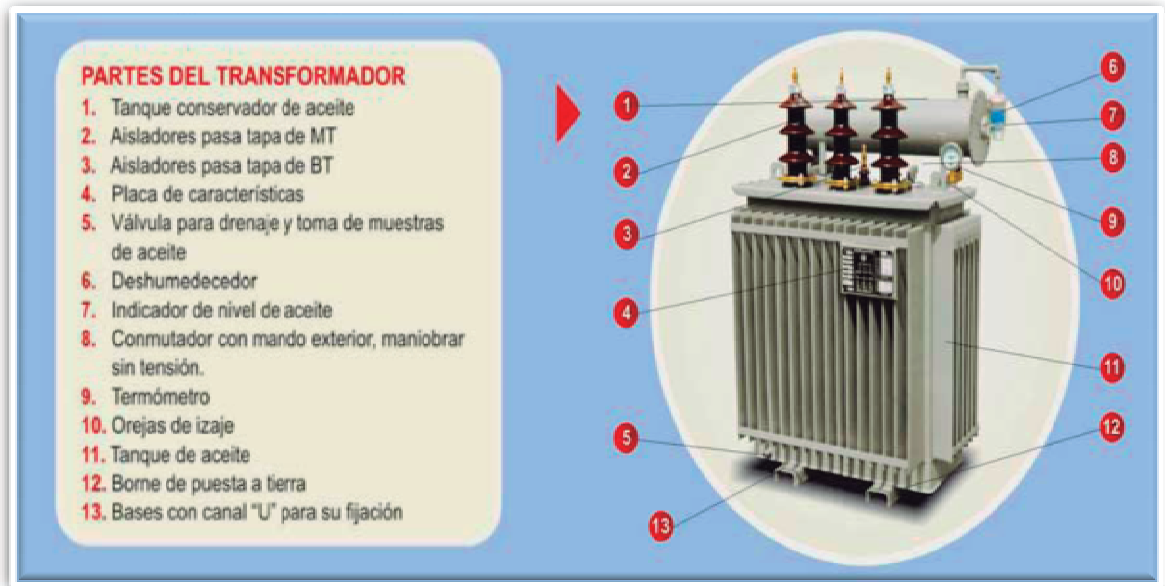


Figura 2.6 Partes de un transformador.

En los siguientes incisos se da una breve explicación de otros elementos del transformador, los cuales no se aprecian a simple vista pero de igual forma son parte importante de la constitución de un transformador.

- a).- El núcleo, constituye el circuito magnético que transfiere energía de un circuito a otro y su función principal es la de conducir el flujo activo. Está sujeto por el herraje o bastidor, se construye de laminaciones de acero al silicio (4%) y sus gruesos son del orden de 0.014 de pulgadas (0.355mm), con un aislante de 0.001 de pulgada (0.0254 mm).
- b).- Los bobinados constituyen los circuitos de alimentación y carga; pueden ser de una o tres fases, y por la corriente y número de espiras pueden ser de alambre delgado, grueso

o de barra. La función de los devanados es crear un campo magnético primario con una pérdida de energía muy pequeña y utilizar el flujo para inducir una fuerza electromotriz en el secundario.

- c).- El tanque o recipiente es un elemento indispensable en aquellos transformadores cuyo medio de refrigeración no es el aire; sin embargo, puede prescindirse de él en casos especiales. Su función es la de radiar el calor producido en el transformador.
- d).-La boquilla permite el paso de la corriente a través del transformador y evita que haya un escape indebido de corriente.
- e).-El medio refrigerante debe ser buen conductor del calor; puede ser líquido como en la mayoría de los transformadores de gran potencia, sólido o semisólido.
- f).-Los conmutadores, cambiadores de derivaciones o TAPs, son órganos destinados a cambiar la relación de voltajes de entrada y salida, con el objeto de regular el potencial de un sistema o la transferencia de energía activa o reactiva entre los sistemas interconectados. Existen dos tipos de ellos: sencillo, de cambio sin carga, y el perfeccionado, de cambio con carga por medio de señal o automático.
- g).-Los indicadores son aparatos que nos señalan el estado del transformador. Por ejemplo, marcan el nivel del líquido, la temperatura, la presión, etc.

2.6.1 El Núcleo de los Transformadores.

El núcleo magnético está formado por laminaciones de acero que tienen pequeños porcentajes de silicio, (alrededor del 4%) y que se denominan “laminaciones magnéticas”, estas laminaciones tienen la propiedad de tener pérdidas relativamente bajas por efecto de histéresis y de corrientes circulantes. La razón de usar laminaciones de acero al silicio en los núcleos de las máquinas eléctricas, es que el silicio aumenta la resistividad del material

y entonces hace disminuir la magnitud de las corrientes parásitas o circulantes, y en consecuencia las pérdidas por este concepto.

Elementos de los núcleos de transformadores.

En los núcleos magnéticos de los transformadores tipo columna se distinguen dos partes principales: “las columnas” o piernas y los “yugos”. En las columnas se alojan los devanados y los yugos, que unen entre si las columnas para cerrar el circuito magnético.

Tipos de núcleos.

Como se ha mencionado con anterioridad, los núcleos para transformadores se agrupan básicamente en las siguientes categorías:

- a) Tipo núcleo o de columnas.
- b) Tipo acorazado.

Los núcleos antes mencionados son mostrados en la figura 2.7. Existen distintos tipos de núcleos tipo columna, los cuales se caracterizan de acuerdo a la posición relativa de las columnas y de los yugos.

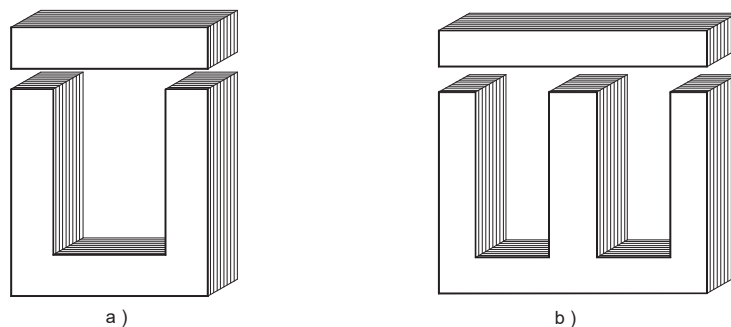


Figura 2.7 a) Transformador tipo núcleo, b) Transformador tipo acorazado.

Núcleo monofásico.

Se tienen dos columnas unidas en las partes inferior y superior por medio de un yugo, en cada una de estas columnas se encuentran incrustados la mitad del devanado primario y la mitad del devanados secundario.

Núcleo trifásico.

Se tienen tres columnas dispuestas sobre el mismo plano unidas en sus partes inferior y superior por medio de yugos. Sobre cada columna se incrustan los devanados primarios y secundarios de una fase. Las corrientes magnetizantes de las tres fases son distintas entre sí, debido principalmente a que el circuito magnético de las columnas externas es más largo que el correspondiente a la columna central, a demás la corriente de vacío es bastante baja, y tiene influencia solamente para las condiciones de operación en vacío.

Tipo acorazado.

Este tipo de núcleo acorazado, tiene la ventaja con respecto al llamado tipo columna, de reducir la dispersión magnética, su uso es más común en los transformadores monofásicos. En el núcleo acorazado, los devanados se localizan sobre la columna central, y cuando se trata de transformadores pequeños, las laminaciones se hacen en troqueles. Las formas de construcción pueden ser distintas y varían de acuerdo con la potencia.

2.6.2 HERRAJES O ARMADURA.

Como se ha mencionado antes, los núcleos de los transformadores tienen partes que cumplen con funciones puramente mecánicas de sujeción de las laminaciones y estructuras,

estas partes o elementos se conocen como “herrajes” o armadura y se complementan con componentes como fibra de vidrio o madera, para protección de la sujeción de los yugos.

2.6.3 Los devanados de los transformadores.

Los devanados de transformadores se pueden clasificar en baja y alta tensión, esta distinción es de tipo global y tiene importancia para los propósitos de práctica, debido a que los criterios constructivos para la realización de los devanados de baja tensión, son distintos de los usados para los devanados de alta tensión.

Otra clasificación de los devanados se puede hacer con relación a la potencia del transformador, para tal fin existen devanados para transformadores de baja potencia, por ejemplo de 1000 a 2000 VA, también existen transformadores de media potencia y gran potencia.

Devanados para transformadores de distribución.

En estos transformador, las diferencia entre las tensiones primaria y secundaria es notable, por ejemplo, los transformados para redes de distribución de 13200 volts a las tensiones de utilización de 220/127 volts, debido a estas diferencias, se emplean criterios constructivo distintos a los considerados en los transformadores pequeños de baja tensión, y se dividen en devanados de baja tensión y de alta tensión.

Devanados de baja tensión.

Están constituidos por lo general, de una sola espiral, algunas veces en dos o tres capas sobrepuestas, con alambre rectangular aislado. Este conductor se usa generalmente para potencias pequeñas y tiene diámetros no superiores a (3 ó 3.5 mm). El aislamiento de los

conductores, cuando son cilíndricos, puede ser de algodón o de papel, y más raramente conductor esmaltado, en el caso que los transformadores que no sean enfriados por aceite.

Devanados de alta tensión.

Hay básicamente dos tipos, el llamado “tipo bobina” formados de varias capas de conductores, estas bobinas tienen forma discoidal, estas bobinas se conectan por lo general, en serie para dar el número total de espiras de una fase.

El otro tipo es el llamado “de capas” constituido por una sola bobina con varias capas, esta bobina es de longitud equivalente a las varias bobinas discoidales, que constituirían el devanado equivalente, por lo general, el número de espiras por capa en este tipo de devanado, es superior al constituido de varias bobinas discoidales.

Posición de los devanados.

La disposición de los devanados en los transformadores, debe ser hecha de tal forma, que se concilien en la mejor forma las dos exigencias que son contrastantes entre sí, el aislamiento y de la menor dispersión del flujo. La primera requiere de la mayor separación entre devanados, en tanto que la segunda, requiere que el primario se encuentre lo más cercano posible del secundario. En la práctica, se alcanza una solución conveniente del problema con la disposición de los devanados dentro de los siguientes tipos:

- a) Concéntrico.
- b) Concéntrico doble.
- c) Alternado.

En el tipo concéntrico, cada uno de los devanados está distribuido a lo largo de toda la columna, en donde el devanado de tensión más baja se encuentra en la parte interna, más

cercano al núcleo. En la disposición de concéntrico doble, el devanado de tensión más baja se divide en dos mitades dispuestas respectivamente al interior y al exterior uno de otro. En el llamado tipo alternado, los dos devanados están subdivididos cada uno en un cierto número de bobinas, las cuales están dispuestas en las columnas en forma alternada.

Unas consideraciones principales, que se toman desde el punto de vista del diseño de transformadores y la disposición de los devanados del mismo, son aquellos referentes al enfriamiento, el aislamiento, la reactancia de dispersión y a los esfuerzos mecánicos que está sometido.

El llamado concéntrico doble tiene la prerrogativa de dar lugar a la reactancia de dispersión, con valor de alrededor de la mitad de aquel relativo al concéntrico simple. El tipo alternado, en cambio, permite variar tales reactancias, repartiendo en forma distinta las posiciones de las bobinas de los dos devanados. Para los esfuerzos mecánicos son mejor las disposiciones de tipo alternado, pues permite que el transformador soporte mejor los esfuerzos mecánicos.

2.7 Tipos y Aplicaciones de Transformadores.

Hay una gran variedad de transformadores para cumplir cada una de las necesidades, pero al mismo tiempo el costo juega un papel importante en la elección del transformador. Además del costo, hay otros factores que se deben tomar en cuenta a la hora de elegir un transformador, como por ejemplo, debemos saber el objetivo que va a cumplir el transformador en el sistema eléctrico, también se debe determinar la carga que vamos a instalar, teniendo en cuenta una perspectiva futura, para de esta forma calcular la potencia y la cantidad de transformadores que se requieren, teniendo en cuenta de que tanto se quiere invertir, sin olvidarnos claro de las tensiones y ver si el proveedor la tiene disponible, así como las derivaciones tanto del primario como secundario, las cuales disminuyen las caídas de tensión. A continuación se dará una pequeña descripción de varios transformadores que existen en el mercado.

2.7.1 Transformador de Potencia.

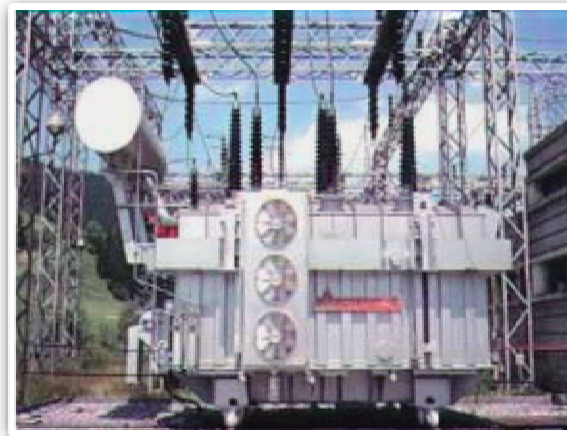


Figura 2.8 Transformador de potencia.

Descripción:

Se utilizan para subtransmisión y transmisión de energía eléctrica en alta y media tensión. Son de aplicación en subestaciones transformadoras, centrales de generación y en grandes usuarios. En la figura 2.8 se muestra un transformador de potencia de una subestación.

Características Generales:

Se construyen en potencias normalizadas desde 1.25 hasta 20 MVA, en tensiones de 13.2, 33, 66 de 132 kV. y frecuencias de 50 y 60 Hz.

2.7.2 Tipos de transformadores de distribución.

Se denomina transformadores de distribución, generalmente los transformadores de potencias iguales o inferiores a 500 kVA, y de tensiones iguales o inferiores a 67 000 V, tanto monofásicos como trifásicos. Aunque la mayoría de tales unidades están proyectadas para montaje sobre postes, algunos de los tamaños de potencia superiores, por encima de las clases de 18 kV, se construyen para montaje en estaciones o en plataformas. Las aplicaciones típicas son para alimentar a granjas, residencias, edificios o almacenes públicos, talleres y centros comerciales.

Transformadores de Distribución Tipo Poste.

Descripción:

Se utilizan en intemperie o interior para distribución de energía eléctrica en media tensión. Son de aplicación en zonas urbanas, industrias, minería, explotaciones petroleras, grandes centros comerciales y toda actividad que requiera la utilización intensiva de energía eléctrica. Tal transformador se muestra en la figura 2.9.



Figura 2.9 Transformador de distribución tipo poste.

Características Generales:

Se fabrican en potencias normalizadas desde 25 hasta 1000 kVA, y tensiones primarias de 13.2, 15, 25, 33 y 35 kV. Se proveen en frecuencias de 50-60 Hz. La variación de tensión, se realiza mediante un conmutador exterior de accionamiento sin carga.

Transformadores Secos Encapsulados en Resina Epoxi.

Descripción:

Se utilizan en interior para distribución de energía eléctrica en media tensión y el cual mostramos en la figura 2.10, además se utiliza en lugares donde los espacios reducidos y los requerimientos de seguridad en caso de incendio, imposibilitan la utilización de

transformadores refrigerados en aceite. Son de aplicación en grandes edificios, hospitales, industrias, minería, grandes centros comerciales y toda actividad que requiera la utilización intensiva de energía eléctrica.



Figura 2.10 Transformador encapsulado en resina.

Características Generales:

Su principal característica es que son refrigerados en aire con aislamiento clase F, utilizándose resina epoxi como medio de protección de los arrollamientos, siendo innecesario cualquier mantenimiento posterior a la instalación. Se fabrican en potencias normalizadas desde 100 hasta 2500 kVA, tensiones primarias de 13.2, 15, 25, 33 y 35 kV, en frecuencias de 50 y 60 Hz.

Transformadores Herméticos de Llenado Integral.

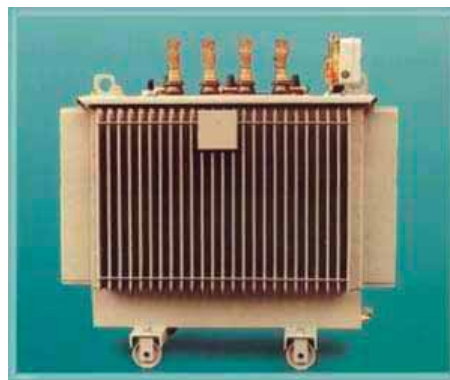


Figura 2.11 Transformador hermético.

Descripción:

Se utilizan en intemperie o interior para distribución de energía eléctrica en media tensión, siendo muy útiles en lugares donde los espacios son reducidos, uno de ellos lo tenemos en la figura 2.11.

Son de aplicación en zonas urbanas, industrias, minería, explotaciones petroleras, grandes centros comerciales y toda actividad que requiera la utilización intensiva de energía eléctrica.

Características Generales:

Su principal característica es que al no llevar tanque de expansión de aceite no necesita mantenimiento, siendo esta construcción más compacta que la tradicional. Se fabrican en potencias normalizadas desde 100 hasta 1000 kVA, tensiones primarias de 13.2, 15, 25, 33 y 35 kV, en frecuencias de 50 y 60 Hz.

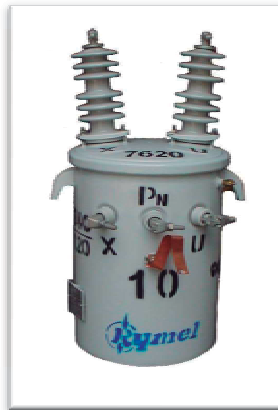
Transformadores Rurales.

Figura 2.12 Transformador rural.

Descripción:

El transformador de la figura 2.12, Está diseñado para instalación monoposte en redes de electrificación suburbanas monofilares, bifilares y trifilares, de 7.6, 13.2 y 15 kV. En redes trifilares se pueden utilizar transformadores trifásicos o como alternativa 3 monofásicos.

Transformadores Subterráneos.**Descripción:**

El transformador mostrado en la figura 2.13, es de una construcción adecuada para ser instalado en cámaras, en cualquier nivel, pudiendo ser utilizado donde haya posibilidad de inmersión de cualquier naturaleza.



Figura 2.13 Transformador subterráneo.

Características:

Potencia: 150 a 2000KVA.

Alta Tensión: 15 o 24,2KV, Baja Tensión: 216,5/125; 220/127; 380/220; 400/231V.

Autotransformadores.**Descripción:**

Se usan normalmente para conectar dos sistemas de transmisión de tensiones diferentes, frecuentemente con un devanado terciario en triángulo. De manera parecida, los autotransformadores son adecuados como transformadores elevadores de centrales, cuando se desea alimentar dos sistemas de transporte diferentes. El autotransformador no sólo presenta menores pérdidas que el transformador normal, sino que su menor tamaño y peso permiten el transporte de potencias superiores. Dichos transformadores son como los que se encuentran en la figura 2.14.



Figura 2.14 Autotransformadores.

Transformadores AutoProtegidos.



Figura 2.15 Transformador autoprotegido.

Descripción:

El transformador de la figura 2.15, incorpora componentes para protección del sistema de distribución contra sobrecargas, corto-circuitos en la red secundaria y fallas internas en el transformador, para esto, posee fusibles de alta tensión y disyuntor de baja tensión, montados internamente en el tanque, fusibles de alta tensión y disyuntor de baja tensión. Para protección contra sobretensiones el transformador está provisto de dispositivo para fijación de pararrayos externos en el tanque.

Características:

Potencia: 45 a 150KVA

Alta Tensión: 15 o 24,2KV, Baja Tensión: 380/220 o 220/127V.

Transformadores de Corriente TT/CC.

Descripción:

Se utilizan para tomar muestras de corriente de la línea, y reducirla a un nivel seguro y medible, para las gamas normalizadas de instrumentos, aparatos de medida, u otros dispositivos de medida y control. Ciertos tipos de transformadores de corriente protegen a los instrumentos al ocurrir cortocircuitos, y algunos de ellos son mostrados en la figura 2.16.

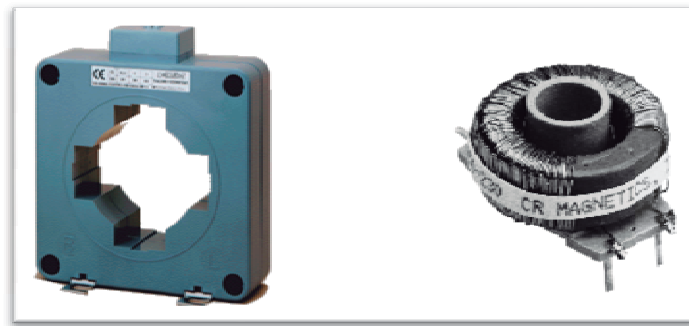


Figura 2.16 Transformador de corriente.

Los valores de corriente son:

Carga nominal: 2.5 a 200 VA, dependiendo de su función. Corriente nominal: 5 y 1A en su lado secundario. Se definen como relaciones de corriente primaria a corriente secundaria.

Unas relaciones típicas de un transformador de corriente podrían ser: 600/5, 800/5, 1000/5. Usualmente estos dispositivos vienen con un amperímetro adecuado con la razón de transformación de los transformadores de corriente.

Transformadores de Potencial TT/PP.

Descripción:

El transformador de la figura 2.17, tiene un devanado especialmente, con un primario de alto voltaje y un secundario de baja tensión. Tiene una potencia nominal muy baja y su

único objetivo es suministrar una muestra de voltaje del sistema de potencia, para que se mida con instrumentos incorporados.



Figura 2.17 Transformador de potencial.

Además, puesto que el objetivo principal es el muestreo de voltaje deberá ser particularmente preciso como para no distorsionar los valores verdaderos. Se pueden conseguir transformadores de potencial de varios niveles de precisión, dependiendo de qué tan precisas deban ser sus lecturas, para cada aplicación especial.

Capítulo 3.

Reactancia de Dispersión.

3.1 Introducción.

Los transformadores son eficaces, fieles y se necesita hacer muy poco para su mantenimiento. Como resultado, reciben poca atención e incluso algunos sugerirían, que como tan pocos de estos equipos fallan en servicio, es suficiente con un pequeño porcentaje de pruebas rutinarias, especialmente cuando la cantidad de personal es baja y los presupuestos son ajustados. Desafortunadamente, los transformadores se deterioran con el tiempo y pueden dañarse rápidamente por excesivo esfuerzo. Es probable que ellos muestren pocas señales de envejecimiento y daños por sobreesfuerzo, pero pueden fallar repentina y completamente.

A pesar de todos los esfuerzos del personal involucrado en el mantenimiento y operación de los transformadores instalados, ocurren fallas, tanto en transformadores nuevos, como viejos. Algunas fallas pueden ser ocasionadas por el desarrollo del propio diseño, problemas por la manufactura de materiales relacionados con el uso de nuevos materiales, o especificaciones inadecuadas, etc. Eventualmente, podrán suceder fallas catastróficas a pesar de las medidas de protección y seguridad tomadas en el lugar, provocando explosión y posterior incendio con riesgo potencial a vidas humanas, además de elevadas pérdidas económicas asociadas a la falla.

3.2 ¿Por qué Fallan los Transformadores?

Cuando un transformador falla, las consecuencias son costosas y disociadoras. El costo de reemplazar un transformador de por sí es alto, pero los costos de no hacerlo pueden ser aún mayores, fácilmente alcanzado los miles de dólares. ¿Y por qué fallan?, Como causas podemos mencionar algunos factores como:

- Todos los materiales aislantes se degradan lentamente con el uso, incluso cuando un transformador opera en condiciones normales.
- Los transformadores tienen una vida limitada de alrededor de 50 años. Uno de los fabricantes más importantes de transformadores en el mundo realizó un estudio que descubrió que muchos transformadores en servicio están cerca de alcanzar su 50º aniversario.
- Asimismo, se viene detectando desde 1998 que los transformadores comienzan a fallar a partir de los 29 años y es muy improbable que esto haya cambiado en la última década.
- Si los transformadores están sometidos a sobreesfuerzos, se reduce significativamente la expectativa de vida natural y resulta en alto riesgo de tener una falla prematura súbita. Se pueden relacionar las fallas por esfuerzo de transformadores en tres categorías:

Los esfuerzos eléctricos envejecen el dieléctrico, incluso a voltaje nominal. Si los rangos son excedidos, aunque sea momentáneamente, el rango de envejecimiento puede aumentar dramáticamente. Una condición de sobreesfuerzo que dure sólo unos pocos milisegundos puede reducir la vida global de un transformador por años, haciéndolo más susceptible a fallas inmediatas si el transformador está sujeto a otro evento de sobreesfuerzo.

Los esfuerzos térmicos también producen el envejecimiento del material aislante, incluso a la temperatura de trabajo. Si se excede la temperatura de trabajo una vez, se acelera el proceso de envejecimiento, y si hay más cambios sucesivos, se acelera el proceso, aunque el transformador siempre esté trabajando dentro de los rangos de temperatura normal de operación.

Los esfuerzos mecánicos, son más comunes que ocurran durante el transporte o instalación del transformador o un terremoto. También los accidentes de cortocircuito del sistema que se acumulan, causan daños en el soporte del bobinado, por su fuerza destructora mecánica repetida, que finalmente rompe las terminales. Estos eventos pueden deformar los

bobinados o cambiar de sitio componentes internos, resultando en corrimientos y separaciones.

3.2.1 Deformaciones Mecánicas en Devanados.

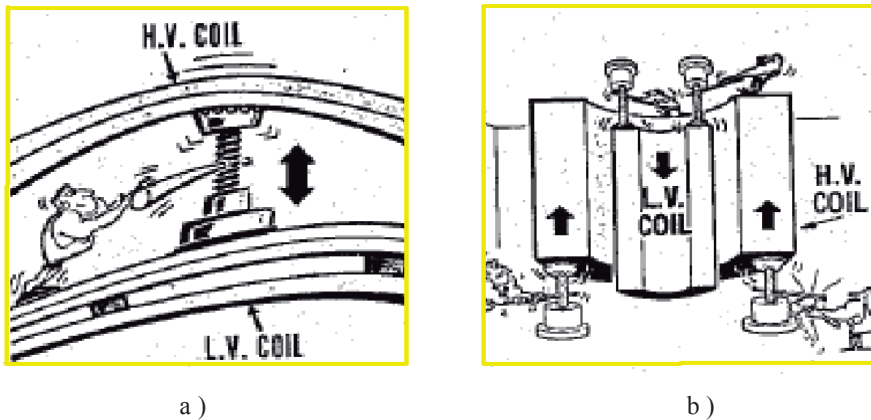


Figura 3.1 Deformaciones mecánicas en devanados ocasionadas; a) Fuerza horizontal, b) Fuerza vertical.

En caso de corto circuito, la reluctancia correspondiente al flujo de dispersión tiende a disminuir, es decir los arrollamientos tienden a separarse para aumentar el espacio aislante entre devanados. Esto por lo tanto justifica los esfuerzos de atracción a que quedan sometidas las espiras del arrollamiento externo, en donde al mismo tiempo los arrollamientos internos sufren una compresión, estos esfuerzos se muestran en la figura 3.1.

a) En la figura 3.2 se muestra un desplazamiento entre vueltas por fuerza axial.



Figura 3.2 Deformación entre vueltas en un devanado.

- b) En la figura 3.3 se muestra una deformación de bloques espaciadores por efecto de fuerzas de compresión en devanados tipo acorazado.

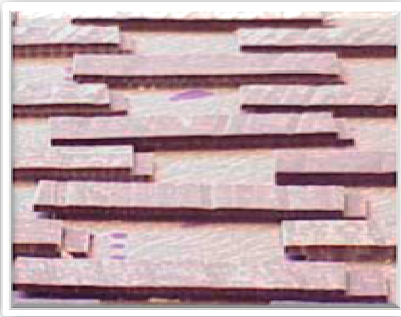


Figura 3.3 Deformación de bloques espaciadores.

- c) En la figura 3.4 observamos un pandeo en conductores por efectos de fuerzas axiales.



Figura 3.4 Pandeo de conductores.

- d) En la figura 3.5 tenemos una deformación radial en discos.



Figura 3.5 Deformación radial.

- e) En la figura 3.6 presentamos una falla por pandeo radial.

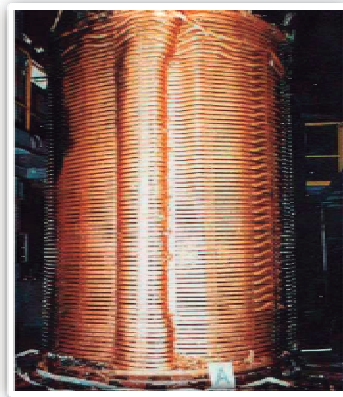


Figura 3.6 Pandeo radial.

- f) En la figura 3.7 mostramos el fenómeno de inclinación en conductores por exceso de fuerzas axiales.

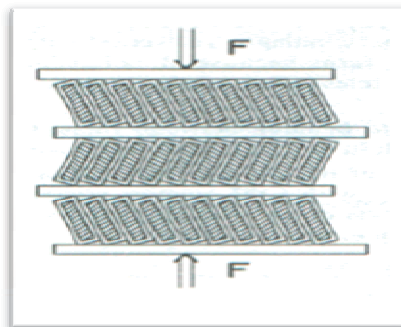


Figura 3.7 Inclinación en conductores.

- g) En la figura 3.8 se muestra el pandeo entre espaciadores radiales por efectos de fuerzas axiales.

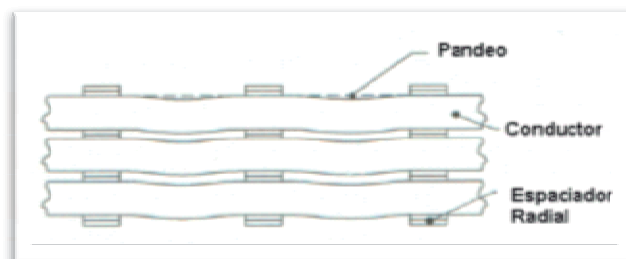


Figura 3.8 Pandeo entre espaciadores.

Estos últimos, los esfuerzos mecánicos causan daños internos en los transformadores afectando principalmente sus devanados, cuando esto sucede el daño causado se puede determinar con la medición e interpretación de la reactancia de dispersión y sobre la cual nos enfocaremos en esta tesis. Los daños causados por los otros esfuerzos mencionados, se determinan con otros tipos de pruebas, las cuales no se trataran aquí.

3.3 Reactancia de Dispersión.

Como se vio en el capítulo anterior el núcleo juega un papel muy importante, el de incrementar y concentrar el flujo magnético dentro del núcleo, esto debido a su permeabilidad, pero como se sabe no todo el flujo magnético es encapsulado en el núcleo, si no que, una pequeña filtración de este flujo escapa fuera de él, tal flujo nos ayuda a determinar los enlaces de flujo que se producen entre las bobinas y los coeficientes de autoinducción en las bobinas de los transformadores.

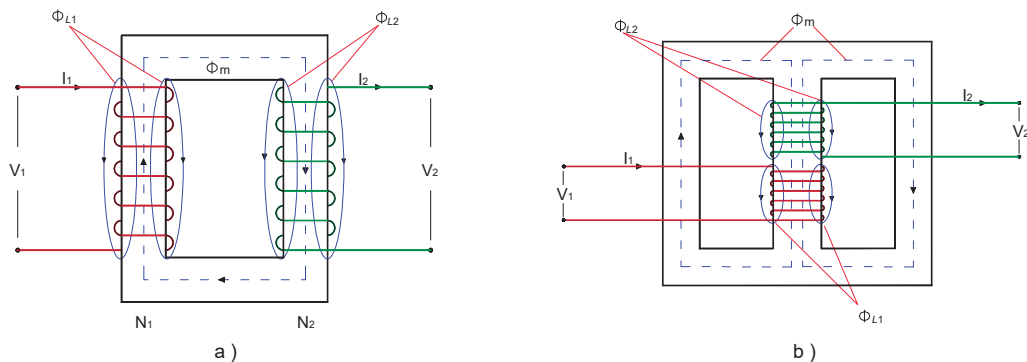


Figura 3.9 Trayectorias de flujo mutuo y flujos de dispersión. a) Transformador tipo núcleo, b) Transformador tipo acorazado.

Bajo carga, los embobinados desarrollan unas fuerzas electromagnéticas que actúan en el espacio externo al núcleo, dando lugar a un crecimiento a flujos de dispersión, el diagrama simplificado de la figura 3.9 muestra dos transformadores, un tipo núcleo y otro tipo acorazado, donde se representa el flujo mutuo Φ_m que encadena ambos embobinados y los flujos de dispersión primarios y secundarios, Φ_{L1} y Φ_{L2} los cuales encadenan solo sus

respectivos embobinados. Las trayectorias tomadas por los flujos de dispersión en transformadores suelen ser más complejos que los indicados en la figura anterior.

Algo de flujo de dispersión se distribuye a través de su embobinado, asociado de tal forma que diferentes cantidades encadenan diferentes vueltas, así Φ_1 y Φ_2 , son por lo tanto flujos de dispersión equivalentes, que al encadenar todas las vueltas de sus embobinados respectivos se genera un total flujo de dispersión, tales flujos propician pérdidas en el transformador las cuales son llamadas caídas internas por reactancia.

¿Qué es la reactancia de dispersión?

La reactancia de dispersión es el valor numérico que toma en cuenta el flujo propio del devanado, que no eslabona al otro devanado, y se conoce como flujo disperso.

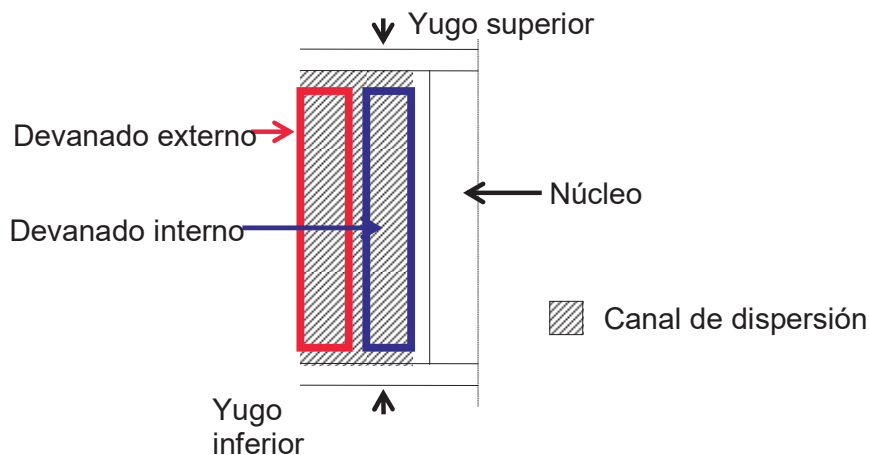


Figura 3.10 Canal de dispersión.

Este flujo disperso lo podemos situar como un canal de dispersión, como el de la figura 3.10, en donde tal canal es la trayectoria de dispersión del flujo magnético que incluye los devanados y su espacio inmediato, como observamos en la figura de arriba, así de acuerdo a su construcción y forma de los transformados dependerá el espacio al cual se confinará el flujo de dispersión.

Así al poder medir el área que comprende el canal de dispersión, podemos detectar deformaciones en los devanados, ya que al presentarse una deformación cambia la reluctancia de la trayectoria del flujo magnético, resultando en un cambio en la reactancia de dispersión. Por otra parte, la reactancia de dispersión realiza una misión estimable, porque limita la corriente de corto circuito, lo cual no solo protege al propio transformador contra su destrucción durante el tiempo necesario para que funcionen los dispositivos de protección, si no que aminora también el servicio de ruptura de los disyuntores y la perturbación de tensión en el resto del sistema.

Por consiguiente, en la práctica no se construyen transformadores con la menor reactancia posible, sino que, tienen que tener la reactancia suficiente para limitar la corriente de cortocircuito que va de 7 a 25 veces la corriente de plena carga, conforme a las condiciones de servicio.

3.3.1 Análisis de la Reactancia de Dispersión.

Siempre que una tensión es inducida en el devanado de un transformador por cambio de flujo, esa tensión inducida se atrasa al flujo exactamente 90° eléctricos. Además que el flujo y la corriente están en fase uno del otro, lo que significa que la tensión inducida se retrasa con respecto a la corriente (la cual crea el flujo) 90° eléctricos, la razón para esta relación puede ser entendida por el estudio de la figura 3.11.

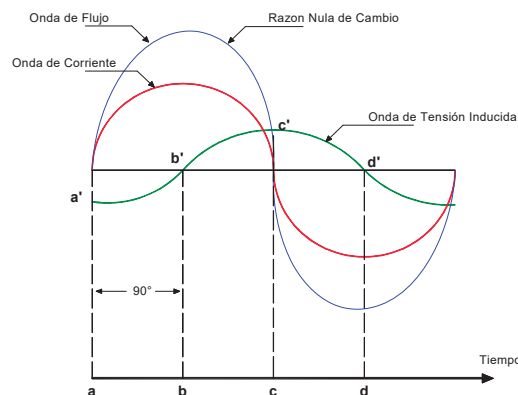


Figura 3.11 Análisis de la reactancia de dispersión.

Se supone que una onda senoidal de corriente primaria que excita al transformador está en fase con una onda senoidal del flujo. En donde en un tiempo (a) el flujo es cero y es incrementado a un valor máximo en una dirección positiva. Por eso la tensión inducida en la bobina puede ser máxima y puede por la ley de Lenz, estar en una dirección negativa, así que se opondrá a un incremento en flujo; en el punto (a') sobre la onda de tensión representa la fem inducida en la bobina en el instante de tiempo (a). En el tiempo (b) la relación de cambio de flujo es cero, bajo esta condición la fem inducida será cero; en el punto (b') sobre la onda de tensión representa la tensión en el punto (b).

En el tiempo (c) el flujo es nuevamente cero y se incrementa a un valor máximo, pero en dirección negativa, en este instante la tensión inducida en la bobina será máxima, pero también por la ley de Lenz en una dirección positiva; el punto (c') sobre la onda de tensión representa la tensión del tiempo (c). Finalmente en el tiempo (d) el valor del cambio del flujo es de nuevo máximo, nuevamente la fem inducida será cero; en el punto (d') sobre la onda de tensión representara la tensión del tiempo (d).

Asumiendo en seguida que la corriente secundaria crea un flujo de dispersión, luego entonces, un flujo que está en fase con la corriente y se eslabona en sus propias vueltas pero no con el devanado primario. Puesto que este flujo esta variando senoidalmente, se inducirá una tensión senoidal, entonces, como se explicó anteriormente, esta tensión, atrasará al flujo de dispersión que lo crea por 90° eléctricos; este valor efectivo por lo tanto reaccionará con una segunda fem inducida e intentará cambiar la tensión.

En otras palabras en el devanado secundario, la base de la salida de potencia del transformador, debe desarrollar una fem inducida que no solamente alimentará una terminal de tensión de V_2 para la carga, sino además, debe cuidarse de dos caídas de tensión internas, nombradas, caídas de tensión de la resistencia –la caída I_2R_2 - y, la caída de tensión provocada por la reactancia de dispersión –la caída I_2X_2 - que resulta de la presencia del flujo de dispersión.

3.4 Circuito Equivalente del Transformador.

Es posible construir un circuito equivalente que tenga en cuenta todas las imperfecciones principales de los transformadores reales, por lo que cada imperfección principal se considera a su turno y su efecto se incluye en el modelo del transformador. Para obtener un circuito que sea capaz de dar una predicción precisa del comportamiento del transformador bajo la mayoría de las condiciones operativas, es preciso hacer las siguientes consideraciones:

- 1.- Los campos eléctricos producidos por los devanados son despreciables.
- 2.- Las resistencias de los devanados se pueden representar por parámetros concentrados en las terminales de los devanados.
- 3.- El flujo producido por la fuerza magnetomotriz de un devanado puede ser dividido en dos partes distintas.
 - a) El flujo disperso enlaza a todas las espiras del devanado que produce la fuerza magnetomotriz, pero a ninguna de las espiras del otro devanado.
 - b) El flujo mutuo enlaza todas las espiras de ambos devanados.
- 4.- La permeabilidad del núcleo es constante.
- 5.- Las pérdidas en el núcleo son despreciables.

Así cuando tomamos en consideración las condiciones (1) y (5), son idénticas a las consideraciones hechas cuando derivamos el modelo del transformador ideal. Las consideraciones de las condiciones (2) y (3) se ilustran en la figura 3.12, donde el sistema magnético en el centro del diagrama representa al transformador separado de su resistencia de devanados, el sistema magnético es por lo tanto una representación pictórica de un transformador real. Los flujos de fuga producidos por los dos devanados se dan por los

símbolos Φ_{l1} y Φ_{l2} , donde sus direcciones van de acuerdo a la regla de la mano derecha con las direcciones de I_1 e I_2 , el flujo mutuo enlaza ambos devanados y es producido por la fuerza magnetomotriz, entonces si la reluctancia del núcleo es $\mathcal{R}_m$, el flujo mutuo es;

$$\Phi_m = \frac{N_1 I_1 - N_2 I_2}{\mathcal{R}_m} \quad \text{Ec. (3.1)}$$

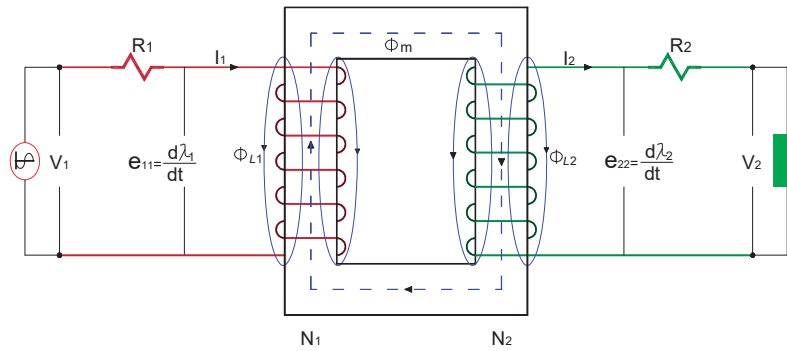


Figura 3.12 Circuito resultante al considerar las condiciones 2 y 3.

Las consecuencias de las consideraciones (4) y (5) se ilustran en la siguiente figura 3.13, donde se representa un modelo del ciclo B-H del material del núcleo o de manera alterna, el lazo Φ - I para el núcleo de uno de los devanados, puesto que las pérdidas del núcleo son consideradas cero, el lazo tiene un área cero, y puesto que la permeabilidad se considera constante, existe una relación lineal entre (Φ) e (I), y es de esta consideración lineal que toma el nombre de circuito lineal equivalente.

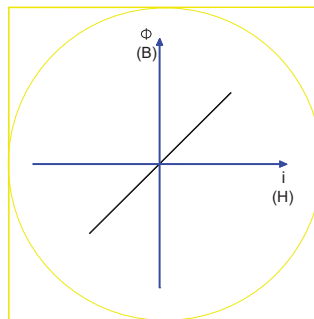


Figura 3.13 Consecuencia de las consideraciones 4 y 5.

La porción de flujo que va a través de la bobina primaria del transformador, se divide en dos componentes; un flujo mutuo, que permanece en el núcleo y conecta las dos bobinas y un pequeño flujo de dispersión, que pasa a través de la bobina primaria pero regresa a través del aire, desviándose de la bobina secundaria;

$$\Phi_1 = \Phi_{L1} + \Phi_m \quad \text{Ec. (3.2)}$$

De forma similar del flujo en la bobina secundaria del transformador, se divide entre el flujo mutuo y flujo de dispersión que pasa a través de la bobina secundaria pero regresa a través del aire, desviándose de la bobina primaria;

$$\Phi_2 = \Phi_{L2} + \Phi_m \quad \text{Ec. (3.3)}$$

Ya que las líneas de flujo magnético forman un anillo ellas mismas, con el cual logran un encadenamiento con el circuito eléctrico. Y si cada vuelta de un embobinado de N-vueltas es encadenada por el mismo valor de flujo Φ , el flujo encadenado (en weber_vueltas) es;

$$\lambda_1 = N_1 \cdot \Phi_1 \quad \text{Ec. (3.4)} \quad , \quad \lambda_2 = N_2 \cdot \Phi_2 \quad \text{Ec. (3.5)}$$

Tales circuitos almacenan energía debido a un cambio en el flujo magnético y por lo que al encadenar al circuito eléctrico, se induce una fem en ese circuito, lo cual se puede expresar por la ley de Lenz como;

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Ec. (3.6)}$$

La polaridad del voltaje inducido es tal que producirá una corriente, si el circuito fuera cerrado, en una dirección tal que se opondría a cualquier cambio de flujo. Además para conducir una corriente a través de un embobinado que encadena un flujo magnético, es necesario aplicar un voltaje;

$$V_1 = R_1 I_1 + e_{11} = R_1 I_1 + \frac{d\lambda_1}{dt} \quad \text{Ec. (3.7)}$$

$$V_2 = R_2 I_2 + e_{22} = R_2 I_2 + \frac{d\lambda_2}{dt} \quad \text{Ec. (3.8)}$$

Donde R es la resistencia del embobinado.

De las ecuaciones anteriores, las fem inducida en los devanados se puede también expresar de la siguiente forma;

$$e_{11} = \frac{d\lambda_1}{dt} = N_1 \frac{d\Phi_{11}}{dt} + N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad \text{Ec. (3.9)}$$

$$e_{22} = \frac{d\lambda_2}{dt} = -N_2 \frac{d\Phi_{22}}{dt} + N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad \text{Ec. (3.10)}$$

Si el encadenamiento de flujo en un circuito lineal magnético se debe solo a su propia corriente (I), entonces tenemos que;

$$V = RI + L \frac{di}{dt} \quad \text{Ec. (3.11)}$$

Donde L es la inductancia propia en Henrios, por lo que fem de la inducción propia en la bobina del transformador es;

$$e = L \frac{di}{dt} = \frac{d\lambda}{dt} \quad \text{Ec. (3.12)}$$

y en consecuente,

$$L_{L1} = \frac{N_1 \Phi_{L1}}{I_1} \quad \text{Ec. (3.13)} \quad , \quad L_{L2} = \frac{N_2 \Phi_{L2}}{I_2} \quad \text{Ec. (3.14)}$$

Por lo que las fem inducidas en los devanados por el flujo mutuo es designado por;

$$e_1 = N_1 \frac{d\Phi_m}{dt}$$

Ec. (3.15) ,

$$e_2 = N_2 \frac{d\Phi_m}{dt}$$

Ec. (3.16)

Sustituyendo podemos obtener las ecuaciones de circuitos acoplados, que expresan la relación entre los voltajes y las corrientes en dos o más circuitos acoplados inductiva o magnéticamente, en términos de resistencia e inductancia. Las ecuaciones para dos circuitos acoplados inductivamente son;

$$V_1 = R_1 I_1 + L_{L1} \frac{di_1}{dt} + e_1$$

Ec. (3.17)

$$V_2 = -R_2 I_2 - L_{L2} \frac{di_2}{dt} + e_2$$

Ec. (3.18)

Aun cuando estas ecuaciones se aplican estrictamente solo a circuitos lineales, tal como transformadores de núcleo de aire, proporcionan una base para clarificar el concepto de inductancia de dispersión en transformadores con núcleo de hierro, ya que en transformadores de núcleo de hierro las inductancias de dispersión, son prácticamente independientes de variaciones normales en la saturación del núcleo, debido a que las trayectorias del flujo de dispersión están principalmente en el aire.

Las dos últimas relaciones puestas anteriormente se ilustran en la figura 3.14, en donde el sistema magnético en el centro del diagrama representa al transformador separado de sus propiedades de resistencia del devanado y de la inductancia de dispersión del devanado.

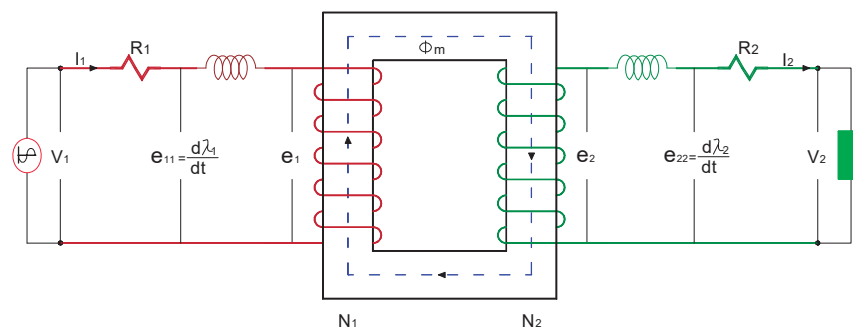


Figura 3.14 Introducción de las reactancias de fuga.

De acuerdo a lo anterior;

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{Ec. (3.19)}$$

Estas fem están en la misma relación que la diferencia de potencial en las terminales de un transformador ideal con vueltas N_1 y N_2 . Se puede considerar como diferencias de potencial en las terminales del transformador en la figura anterior. Este transformador no es ideal, ya que la fem neta que actúa en el núcleo no es cero, esto debido a que la permeabilidad del núcleo no es infinita.

Si I'_m es la corriente que se requiere en el devanado N_1 solamente para producir un flujo mutuo Φ_m , la cual puede ser llamada corriente de magnetización referida al devanado N_1 , entonces;

$$N_1 I'_m = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad \text{Ec. (3.20)}$$

Del cual despejando tenemos que;

$$I_1 = I'_m + \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 \quad \text{Ec. (3.21)}$$

Puesto que I'_m que produce un flujo, debe fluir en un circuito inductivo. Tal circuito se puede mostrar en la siguiente figura 3.15. Además el requerimiento de que una fem resultante en el núcleo de un transformador ideal deba ser cero se cumple, por lo que;

$$N_1 \left[\frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 \right] - N_2 I_2 = 0 \quad \text{Ec. (3.22)}$$

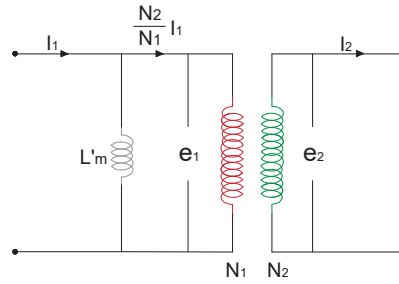


Figura 3.15 Circuito descrito por las ecuaciones 3.19 y 3.21 .

La inductancia en el circuito anterior puede ser definida como;

$$L'_m = \frac{N_1 \Phi_m}{I'_m} = \frac{(N_1)^2}{\mathfrak{R}_m} \quad \text{Ec. (3.23)}$$

La cual es la inductancia de magnetización del transformador referida al devanado primario N_1 . A hora bien el circuito equivalente completo puede mostrarse en la figura 3.16.

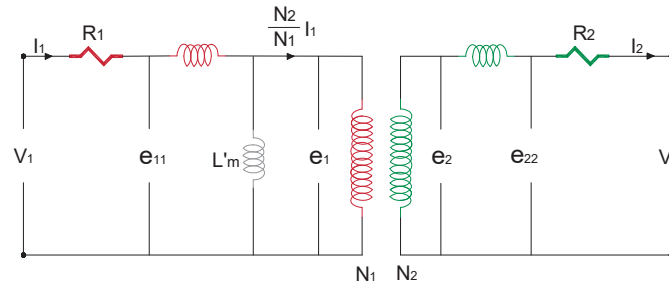


Figura 3.16 Circuito lineal equivalente de un transformador.

De la misma forma que para el devanado N_1 , se considera que la corriente de magnetización I''_m fluye solamente en el devanado N_2 , entonces se deberá obtener la inductancia L''_m definida por la ecuación;

$$L''_m = \frac{N_2 \Phi_m}{I''_m} = \frac{(N_2)^2}{\mathfrak{R}_m} \quad \text{Ec. (3.24)}$$

Partiendo de las consideraciones hechas con anterioridad podemos obtener;

$$N_1 I'_m = N_2 I''_m \quad \text{Ec. (3.25)}$$

Obteniendo así;

$$\frac{L'_m}{L''_m} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad \text{Ec. (3.26)}$$

Entonces, L''_m es la inductancia de magnetización L'_m referida al devanado N_2 .

Para simplificar aún más la interpretación del circuito equivalente anterior, en la figura 3.17 se muestra un modelo equivalente simplificado del transformador, en donde X_m y X , son las reactancias de magnetización y reactancia de fuga respectivamente, ya que la resistencia del devanado es insignificante y se puede despreciar.

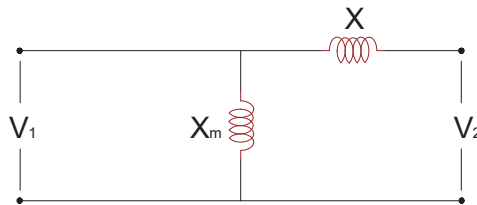


Figura 3.17 Circuito equivalente del transformador simplificado.

De esta forma ya con un circuito equivalente simplificado podemos hacer pruebas para poder medir la reactancia de corto circuito, método el cual se tratará a detalle en el capítulo siguiente.

Capítulo 4.

Método Utilizado para la Medición.

4.1 Introducción.

¿Qué se puede hacer para prevenir las fallas en los transformadores?

En realidad, no es posible eliminar todas las fallas, pero sí puede reducirse ampliamente el número de sucesos y fallas inesperadas. La clave es la detección del deterioramiento antes que el daño sea progresivo y lleve a una falla máxima. Y, como hemos visto, es improbable detectar a simple vista las fallas en transformadores, por lo que el único camino para detectar problemas incipientes es hacer pruebas.

La prueba de reactancia de dispersión, es una prueba indicativa para detectar deformación o distorsión de los devanados y sus sistemas de sujeción en un transformador. Esta prueba está influenciada por el canal de dispersión y como se mencionó anteriormente puede detectar deformación o distorsión en devanados debido a:

- Impactos y movimientos severos durante su transporte o maniobra.
- Esfuerzos mecánicos por fallas externas de cortocircuito soportadas por el transformador.
- Defectos derivados del diseño, fabricación o reparación del transformador.

Generalmente la mayoría de las fallas de transformadores se inician como problemas mecánicos y eventualmente ocurren directamente por razones eléctricas. Cuando se presentan fallas de cortocircuito externas, el transformador puede sufrir modificaciones en su geometría física y permanecer en servicio con los devanados y/o los sistemas de sujeción

parcialmente distorsionados, reduciéndose la confiabilidad y la vida útil del transformador.

Dentro de las pruebas de mantenimiento al transformador, se recomienda realizar esta prueba, ya que cambios en el parámetro de Reactancia son un indicador confiable para determinar una posible distorsión de los devanados. Además con el ensayo a transformadores se tiende a evitar en lo posible las pruebas directas con carga efectiva, por la dificultad que presenta el disponer de elementos capaces de absorber la potencia normal del transformador.

Las características en carga se deducen de los ensayos en vacío y en cortocircuito, mediante la aplicación posterior de las teorías que relacionan estos valores con los de servicio normal. Los ensayos no requieren más potencia que la de pérdidas consiguientes. Algunos de los ensayos que hay son:

Medida de la resistencia de los arrollamientos.

Este ensayo permite medir la resistencia óhmica de los arrollamientos de un transformador, y este valor es aplicable al cálculo de las pérdidas óhmicas.

Ensayo en vacío.

Este ensayo permite determinar la relación de transformación, la corriente de vacío y las pérdidas en el hierro del transformador.

Ensayo en cortocircuito.

Este ensayo permite determinar las pérdidas en el cobre y la tensión de cortocircuito.

Un método conveniente para medir la reactancia de corto circuito de un transformador es el método volmetro_amperímetro, este método es aplicable ya sea para probar transformadores monofásicos o trifásicos, ya que solo es necesario una fuente de poder para inyectar corriente a través de la impedancia. La corriente y la tensión en la impedancia se miden simultáneamente, la impedancia es entonces dada por la razón de la tensión y la corriente.

4.2 Prueba en corto circuito.

Se efectúa poniendo uno de los dos bobinados con corto circuito, alimentando el otro con una tensión regulable desde cero, hasta alcanzar el valor de la corriente nominal del bobinado mismo. La tensión que se exige con tal fin puede ser del orden del 4 al 10% del voltaje nominal (V_n) del bobinado donde se efectúa la alimentación, tal tensión es definida tensión de corto circuito del transformador. En esta prueba, la entera potencia absorbida corresponde solo a las pérdidas del cobre de los dos bobinados, ya que dada la baja tensión aplicada (en la prueba con corto circuito del transformador), la corriente magnetizante, el flujo en el núcleo y las consecuentes pérdidas resultan despreciables. En tales condiciones se determina la resistencia equivalente del transformador.

A su vez, se podrán entonces determinar las variaciones de la tensión secundaria que se verifican en el paso de vacío a carga del transformador mismo. También en esa prueba es indiferente alimentar el bobinado primario o secundario. En el acto práctico es necesario tener presente que es oportuno que las corrientes en juego alcancen el valor nominal de plena carga tanto en el lado del bobinado de alimentación y en el otro cerrado con corto circuito. El primer valor servirá para la elección de los instrumentos, mientras el segundo para la elección de la sección de los cables para usarse en las conexiones con corto circuito. En la figura 4.1, se muestra el diagrama con la conexión para la prueba volmetro_amperímetro.

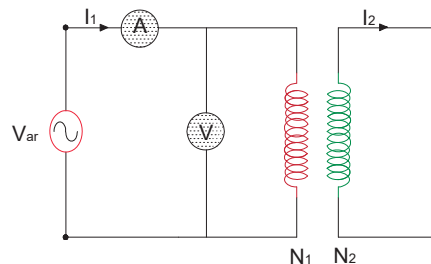


Figura 4.1 Diagrama de Prueba de Corto Circuito.

Parámetros medidos en la prueba del volmetro_amperímetro:

- Corriente de referencia y medida.
- Voltaje medido por los cables de referencia.
- Watts totales.
- Factor de potencia.

En base a los parámetros medidos podemos calcular:

$$Z = \frac{V}{I} \quad \text{Ec. (4.1)}$$

$$R = \frac{P}{I^2} = R_P + R_S + R_L \quad \text{Ec. (4.2)}$$

$$X^2 = Z^2 - R^2 \quad \text{Ec. (4.3)}$$

4.3 Medición de Impedancia en un Transformador de dos Devanados.

En un transformador de dos devanados, generalmente se cortocircuita el devanado de baja tensión, aplicando tensión a la frecuencia nominal al otro devanado. La tensión nominal se ajusta para que circule una corriente en el orden de .5 – 1 % de la corriente nominal del devanado ó 2 – 10 Amp., dependiendo de la capacidad del transformador.

La impedancia %Z de un transformador monofásico se puede calcular usando la siguiente fórmula:

$$\%Z = \frac{E_m(kVAr)}{10 \cdot I_m(kVr)^2} \quad \text{Ec. (4.4)}$$

Donde;

E_m : es la tensión media.

I_m : es la corriente.

$KvAr$: es la capacidad nominal del transformador en kilovoltamperes.

kV_r : es la tensión nominal del devanado en kilovolts.

4.4 Medición de Impedancia en un Transformador Trifásico de dos Devanados.

En un transformador trifásico se puede hacer la prueba de impedancia utilizando una fuente monofásica sin importar la conexión de sus devanados. Las terminales del neutro, si es que hay, no se utilizan. La prueba se realiza cortocircuitando las terminales de línea del devanado de baja tensión y aplicando una tensión monofásica a la frecuencia nominal a dos terminales del otro devanado. Se toman tres lecturas sucesivas en los tres pares de terminales, por ejemplo H_1 y H_2 , H_2 y H_3 , H_3 y H_1 , con la corriente de prueba ajustada al mismo nivel para cada lectura. Entonces el $\%Z$ del transformador trifásico es dado por:

$$\%Z = \frac{1}{6} \cdot \left[\frac{E_{12} + E_{23} + E_{31}}{I_m} \right] \cdot \left[\frac{kVA_{3r}}{kV_{1r}} \right] \quad \text{Ec. (4.5)}$$

Donde;

E_{12} , E_{23} , E_{31} : son las tensiones de pruebas medidas.

I_m : es la corriente.

kVA_{3r} : es la potencia nominal trifásica en KVAs.

kV_{1r} : es la tensión línea a línea del devanado energizado.

4.5 Medición de Impedancia en un Transformador de tres Devanados.

Para un transformador de tres devanados, el cual puede ser monofásico o trifásico, puede probarse su impedancia, haciendo mediciones de dos devanados con cada par de devanados, el cual da tres mediciones de impedancia diferentes siguiendo el mismo procedimiento como el utilizado para un transformador de dos devanados. La impedancia individual equivalente de los devanados separados, puede entonces ser determinado utilizando las siguientes expresiones:

$$Z_2 = \frac{Z_{23} - Z_{31} + Z_{12}}{2} \quad \text{Ec. (4.6)}$$

$$Z_2 = \frac{Z_{23} - Z_{31} + Z_{12}}{2} \quad \text{Ec. (4.7)}$$

$$Z_3 = \frac{Z_{31} - Z_{12} + Z_{23}}{2} \quad \text{Ec. (4.8)}$$

Donde Z_{12} , Z_{23} , Z_{31} son los valores de impedancia medidos entre los pares de terminales de los devanados, todos expresados en los mismos KVA base.

4.6 Recomendaciones para Realizar la Prueba de Reactancia de Dispersión.

- a) Desconectar los neutros de los devanados del sistema de tierra.
- b) Colocar puentes entre las terminales de las boquillas del devanado: secundario o terciario, si éste es el caso.
- c) Conectar adecuadamente las terminales de prueba al transformador que se va a probar, y comprobar antes de encender el medidor.
- d) Si se debe realizar la prueba en el equivalente trifásico. En caso de obtenerse valores anormales, la prueba debe realizarse por cada una de las fases.
- e) Para todos los transformadores nuevos o reparados se debe realizar la prueba en todas las posiciones del cambiador de derivaciones. Para los equipos que se encuentran en servicio se hace únicamente en el TAP de operación.
- f) Contar con la información necesaria para la realización e interpretación de la prueba, como es:

- % de Impedancia dada por el fabricante.
- La capacidad base a que se encuentra referida esta impedancia, (en KVA, MVA, etc.).
- El voltaje base de línea a línea para el TAP de prueba, (en KV).
- Antecedentes de pruebas (si existen).

g) Seleccionar un voltaje adecuado que permita la medición con exactitud.

h) Medir simultáneamente la corriente y la tensión, siendo la impedancia la razón de la tensión y la corriente medidas.

Existen equipos que hacen las mediciones automáticamente, que disponen de un módulo de medición de Reactancia de Dispersión.

4.7 Equipos para Realizar la Prueba de Reactancia de Dispersión.

Se consideran pruebas eléctricas, aquellas que determinan las condiciones en que se encuentra el equipo eléctrico, para determinar su operatividad.

Son la base para verificar y apoyar los criterios de aceptación o para analizar los efectos, cuando sucedan cambios o variaciones, con respecto a los valores iniciales de puesta en servicio o de la última prueba.

Para realizar la prueba de la reactancia de dispersión existen varios equipos, a continuación se describen las particularidades de algunos equipos disponibles en el mercado:

- *Equipo M4000 con módulo M4110.*

El equipo M4000 requiere adicionalmente del módulo 4110 para realizar la prueba. El módulo de Reactancia de dispersión M4110 proporciona una corriente máxima de prueba, de 25 amperes durante 3 a 5 minutos antes de disparar el interruptor de salida.



Figura 4.2 Equipo doble M4110.

El rango máximo continuo de la corriente de operación es de 9.5 amperes. El módulo está equipado con un circuito de protección térmico, el cual evita que se tenga salida de potencia cuando la temperatura del autotransformador o variac ha excedido el límite de operación segura. La luz roja al encenderse indica una sobrecarga. Una vez que se han cargado los datos de placa del transformador y la información inicial de prueba, el M4000 calcula y sugiere la corriente de prueba.

- *Equipo M4000 con módulo M4130.*

El equipo M4000 requiere adicionalmente del módulo M4130 y de un variac externo para realizar la prueba. El módulo de Reactancia de dispersión M4130 proporciona una corriente de prueba, de magnitud dependiente de la capacidad del variac externo. La protección de sobrecarga debe estar asociada al variac externo. Una vez que se ha proporcionado la información el M4000 calcula y sugiere la corriente de prueba.

A continuación se muestran las conexiones para realizar la prueba con el medidor del módulo 4110, las figuras 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6 muestran de manera resumida, la metodología de conexión para la realización de las pruebas tanto por fase como del equivalente trifásico respectivamente, además también se muestran las conexiones de prueba para transformadores de dos devanados con diversas conexiones en las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 respectivamente, y para autotransformadores se muestran en las figuras de la 4.7 y la tabla 4.5.

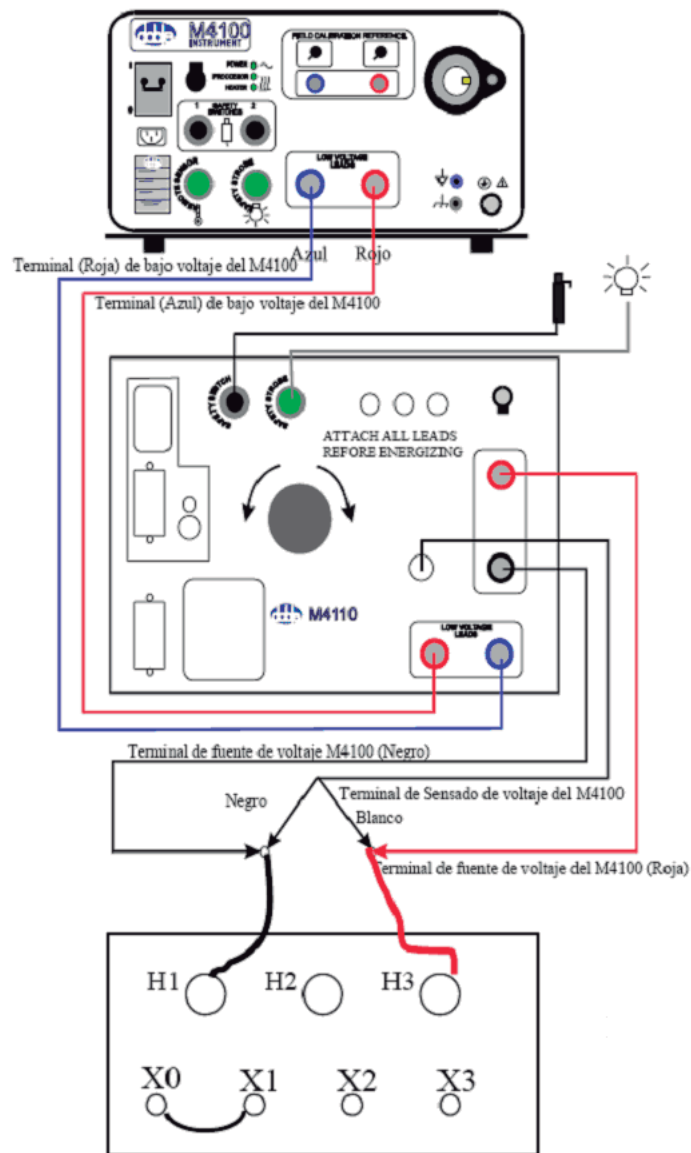


Figura 4.3 Transformador de dos devanados, conexión de la prueba 1, para Delta-Estrella.

<i>Prueba</i>	<i>Negro/Negro</i>	<i>Rojo/Blanco</i>	<i>Conex. en Baja</i>	<i>Mide</i>
1	H1	H3	X1-X0	Z1
2	H2	H1	X2-X0	Z2
3	H2	H3	X3-X0	Z3
4	H1	H2	X1-X2-X3	Z _{3Φ}

Tabla 4.1 Conexión para Delta-Estrella.

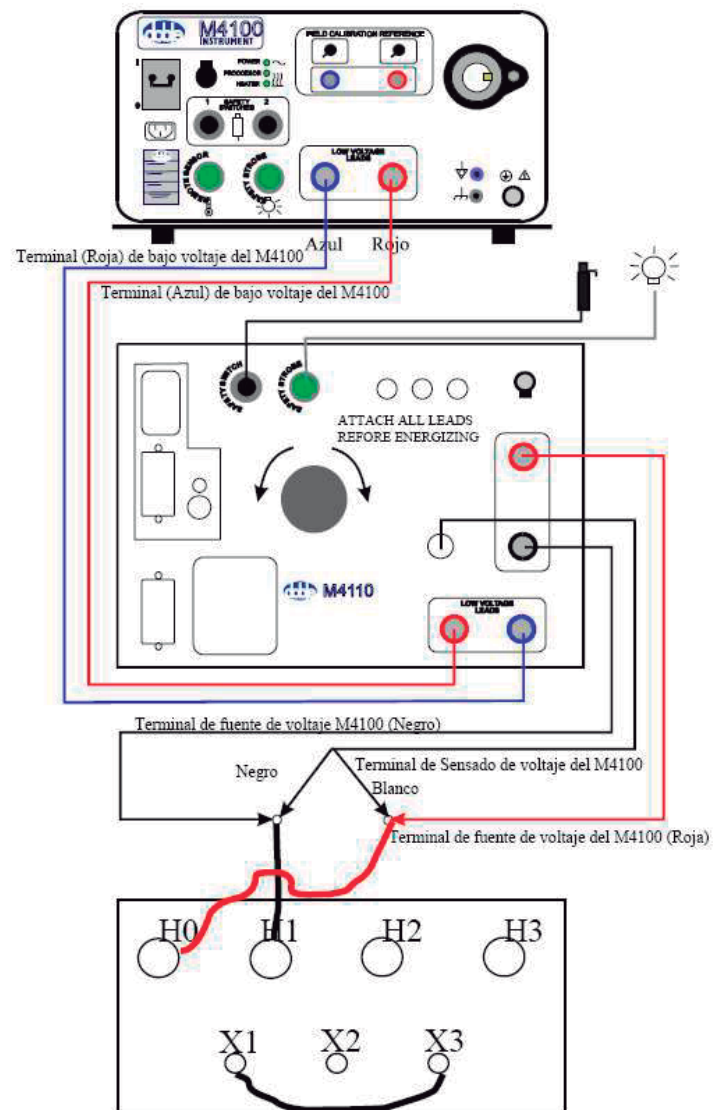


Figura 4.4 Transformador de dos devanados, conexión de la prueba 1, para Estrella-Delta.

<i>Prueba</i>	<i>Negro/Negro</i>	<i>Rojo/Blanco</i>	<i>Conex. en Baja</i>	<i>Mide</i>
1	H1	H0	X1-X3	Z1
2	H2	H0	X2-X1	Z2
3	H2	H0	X3-X2	Z3
4	H1	H2	X1-X2-X3	Z _{3Φ}

Tabla 4.2 Conexión para Estrella-Delta.

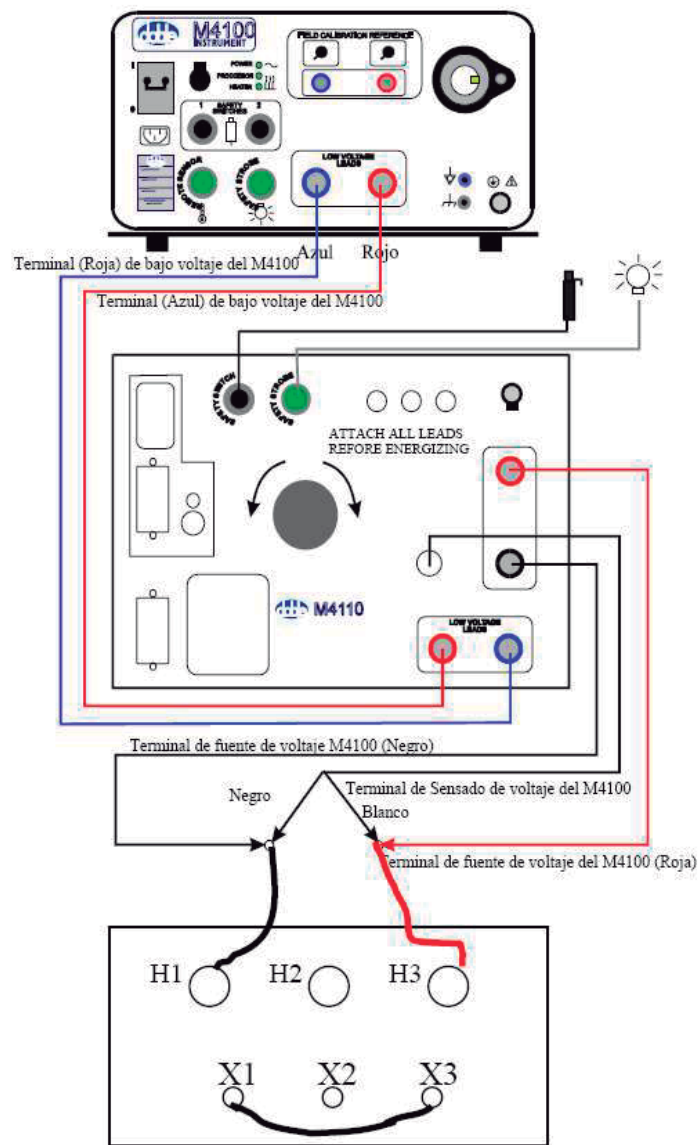


Figura 4.5 Transformador de dos devanados, conexión de la prueba 1, para Delta-Delta.

<i>Prueba</i>	<i>Negro/Negro</i>	<i>Rojo/Blanco</i>	<i>Conex. en Baja</i>	<i>Mide</i>
1	H1	H3	X1-X3	Z1
2	H2	H1	X2-X1	Z2
3	H2	H3	X3-X2	Z3
4	H1-H2-H3	H1-H2-H3	X1-X2-X3	Z _{3Φ}

Tabla 4.3 Conexión para Delta-Delta.

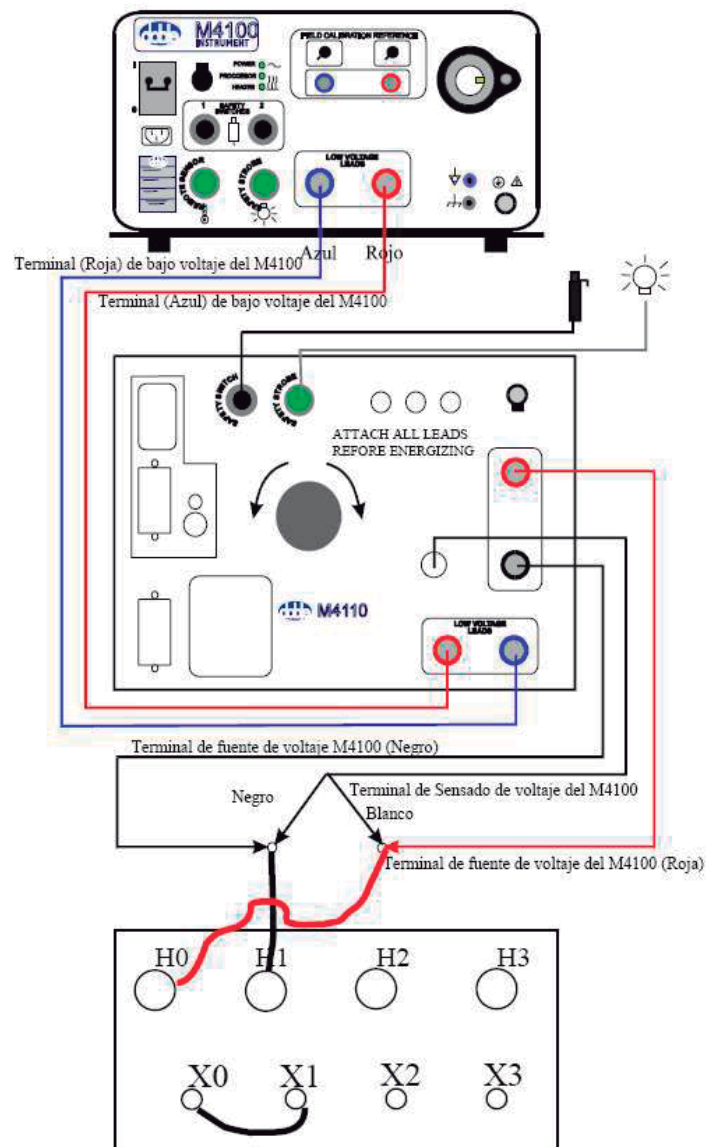


Figura 4.6 Transformador de dos devanados, conexión de la prueba 1, para Estrella-Estrella.

<i>Prueba</i>	<i>Negro/Negro</i>	<i>Rojo/Blanco</i>	<i>Conex. en Baja</i>	<i>Mide</i>
1	H1	H0	X1-X0	Z1
2	H2	H0	X2-X0	Z2
3	H3	H0	X3-X0	Z3
4	H1	H2	X1-X2-X3	Z _{3Φ}

Tabla 4.4 Conexión para Estrella-Estrella.

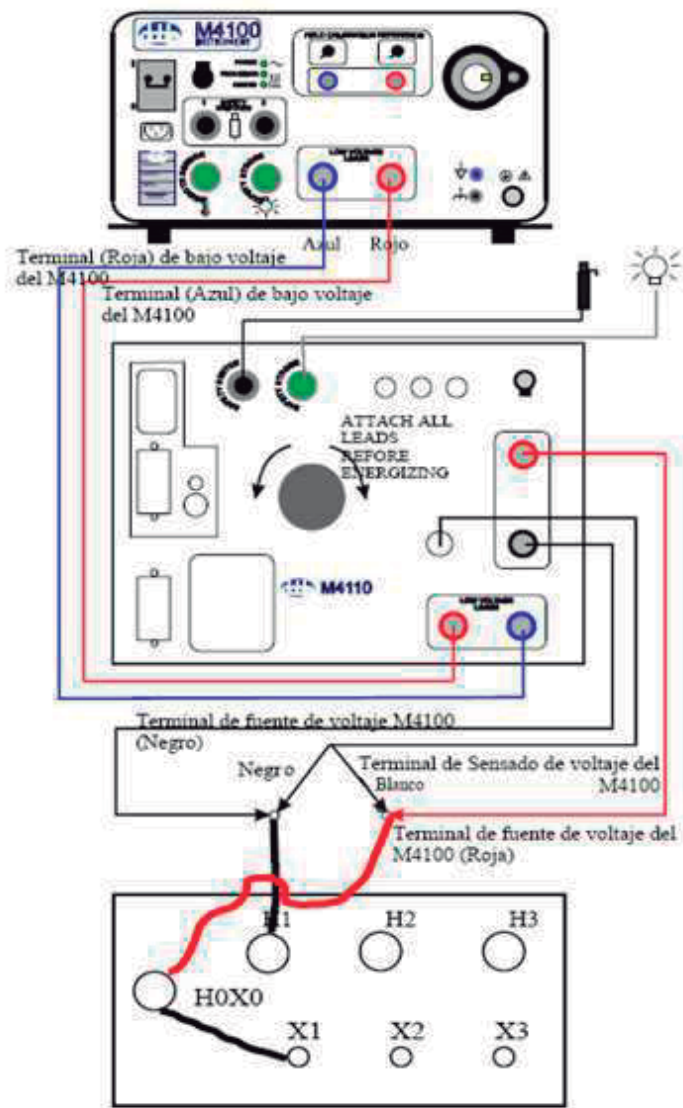


Figura 4.7 Auto transformador, conexión para la prueba 1.

<i>Prueba</i>	<i>Negro/Negro</i>	<i>Rojo/Blanco</i>	<i>Conex. en Baja</i>	<i>Mide</i>
1	H1	H0	X1-X0	Z1
2	H2	H0	X2-X0	Z2
3	H3	H0	X3-X0	Z3
4	H1	H2	X1-X2-X3	Z _{3Φ}

Tabla 4.5 Conexión para Autotransformadores.

<i>Prueba</i>	<i>Negro/Negro</i>	<i>Rojo/Blanco</i>	<i>Conex. en Baja</i>	<i>Mide</i>
1	H1	H0-X0	X1-H0-X0	Z1
2	H2	H0-X0	X2-H0-X0	Z2
3	H3	H0-X0	X3-H0-X0	Z3
4	H1	H2	X1-X2-X3	Z _{3Φ}

Tabla 4.6 Conexión para Autotransformadores.

- *Equipo ETP-4 con módulo UM5B.*

El equipo ETP-4 requiere adicionalmente del módulo UM5B para realizar la prueba. El módulo UM5B puede proporcionar tensiones hasta de 250 volts durante las pruebas. Una vez que se ha proporcionado la información de los datos de placa del transformador y la información inicial de prueba, el ETP-4 determina y aplica la corriente y voltaje de prueba de manera automática a través del módulo UM5B.



Figura 4.8 Medidor de impedancia de dispersión ETP-4

La unidad de medida ETP-4 unidad de ensayo para transformadores, es un equipo que realiza de forma automática las siguientes medidas, en todos los tipos de transformadores de potencia, distribución, o medida, calculándolo según la conexión:

- Medida de Impedancia de Dispersión.
- Corriente de cortocircuito referida a la tensión de prueba.
- Potencias de pérdidas en cortocircuito.

La tensión de prueba se inyecta a través de un variac motorizado, esto garantiza la repetitividad en el modo de aplicación en sucesivos ensayos, además de evitar riesgos debidos a transitorios bruscos. De los resultados se obtiene información sobre la integridad física del transformador en su conjunto. Los posibles problemas que detecta son:

- Desplazamientos físicos entre bobinados, los cuáles pueden haberse producido por esfuerzos electromagnéticos.
- Problemas en el paquete magnético.
- Daños en el transporte.
- Roturas de elementos de fijación.

Obtiene las componentes del triángulo de impedancia en cortocircuito. A partir de los cuáles y por su evolución en el tiempo, se puede determinar que parte del transformador se está deteriorando.

Confirma problemas incipientes, de los cuáles ya se sospechaba su existencia, al contrastar los resultados con los datos obtenidos por otras unidades del sistema ETP. Estos problemas se pueden corroborar con otras medidas tomadas por el sistema ETP a otros transformadores, ya sea:

- Transformadores de Potencia (Monofásica o Trifásica)
- Transformadores de Distribución (Monofásica o Trifásica)
- Autotransformadores de Potencia (Monofásica o Trifásica)
- Transformadores de Tensión

A continuación en la figura 4.9 se muestra de manera ilustrativa la prueba de un transformador conexión Delta-Estrella con el medidor ETP, con su respectiva tabla 4.6. En razón de que este equipo indica en la pantalla de su PC asociada, las conexiones necesarias para realizar la prueba en transformadores con diferentes conexiones; no se incluyen mas figuras para otras conexiones de transformadores.

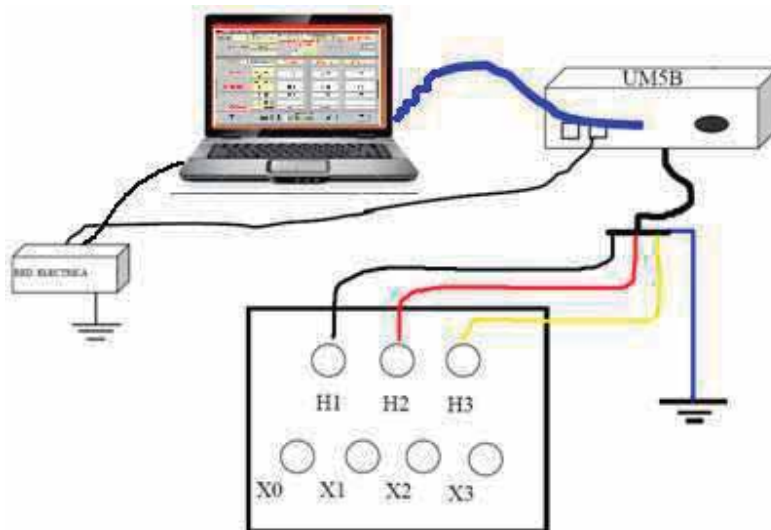


Figura 4.9 ETP-4 Conexión para transformador de dos devanados.

<i>Prueba</i>	<i>Negro</i>	<i>Rojo</i>	<i>Amarillo</i>	<i>Conex. en Baja</i>	<i>Mide</i>
1	H1	H2	H3	X0-X1	Z1
2	H1	H2	H3	X0-X2	Z2
3	H1	H2	H3	X0-X3	Z3

Tabla 4.7 Conexión para Delta-Estrella.

En seguida se muestra la representación de pantallas de resultados del sistema ETP-4, figuras 4.10, 4.11 y 4.12.

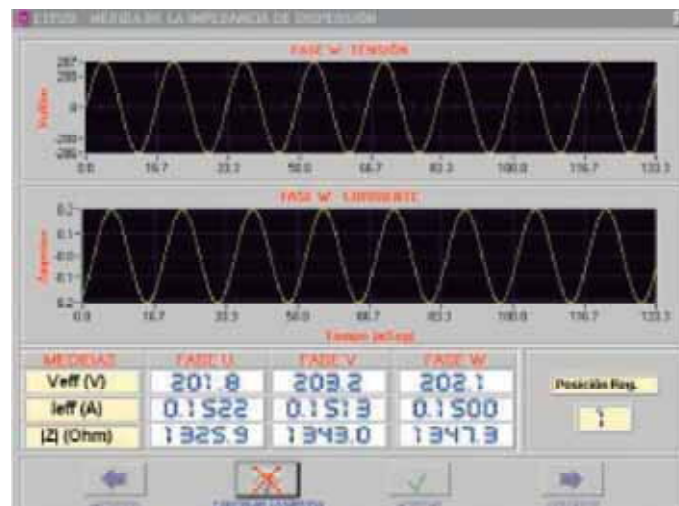


Figura 4.10 Pantalla de medida.

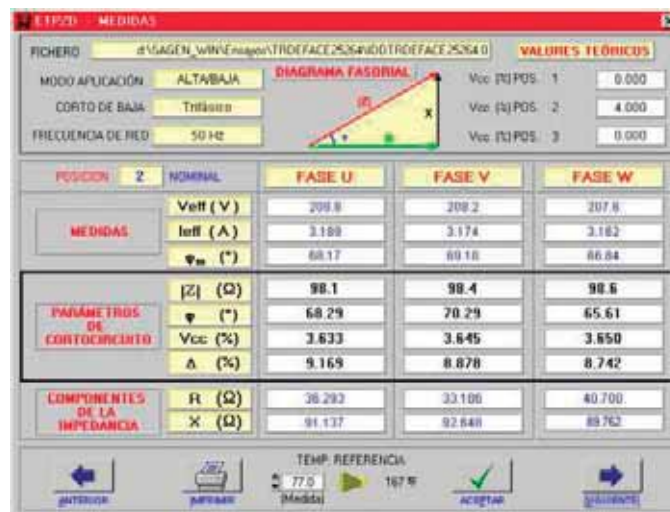


Figura 4.11 Pantalla de análisis de resultados.

ETP2D - CONFIGURACIÓN DE LA MEDIDA

FICHERO: c:\SAGEN_W\W\Ensayos\TRPUNTR2086\DDTRPUNTR2086.D

UBICACIÓN TÉCNICA: Laboratorio

REALIZADO POR: Antonio

LUGAR: UMTRONICS

FECHA: 29-07-99

Nº SERIE UM: 95000

MÁQUINA: Transformador de Potencia

FABRICANTE: UMTRONICS

FUNCIÓN: UMTRONICS

Nº DE SERIE: 30864

DATOS DE ENSAYO

Vcc PRIMERA POS. (V): 1.440

Vcc POS. NOMINAL (V): 3.770

Vcc ÚLTIMA POS. (V): 6.550

MODO APLICACIÓN: ALTA / BAJA

ALTA / BAJA: ALTA / BAJA

ALTA / BAJA: ALTA / BAJA

SELECCIONE LAS POSICIONES A MEDIR

1	8	15	22	29	CENTRALES
☒	☐	☐	☐	☐	11a
☐	☐	☐	☐	☐	11b
☐	☐	☐	☐	☐	11c
☐	☒	☐	☐	☐	11d
☐	☐	☐	☐	☐	11e
☐	☐	☐	☐	☐	11f

Botones: [Anterior] [Cancelar] [Aceptar] [Siguiente]

Figura 4.12 Pantalla de configuración de medida

El ETP-4 es un equipo completamente controlado por ordenador, y es suministrado con su software asociado. El software puede ser instalado en cualquier PC incorporando un RS 232.

Capítulo 5.

Ensayo Realizado.

5.1 Introducción.

En tiempos en que está comprometido el suministro de energía eléctrica, es imprescindible exista una rápida reposición de un transformador, luego de su salida intempestiva de servicio.

Las pruebas o ensayos realizados a transformadores proporcionan importante información sobre el estado físico del equipo, y en base a esto, se pueden determinar los servicios de mantenimiento preventivo o correctivo.

5.2 Ensayo de un Transformador Monofásico de 5kVA

Para la realización de este ensayo se requería principalmente contar con un transformador, el cual hubiera sufrido con anticipación ya alguna falla como las mencionadas en los capítulos anteriores, y además contara con un historial de pruebas, o de no ser así, contar ya con un transformador en buen estado, al cual posteriormente se le ocasionaría alguna falla, y así de esta forma cambiar sus parámetros físicos. A lo cual posteriormente se le realizaría la prueba de reactancia de dispersión con el fin de notar un cambio en el valor de su reactancia, para de esta manera confirmar, con una forma más práctica la metodología para la medición de la reactancia de dispersión y sobre lo cual se ha tratado esta tesis.

En nuestro caso se pudo contar con un transformador en buen estado, el cual fue proporcionado por el laboratorio de ingeniería eléctrica de la Universidad Michoacana, contando con las características siguientes y el cual podemos observar en las siguientes figuras 5.1, 5.2 y 5.3.

¡AVISO IMPORTANTE!

De acuerdo a lo establecido en el inciso “a” del **ACUERDO DE LICENCIA DE USO NO EXCLUSIVA** el presente documento es una versión reducida del original, que debido al volumen del archivo requirió ser adaptado; en caso de requerir la versión completa de este documento, favor de ponerse en contacto con el personal del Repositorio Institucional de Tesis Digitales, al correo dgbrepositorio@umich.mx, al teléfono 443 2 99 41 50 o acudir al segundo piso del edificio de documentación y archivo ubicado al poniente de Ciudad Universitaria en Morelia Mich.

U.M.S.N.H
DIRECCIÓN DE BIBLIOTECAS