



ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS
PROFESIONALES ARAGON - UNAM

I N G E N I E R I A

ANALISIS DE LOS EFECTOS
DE LOS TRANSITORIOS EN
TRANSFORMADORES DE POTENCIA.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

JUAN ANTONIO VILLANUEVA ORTEGA

San Juan de Aragón, Edo. de Méx., 1994

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Dedicatoria.

A mi madre, Alicia Ortega R.

A mis hermanos, Carolina y José.

A mis abuelos Donato e Irene.

A mis tías y a toda mi familia.

Juan Antonio Villanueva O.

Reconocimientos:

Quiero expresar mi agradecimiento a las siguientes personas por su ayuda durante la realización de la tesis "ANÁLISIS DE LOS EFECTOS DE LOS TRANSITORIOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA."

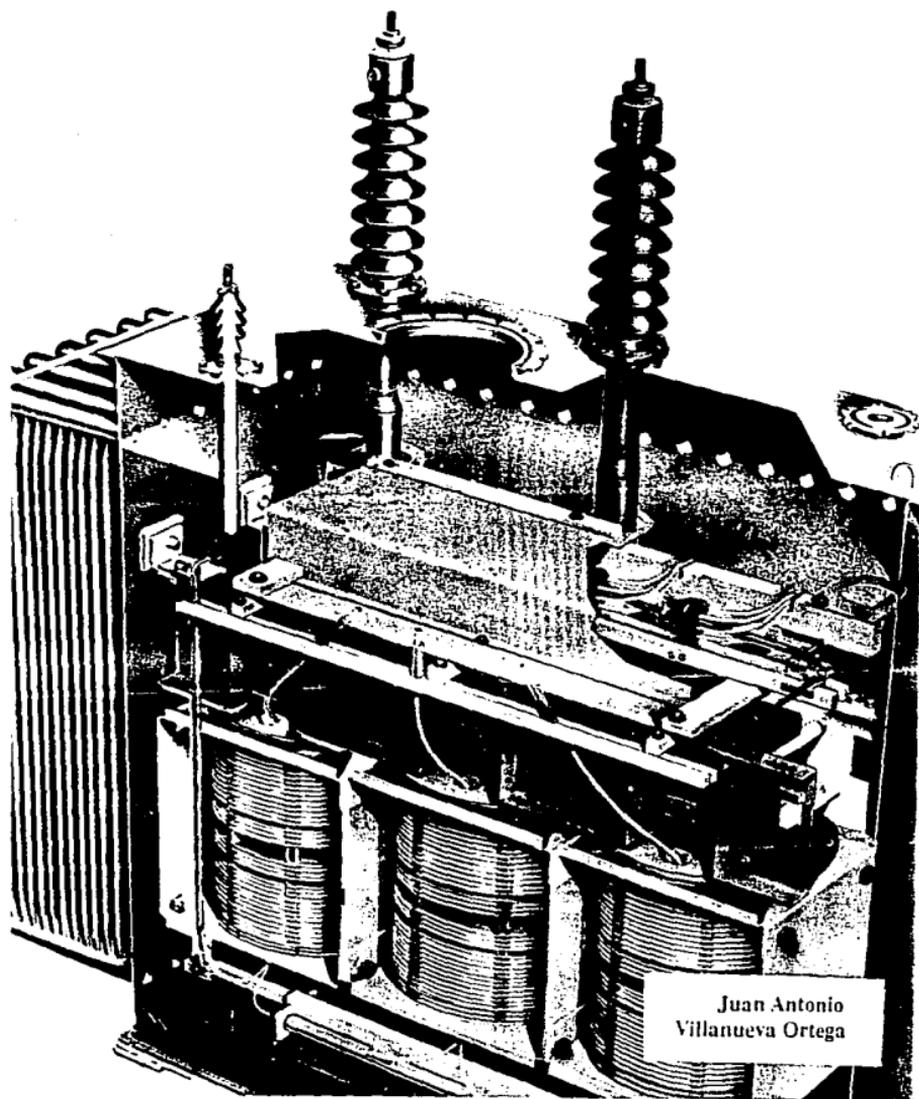
Al asesor en la Universidad Nacional Autónoma de México, Ing. Juan Mendez Moreno, quien de alguna forma logró mantener vivo su sentido del humor y la calma para controlar cuidadosamente la supervisión de este trabajo.

Al asesor por parte de la Comisión Federal de Electricidad, Ing. Carlos L. Cabrera Rueda, Jefe del Departamento de Alta Potencia del Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales de México, por el apoyo, revisión, entusiasmo y recomendaciones para la realización de esta tesis. Y por supuesto a todo el personal del Departamento de Alta Potencia, por su apoyo para realizar las pruebas.

Finalmente, muchas gracias a todos los compañeros que durante la carrera me brindaron su apoyo.

Juan Antonio Villanueva O.

ANALISIS DE LOS EFECTOS DE LOS TRANSITORIOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA



Juan Antonio
Villanueva Ortega

**ANALISIS DE LOS EFECTOS
DE LOS TRANSITORIOS EN
TRANSFORMADORES DE POTENCIA**

**Juan Antonio
Villanueva Ortega**

Contenido

Introducción	xxi
CAPITULO 1. Transformadores de potencia	1
1.1 Transformadores de potencia.	1
1.1.1 Antecedentes históricos	1
1.1.2 Finalidad de los transformadores de potencia.	2
1.1.3 Transformadores de potencia.	2
1.2 Clasificación de los transformadores.	3
1.2.1 Por su capacidad.	3
1.2.2 Por su clase de enfriamiento.	3
1.2.2.1 Sumergidos en líquido / enfriados por aire.	3
1.2.2.2 Sumergidos en líquido / enfriados por aire / enfriados por líquido forzado.	4
1.2.2.3 Sumergidos en líquido / enfriados por agua.	4
1.2.2.4 Sumergidos en líquido / enfriados por líquido forzado.	5
1.2.2.5 Tipo seco	5
1.2.3 Por su voltaje de operación.	6
1.2.4 Por la disposición del circuito magnético.	7
1.2.4.1 Transformadores de columnas.	7
1.2.4.2 Transformador acorazado.	7
1.2.5 Por la disposición de los devanados.	7

1.2.5.1	Transformador de devanados separados.	7
1.2.5.2	Transformador de devanados concéntricos.	8
1.2.5.3	Transformador de devanados doblemente concéntricos.	8
1.2.5.4	Transformador de devanados alternados	9
1.2.6	Tipos de arrollamientos	9
1.2.6.1	Arrollamiento en capas.	9
1.2.6.2	Arrollamiento en espiral.	9
1.2.6.3	Arrollamiento alterno.	9
1.3	Principales elementos que constituyen un transformador de potencia.	10
1.4	Principio de funcionamiento de los transformadores de potencia	12
1.4.1	Transformador ideal en vacío.	12
1.4.2	Transformador ideal con carga	13
1.4.3	Transformador real en vacío.	15
1.4.4	Transformador real con carga.	18
1.5	Diagrama simplificado.	20
1.6	Circuito equivalente del transformador	23
1.7	Transformadores trifásicos.	25
1.8	Acoplamiento en paralelo de los transformadores.	25
1.8.1	Condiciones generales de la conexión en paralelo de los transformadores.	25
1.8.1.1	Angulo de fase entre primarios y secundarios.	26
1.8.1.2	Secuencia de fases.	27
1.8.1.3	Simetría de regulación.	27
1.8.2	Grupos de conexiones de los transformadores de potencia.	27
1.8.2.1	Conexión Delta / Delta.	27
1.8.2.2	Conexión estrella / estrella.	28

1.8.2.3	Delta abierta / delta abierta (V)	29
1.8.2.4	Conexión Scott ó conexión "T"	30
1.8.2.5	Conexión estrella / delta.	31
1.8.2.6	Delta / estrella.	31
1.8.2.7	Estrella / estrella zig-zag	32
1.9	Características nominales de los transformadores trifásicos	32
1.9.1	Potencia nominal.	32
1.9.2	Tensión nominal primaria.	33
1.9.3	Corriente nominal primaria.	33
1.9.4	Tensión nominal secundaria.	33
1.9.5	Corriente nominal secundaria.	33
1.9.6	Relación de transformación.	33
CAPITULO 2.	Transitorios en transformadores de potencia	35
2.1	Consideraciones generales	35
2.2	Nociones fundamentales acerca de los transitorios.	36
2.3	Parámetros transitorios para transformadores	37
2.3.1	Inductancia.	37
2.3.2	Capacitancia.	38
2.3.3	Resistencia.	39
2.3.4	Frecuencia natural del transformador.	39
2.4	Transitorios simples.	39
2.4.1	Corto-circuito en transformadores.	39
2.4.2	Amortiguamiento.	41

2.5	Corriente ideal máxima	43
2.5.1	Corriente cuadrática ideal máxima	44
2.6	Corriente de cresta	44
2.6.1	Corriente cuadrática de cresta.	45
2.7	Corriente eficaz cuadrática durante los primeros ν ciclos.	46
2.7.1	Corriente simétrica	46
2.7.2	Corriente asimétrica	46
2.8	Valores relativos en por unidad (p.u.)	47
2.8.1	Resistencia, reactancia e impedancia relativas de corto-circuito.	48
2.8.2	Caidas nominales o a plena carga relativas, V_{Rpu} , V_{Xpu} y V_{Zpu}	48
2.8.3	Corriente permanente de corto-circuito en p.u.	49
2.8.4	Corriente instantánea de corto-circuito en pu.	49
2.8.5	Corriente relativa ideal máxima.	50
2.8.6	Corriente relativa de cresta.	50
2.8.7	Constante de tiempo del transformador en corto-circuito.	51
2.8.8	Corriente eficaz cuadrática relativa en el intervalo de los ν primeros ciclos.	51
2.9	Potencias de corto-circuito.	52
2.9.1	Potencia activa media relativa de corto-circuito permanente.	52
2.9.2	potencia activa de cresta en corto-circuito.	52
2.9.3	Potencia activa media en valor relativo. (energía de pérdidas por efecto Joule durante el corto-circuito).	53
2.10	Corto-circuito de los transformadores trifásicos	54
2.10.1	Corriente ideal máxima y corriente de cresta.	55
2.10.2	Suma de corrientes cuadráticas.	55

2.10.2.1	En régimen permanente.	56
2.10.2.2	Instantáneas transitorias.	56
2.10.2.3	Oscilaciones cuadráticas trifásicas.	57
2.10.3	Suma de la Corriente eficaz durante los v primeros ciclos.	59
2.11	Potencias de corto-circuito de los transformadores trifásicos	60
2.11.1	Potencia activa en corto-circuito permanente.	61
2.11.2	Potencia activa trifásica de cresta en corto-circuito.	61
2.11.3	Oscilación máxima de la potencia activa trifásica de corto-circuito.	62
2.11.4	Potencia activa media trifásica de corto-circuito durante los primeros v ciclos.	62
CAPITULO 3.	Circuito magnético, devanados, dieléctricos y sujeción mecánica en los transformadores de potencia	65
3.1	Circuito magnético.	65
3.1.1	Concepto de circuito magnético	65
3.1.1.1	Campo magnético de un solenoide.	66
3.1.1.2	Circuito magnético.	67
3.1.2	Propiedades de los materiales ferromagnéticos.	68
3.1.2.1	Histéresis y retentividad.	69
3.1.2.2	Anillos secundarios o auxiliares.	70
3.1.3	Curvas de magnetización normal.	70
3.1.4	Voltajes inducidos magnéticamente, autoinductancia.	70
3.1.5	Circuitos magnéticos con excitación de ca.	72
3.1.5.1	Relación entre voltaje aplicado, voltaje inducido y flujo en un núcleo.	72
3.1.5.2	Corriente de excitación	73

3.1.6	Energía almacenada en un núcleo ferromagnético.	74
3.1.7	Pérdidas de energía en los núcleos ferromagnéticos.	75
3.1.7.1	Pérdidas por histéresis.	75
3.1.7.2	Pérdidas por corrientes parásitas.	76
3.1.8	Disposición del circuito magnético.	76
3.1.9	Elementos en los núcleos	77
3.2	Devanados.	79
3.2.1	Características de diseño	79
3.2.2	Devanados para transformadores de distribución	80
3.2.3	Tipos de devanados	81
3.2.3.1	Arrollamientos helicoidales.	81
3.2.3.2	Arrollamiento con bobinas superpuestas	81
3.2.3.3	Arrollamiento con bobinas concéntricas	82
3.2.4	Posición de los devanados	83
3.3	Dieléctricos	84
3.3.1	Función de los dieléctricos.	84
3.3.2	Propiedades eléctricas, mecánicas, físicas, térnicas y químicas	84
3.3.2.1	Propiedades eléctricas	84
3.3.2.2	Propiedades mecánicas.	85
3.3.2.3	Propiedades físicas.	86
3.3.2.4	Propiedades térmicas.	86
3.3.2.5	Propiedades químicas.	86
3.3.3	Dieléctricos utilizados en los transformadores de potencia.	87
3.3.3.1	Clasificación de los materiales aislantes	87
3.3.4	Tipos de aislamientos en los transformadores.	88
3.4	Sujeción mecánica	89
3.4.1	Esfuerzos electrodinámicos desarrollados por el corto-circuito.	89

3.4.2 Fijación mecánica de los núcleos.	91
3.4.3 Sujeción mecánica de los devanados.	92
CAPITULO 4. Efectos de los transitorios sobre los transformadores de potencia	95
4.1 Sobretensiones en los sistemas eléctricos.	95
4.1.1 Sobretensiones de origen externo.	96
4.1.1.1 El alcance de las descargas eléctricas.	96
4.1.1.2 Efectos de las descargas atmosféricas.	96
4.1.2 Sobretensiones de origen interno.	97
4.1.2.1 Casos de sobretensiones por maniobra.	98
4.1.3 Sobretensiones temporales.	98
4.2 Sobrecorrientes.	98
4.2.1 Causas, naturaleza y efectos.	98
4.3 Efectos de los transitorios en el circuito magnético del transformador	100
4.3.1 Conexión de un circuito monofásico con núcleo ferromagnético.	100
4.3.2 Cálculo aproximado del flujo máximo de conexión Φ despreciando la resistencia.	102
4.3.3 Corriente transitoria máxima de conexión despreciando la resistencia	104
4.3.4 Cálculo del flujo máximo de conexión teniendo en cuenta el amortiguamiento.	108
4.3.5 Corriente transitoria máxima de conexión con amortiguamiento.	110
4.3.6 Influencia de la inductancia de la línea sin amortiguamiento.	111
4.3.7 Estudio del caso general con amortiguamiento y caída de tensión reactiva en la línea.	113
4.3.8 Corriente de arranque de un transformador en vacío	114

4.3.9	Corriente relativa de arranque	116
4.3.10	Potencia magnetizante de arranque.	117
CAPITULO 5.	Pruebas y puesta en servicio	121
5.1	Introducción	121
5.2	Puesta en servicio de transformadores de potencia.	121
5.3	Procedimiento para puesta en servicio.	122
5.3.1	Inspección.	122
5.4	Armado final del transformador, instalación de accesorios.	122
5.5	Pruebas eléctricas finales de puesta en servicio.	124
5.5.1	Prueba de resistencia de aislamiento	124
5.5.2	Prueba de factor de potencia	124
5.5.3	Prueba de relación de transformación	124
5.5.4	Prueba de resistencia ohmica de todos los devanados	124
5.5.5	Pruebas eléctricas del aceite	124
5.5.6	Pruebas de operación de alarmas y disparo.	124
5.6	Tratamiento del aceite.	125
5.6.1	Condiciones requeridas para el aceite	125
5.7	Pruebas.	125
CAPITULO 6.	Análisi técnico-económico	165
6.1	Introducción	165
6.2	Parámetros técnicos de diseño de los transformadores.	167

6.3 Evaluación económica del diseño y puesta en marcha de un transformador.	168
6.4 Consideración adicional	172
Conclusiones y recomendaciones.	173
Conclusiones.	173
Recomendaciones.	179
Apéndice A. Tabla de símbolos	182
Apéndice B. Costantes	184
Apéndice C. Relaciones trigonométricas fundamentales.	185
Apéndice D. Transformada de Laplace.	186
Apéndice E. Transformada inversa de Laplace.	187
Bibliografía.	188

Durante los últimos años la ingeniería en todas sus ramas ha tenido muchos cambios importantes; esto por supuesto va de acuerdo con los rápidos adelantos que actualmente tiene la ingeniería eléctrica. En tiempos pasados, el conocimiento del funcionamiento de las máquinas eléctricas en estado normal y los métodos de diseño se consideraban adecuados. Sin embargo, con el constante crecimiento de los sistemas de potencia constituidos por componentes eléctricos, electrónicos, mecánicos, electromecánicos e hidráulicos, ha sido necesario ampliar el campo de diseño.

Generalmente, un sistema eléctrico de potencia está formado por un conjunto de elementos que están vinculados para generar y transmitir energía eléctrica a los centros de consumo. Este sistema eléctrico puede operar en varios estados:

El estado de **funcionamiento normal** o también llamado **régimen permanente**, debe de garantizar de una manera confiable el suministro de energía eléctrica con una calidad adecuada. Sería deseable que el régimen del sistema fuera absolutamente normal, sin embargo "un sistema completamente normal" en la realidad no puede existir por varias razones. Constantemente hay **pequeñas variaciones** que dependen del número de consumidores conectados, o sea la carga del sistema es **variable**; además, se presentan también, aunque con menor frecuencia **grandes disturbios** que están relacionados con las variaciones de los valores de las potencias generadas y consumidas, con la configuración del sistema, conexión y desconexión de generadores, líneas de transmisión y transformadores etc, así como con la aparición de descargas atmosféricas y fallas. Por tanto, estos factores, frecuentemente mantienen a cualquier sistema en un régimen **permanente transitorio**.

Estos fenómenos transitorios constituyen hoy en día el fenómeno técnico más preocupante de las investigaciones eléctricas. El estudio de los regímenes de un sistema eléctrico requiere el análisis no solo de los fenómenos electromagnéticos que garantizan la posibilidad de obtener, transmitir y producir energía eléctrica sino también de los fenómenos mecánicos en sus elementos.

El objetivo de esta tesis es ayudar a entender los fenómenos físicos que se presentan en los transformadores de potencia y que suceden durante cualquier régimen transitorio, calcular y controlarlos de tal forma que se hagan más leves las consecuencias posibles, y más aun evitar que estas lleven a un accidente o falla.

Por lo tanto, en esta tesis analizaremos los efectos de los fenómenos transitorios que influyen en el elemento más importante de la transmisión y distribución de energía eléctrica, el transformador de potencia.

Iniciamos en el capítulo 1 con una breve historia acerca de los transformadores de potencia, así como la utilidad que tienen en la industria actual; posteriormente, realizamos un análisis del funcionamiento básico del transformador y de las condiciones para conectar transformadores en paralelo.

El análisis de los fenómenos transitorios se realiza en el capítulo 2; en donde para un dispositivo eléctrico estático, tal como un transformador, los fenómenos transitorios son descritos por una ecuación. En esta parte, es donde se describe que es un transitorio, como se comporta y cual es la forma de analizarlo cuando se presenta en los transformadores. Principalmente, veremos el comportamiento y forma de onda de las corrientes, tensiones y potencias de corto-circuito en un transformador con núcleo ferromagnético.

En el capítulo 3, veremos que en cuanto a disposiciones constructivas se refiere, el núcleo determina características relevantes, de tal manera que se establece una diferencia fundamental en la construcción de transformadores, dependiendo de la forma del núcleo. En cuanto a los devanados, estos se seleccionan en base a la disposición del núcleo y a los esfuerzos dinámicos a que estén sometidos. También, veremos que existen varios tipos de aislamiento en el transformador con la finalidad de evitar el contacto entre partes vivas y entre partes vivas y tierra. Por último veremos que el núcleo y los devanados deben de estar sujetos rigidamente con la finalidad de que soporten mecánicamente los esfuerzos dinámicos a que estén expuestos.

Posteriormente, en el capítulo 4 realizamos un breve estudio de los efectos negativos más comunes de los fenómenos transitorios sobre los transformadores, debidos a los sobrevoltajes y sobrecorrientes; ya que ambos tienen un profundo efecto en el funcionamiento e integridad del transformador.

Una vez que se ha terminado el diseño, en el capítulo 5 se realiza una serie de pruebas al transformador para verificar que cumpla con lo estipulado en las normas correspondientes; así como hacer notar la importancia de la puesta en servicio de los transformadores. Pero en todo lo anterior se debe de considerar un aspecto muy importante, el análisis técnico-económico, el cual se evalúa en el capítulo 6.

CAPITULO 1

Transformadores de potencia.

1.1 Transformadores de potencia.

1.1.1 Antecedentes históricos

La bobina de inducción descubierta en el año de 1831 por Michael Faraday, fué el antecedente para la creación del transformador. Faraday encontró que podían obtenerse corrientes eléctricas por el movimiento de campos magnéticos, así como la importante influencia del hierro en los núcleos magnéticos.

Es a Michael Faraday a quien se debe la construcción del primer transformador elemental, en forma de una bobina llamada bobina de inducción, la cual tenía la forma de un anillo y se encontraba dispuesta en un aro de hierro, siendo alimentada por una corriente continua que era interrumpida periódicamente, siendo en la actualidad el principio en el cual se basan los diseños de los transformadores modernos.

Pero todavía no se veía el interés por transmitir energía eléctrica alterna ni las ventajas de la alta tensión para el transporte de la misma, hasta que Goulard y Gibbs, construyeron en forma comercial el primer transformador de corriente alterna, marcando en la historia de la humanidad uno de los pasos más firmes en su desarrollo, el cual permitió llevar a los rincones más apartados los beneficios de la electricidad y la fuerza para mover las máquinas. Es importante mencionar que los primeros transformadores eran de pequeña potencia y de tensiones de hasta 3 000 volts como máximo.

1.1.2 Finalidad de los transformadores de potencia.

Un sistema de potencia consta principalmente de generadores, transformadores y cargas conectadas entre sí por distintas líneas de transmisión, figura 1.1 Según la magnitud de las potencias y las distancias a las que se van a transmitir por las líneas, existen diferentes voltajes que permiten resultados más económicos. En éstas condiciones, la aplicación de los transformadores con el fin de obtener distintos niveles de voltaje, es indispensable, además el transporte de energía eléctrica resulta más económico cuanto mayor sea la tensión de transmisión. Por otra parte, la energía eléctrica es más fácil de producir y menos peligrosa a baja tensión.

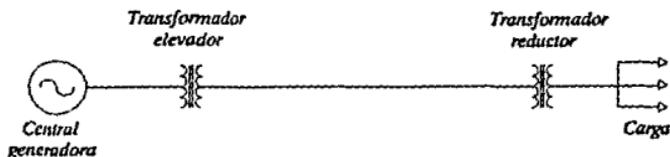


Figura 1.1 Diagrama de un sistema eléctrico de potencia

Los grandes sistemas eléctricos actuales han contribuido enormemente al desarrollo económico, por lo tanto, el papel que representan los transformadores en un sistema es destacado y no exageramos al afirmar que sin la simplicidad, manejabilidad y gran rendimiento del transformador hubiera sido imposible el enorme desarrollo de los últimos años.

1.1.3 Transformadores de potencia.

El transformador de potencia es un dispositivo estático (sin partes móviles), capaz de transferir energía eléctrica de un circuito de corriente alterna a otro, siendo el enlace entre ambos circuitos un flujo magnético común. Los transformadores empleados para el transporte y distribución de energía eléctrica en los grandes sistemas eléctricos reciben el nombre en general de **transformadores de potencia**.

1.2 Clasificación de los transformadores.

1.2.1 Por su capacidad

Por su capacidad se clasifican en cuatro categorías según la norma ANSI / IEEE C57.12.00-1980, como se puede ver en la tabla 1.1

Categoría	monofásicos (KVA)	Trifásicos (KVA)
I	5 a 500	15 a 500
II	501 a 1 667	501 a 5 000
III	1 668 a 10 000	5 001 a 30 000
IV	Superiores a 10 000	Superiores a 30 000

Tabla 1.1 Clasificación según su capacidad

1.2.2 Por su clase de enfriamiento.

Por el medio que los enfría, los transformadores se clasifican en:

- a) Sumergidos en líquidos
- b) Tipo seco.

Por su clase de enfriamiento según la norma ANSI / IEEE C57.12.00-1980, hay cuatro métodos de enfriamiento para los transformadores sumergidos en líquidos, y tres para los transformadores secos, en forma general, y particularmente se tiene:

1.2.2.1 Sumergidos en líquido / enfriados por aire.

Clase OA: Sumergidos en líquido / con enfriamiento natural.

En estos transformadores, el aceite aislante circula por convención natural dentro de un tanque con paredes lisas o corrugadas o bien provisto de enfriadores tubulares o radiadores separables. Los tanques con superficie lisa se usan en transformadores de distribución pequeños, hasta 50 KVA. Para transformadores de hasta 150 KVA

los tanques se construyen con superficie corrugada o con aletas alrededor del tanque. La construcción de tipo tubular fijo suele usarse para potencias de hasta 3 000 KVA. Arriba de 3 000 KVA, los transformadores se suministran normalmente con radiadores desmontables colocados sobre las paredes laterales del tanque.

Clase OA / FA: Sumergidos en líquido / con enfriamiento natural / enfriados por aire forzado.

Este tipo es básicamente una unidad OA a la que se le ha agregado un sistema de circulación forzada de aire a base de ventiladores. Esto se hace para aumentar la disipación del calor, aumentando así los KVA de salida del transformador en un 15 , 25 ó 33.3 % . El empleo del sistema OA / FA es el indicado cuando el transformador estará sujeto a sobrecargas, cortas pero periódicas, que deben ser soportadas sin afectar el funcionamiento normal del transformador. El arranque y paro de los ventiladores es gobernado por la temperatura del aceite o de los devanados, por medio de controles que permiten la operación manual o automática del enfriamiento forzado. El enfriamiento forzado puede usarse también cuando se desea aumentar la carga permanente de un transformador.

1.2.2.2 Sumergidos en líquido / enfriados por aire / enfriados por líquido forzado.

Clase OA / FOA / FOA: Sumergido en líquido / con enfriamiento natural / enfriados por aire-líquido forzado / enfriados por aire-líquido forzado

El régimen del transformador tipo OA, sumergido en aceite puede ser aumentado por el empleo combinado de bombas y ventiladores. Usando la mitad de los radiadores y de las bombas se logra un aumento de 1.333 veces sobre el diseño OA. Si se usa la totalidad de los ventiladores y bombas se consigue un aumento de 1.667 veces el régimen OA. El arranque y paro de los ventiladores y bombas son gobernados por la temperatura del aceite o de los devanados.

1.2.2.3 Sumergidos en líquido / enfriados por agua.

Clase OW: Sumergidos en líquido / enfriados por agua.

Este tipo de transformador está equipado con un intercambiador de calor tubular colocado fuera del tanque. El agua de enfriamiento circula en el interior de los tubos, y se drena por gravedad o por medio de una bomba independiente. El aceite fluye, estando en contacto con la superficie exterior de los tubos.

1.2.2.4 Sumergidos en líquido / enfriados por líquido forzado.

Clase FOA: Sumergidos en líquido / enfriados por líquido forzado / enfriados por aire forzado

El enfriamiento se lleva a cabo por circulación forzada de aceite, mediante bombas, a través de intercambiadores de calor enfriados por aire colocados fuera del tanque. Su diseño es para trabajo continuo del sistema de enfriamiento, pudiendo mantener así la totalidad de su carga nominal.

Clase FOW: Sumergidos en líquido / enfriados por líquido forzado / enfriados por agua.

El transformador es prácticamente igual que el FOA, excepto que el intercambiador de calor es del modelo agua-aceite y por lo tanto el enfriamiento del aceite se hace por medio de agua sin tener ventiladores.

1.2.2.5 Tipo seco

Clase AA: Tipo seco / con enfriamiento natural

La característica primordial es que no contienen aceite u otro líquido para efectuar las funciones de aislamiento y enfriamiento, y es el aire, el único medio que rodea el núcleo y las bobinas. Los transformadores secos se fabrican con capacidades inferiores a 2 000 KVA y voltajes menores de 15 KV.

Clase AFA: Tipo seco / enfriados por aire forzado.

Para aumentar la potencia del transformador AA, se usa el enfriamiento con aire forzado.

Clase AA/FA: Tipo seco / con enfriamiento natural / enfriados por aire forzado.

La denominación de estos transformadores indica que tienen dos regímenes, uno por enfriamiento natural y el otro contando con la circulación forzada de aire por medio de ventiladores, cuyo control es automático y opera mediante un relevador térmico.

1.2.5 Por su voltaje de operación.

Por el voltaje nominal de operación los transformadores se clasifican de acuerdo a la norma ANSI / IEEE C57.12.00-1980 como se ve en la tabla 1.2.

Aplicación	V. nominal (Kv rms)	V. máximo (Kv rms)	Niveles básicos de aislamiento al impulso (Bils) más comunes. (Kv cresta)			
D i s t r i b u c i ó n	1.2		30.0			
	2.5		45.0			
	5.0		60.0			
	8.7		75.0			
	15.0		95.0			
	25.0		150.0	125.0		
	34.5		200.0	150.0	125.0	
	46.0	48.3	250.0	200.0		
	69.0	72.5	350.0	250.0		
		1.2		45.0	30.0	
	2.5		60.0	45.0		
	5.0		75.0	60.0		
P o t e n c i a	8.7		95.0	75.0		
	15.0		110.0	95.0		
	25.0		150.0			
	34.5		200.0			
	46.0	48.3	250.0	200.0		
	69.0	72.5	350.0	250.0		
	115.0	121.0	550.0	450.0	350.0	
	138.0	145.0	650.0	550.0	450.0	
	161.0	169.0	750.0	650.0	550.0	
	230.0	242.0	1050.0	900.0	825.0	750.0
345.0	362.0	1175.0	1050.0	900.0	825.0	
500.0	550.0	1675.0	1550.0	1425.0	1300.0	
765.0	800.0	2050.0	1925.0	1800.0		
1100.0	1200.0	2425.0	2300.0	2175.0	2050.0	

Tabla 1.2 Clasificación de los transformadores según su voltaje de operación.

1.2.4 Por la disposición del circuito magnético.

1.2.4.1 Transformadores de columnas.

Se conocen también como tipo núcleo o shell. En esta construcción, el núcleo proporciona un solo circuito magnético formado por un yugo inferior, un yugo superior y 2 o 3 columnas verticales para 1 o 3 fases respectivamente. Los devanados son ensamblados concéntricamente en cada una de las columnas. De esta manera, el circuito eléctrico rodea o envuelve al circuito magnético.

1.2.4.2 Transformador acorazado.

El transformador acorazado se caracteriza por la existencia de columnas exteriores, por las que se cierra el circuito magnético y que están desprovistas de bobinado, figura 1.2. En los transformadores trifásicos los devanados primarios y secundarios están montados generalmente en un núcleo común.

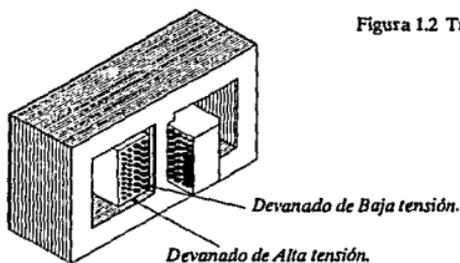


Figura 1.2 Transformador acorazado.

1.2.5 Por la disposición de los devanados.

1.2.5.1 Transformador de devanados separados.

Los devanados primario y secundario, están montados en columnas diferentes del circuito magnético, figura 1.3.

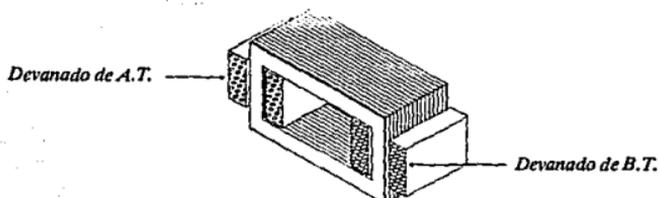


Figura 1.3 Transformador de devanados separados

1.2.5.2 Transformador de devanados concéntricos.

En estos, los devanados están montados en la misma columna; el devanado de baja tensión se dispone casi siempre más próximo al hierro, para evitar el peligro de un arco entre el núcleo y el devanado de alta tensión, y al mismo tiempo para facilitar las reparaciones en el devanado de alta tensión, figura 1.4

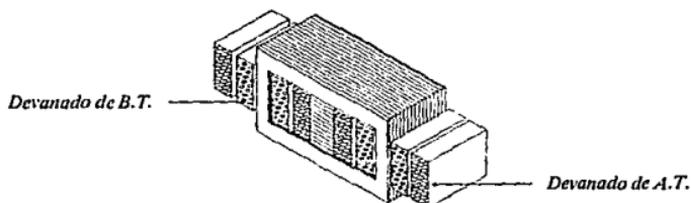


Figura 1.4 Transformador de devanados concéntricos

1.2.5.3 Transformador de devanados doblemente concéntricos.

Es semejante al anterior, solo que el devanado de baja tensión es subdividido en dos mitades, o sea, el devanado de alta tensión queda colocado entre las dos mitades del devanado de baja tensión, ver figura 1.5

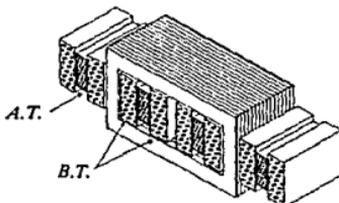


Figura 1.5 Transformador de devanados doblemente concéntricos

1.2.5.4 Transformador de devanados alternados.

Las bobinas se montan alternadas sobre la misma columna y de forma que se dejan siempre dos secciones de baja tensión en los extremos.

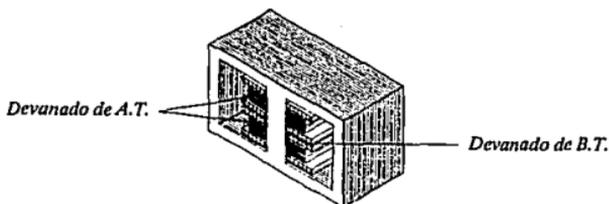


Figura 1.6 Transformador de devanados superpuestos

1.2.6 Tipos de arrollamientos

1.2.6.1 Arrollamiento en capas.

En este arrollamiento el conductor se dispone alineado en filas a todo lo largo del brazo, en una o dos capas. Entre las distintas capas se intercalan láminas aislantes o listones distanciadores para constituir canales verticales de ventilación. Este tipo se emplea para los devanados de baja tensión de pequeños transformadores de distribución.

1.2.6.2 Arrollamiento en espiral.

La sección total del conductor está subdividida en varios hilos para evitar desequilibrios en la tensión inducida y corrientes de compensación; de esta forma, se reducen las pérdidas adicionales. Este tipo de arrollamiento se aplica en devanados para grandes intensidades de corrientes como por ejemplo, los correspondientes al lado de baja tensión.

1.2.6.3 Arrollamiento alterno.

Esta constituido por bobinas individuales en forma de disco en las que por procedimientos especiales de bobinado, los discos de numero impar se arrollan continuamente de abajo a arriba y los de numero par, de arriba a abajo. El conductor se presenta ininterrumpido, con las espiras de una bobina en orden sucesivo normal, es decir, de dentro

hacia afuera y las de la bobina siguiente, en orden inverso, es decir, de afuera hacia adentro. De esta forma, se evitan las soldaduras, ya que el arrollamiento se devana de forma continua.

1.3 Principales elementos que constituyen un transformador de potencia.

Para su correcto funcionamiento, los transformadores están equipados con diversos accesorios, dependiendo del tipo, pero los más esenciales y más importantes son los siguientes:

- » **Núcleo, (circuito magnético).** El núcleo representa el órgano de transferencia de la energía entre un circuito y otro. Su función es contener el flujo magnético.
- » **Devanados.** Los devanados constituyen una parte esencial de los transformadores, pueden ser de una, dos o tres fases, de alambre delgado, grueso o barra, según el amperaje del circuito, y con pocas o bastantes espiras, de acuerdo con los potenciales manejados. Su función es crear un campo magnético con pequeñísimas pérdidas de energía y utilizar el flujo para inducir una fem.
- » **Boquillas terminales.** Las boquillas permiten el paso de las corrientes a través de la cubierta o el tanque del transformador sin ocasionar un escape indebido de corriente y seguridad contra el flámeo. Así como aislar el interior del exterior.
- » **Tanque y cubierta.** Casi todos los transformadores actuales están encerrados en una cuba rellena de aceite mineral, que sirve como aislante y como refrigerante. La construcción de la cuba depende esencialmente, de la clase de refrigeración elegida. Generalmente, la cuba es de forma ovalada y se construye con chapa de caldera de alta calidad.
- » **Medio refrigerante.** El medio refrigerante puede ser al mismo tiempo aislante eléctrico y conductor de calor. Puede ser líquido como en la mayoría de los transformadores de gran capacidad.
- » **Serpentines y aparatos de refrigeración.** Los serpentines y aparatos de refrigeración tienen por objeto hacer pasar el calor del medio interior a otro medio exterior y mantener la temperatura del medio interno dentro de los límites especificados.
- » **Deposito conservador de aceite.** El deposito conservador de aceite es un pequeño depósito situado en la parte superior de la tapa del transformador en comunicación con la caja.

- » **Indicadores.** Los indicadores son aparatos que sirven para ayudar a conservar el transformador en un margen de seguridad establecido, estos indicadores miden generalmente nivel de líquido interno, la temperatura general o local, presión interior o pureza del líquido empleado como medio refrigerante.
- » **Indicador de nivel de aceite.** Generalmente se monta sobre una de las paredes laterales del depósito conservador. En los transformadores pequeños es una simple mirilla circular con una señal que indica el nivel mínimo de aceite; en los transformadores de mediana y gran potencia, se dispone de un nivel con divisiones verticales, en otros casos, de un disco graduado vertical, cuya aguja indica las fluctuaciones de nivel del aceite.
- » **Termómetro de mercurio.** Se utilizan uno o varios termómetros de mercurio para medición de la temperatura en el punto más caliente, es decir, en la parte alta de la cuba. El termómetro está provisto de dos contactos, cada uno de ellos ajustado para un valor máximo de la temperatura; el primero acciona una señal de alarma y el segundo provoca la desconexión del interruptor del transformador.
- » **Relevador Buchholz.** El aparato detector de gases, más conocido como relevador Buchholz, constituye una protección del transformador contra descargas en el interior de la cuba, corto-circuito a tierra, corto-circuito entre espiras, etc... y en general, los defectos de aislamiento que caen fuera del dominio de la protección contra sobrecorrientes.
- » **Termostatos.** Los termostatos se emplean para controlar la temperatura del aire de ventilación y el caudal necesario de este aire para una refrigeración eficaz; indirectamente, protegen a los arrollamientos contra las sobrecargas.
- » **Válvula de seguridad.** Se utilizan también válvulas y tubos de seguridad, montados sobre la tapa del transformador y que sirven para proteger a la cuba contra sobrepresiones elevadas.
- » **Conmutadores auxiliares.** Los conmutadores son órganos destinados a producir cambios en la relación de tensiones de entrada y salida con objeto de regular el potencial de un sistema.

Finalmente, se pueden citar otros accesorios y elementos de trabajo, como válvulas de llenado y vaciado de aceite, cajas de conexiones, placa de características, etc...

1.4 Principio de funcionamiento de los transformadores de potencia

Hasta ahora, un transformador ha sido considerado como un arreglo de dos bobinas, las cuales a su vez están acopladas magnéticamente. Una de ellas, el primario, se conecta a una fuente de potencia y la otra, el secundario, entrega potencia a la carga a un voltaje normalmente diferente.

El transformador está basado en el principio de que la energía eléctrica se puede transferir eficazmente por inducción magnética desde un arrollamiento a otro, por medio de un flujo magnético variable, siempre y cuando estén dispuestos sobre el mismo núcleo magnético, figura 1.7

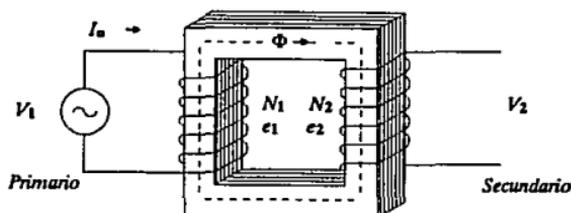


Figura 1.7 Transformador monofásico en vacío

1.4.1 Transformador ideal en vacío.

La mayoría de los transformadores fabricados en la actualidad son tales que se les puede considerar casi ideales. En general, las ecuaciones se desarrollan en condiciones ideales y serán una primera aproximación a la respuesta real, que nunca estará lejos de un pequeño porcentaje respecto a lo ideal. En el análisis que sigue en esta sección, supondremos que en el transformador ideal:

- Las resistencias de los arrollamientos son despreciables.
- Las capacitancias de los arrollamientos se pueden despreciar.
- El flujo magnético enlaza a todas las espiras de ambos arrollamientos, primario y secundario.
- La permeabilidad del material del núcleo es muy alta y constante.
- Las pérdidas por histéresis en el núcleo son despreciables.
- No hay pérdidas por corrientes de Eddy en el núcleo y en los arrollamientos.

Si aplicamos una tensión alterna senoidal, siempre y cuando no se llegue a la saturación del núcleo, es decir, siempre que la permeabilidad magnética se mantenga constante,

resultará que la corriente que pasa por la bobina del primario y el flujo magnético creado por esta corriente, serán senoidales. El arrollamiento primario funciona entonces simplemente como una autoinducción. La corriente en el primario, que es muy pequeña, está retrasada 90° respecto al voltaje del primario y se denomina corriente de excitación I_0 (en este caso, por no haber pérdidas en el hierro, la corriente de excitación o de vacío es igual a la corriente de magnetización I_m). Por autoinducción, en cada una de las espiras se inducirá una fem:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Si N_1 es el número total de espiras de la bobina, la fem en los extremos de ésta es:

$$e_1 = - N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.1)$$

La corriente que circula por el primario crea un flujo magnético Φ que se cierra por el circuito magnético, atravesando las espiras de la bobina del secundario; como el flujo es senoidal, inducirá en esta bobina una fem e_2 cuyo valor es:

$$e_2 = - N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (1.2)$$

Como el secundario está abierto, la corriente en este arrollamiento es nula, por lo tanto:

$$e_2 = V_2$$

entonces las fem's inducidas instantáneas por espira y la fem total en cada una de las bobinas debe ser proporcional al número de espiras que lo componen; es decir:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{N_1}{N_2} = r \quad (1.3)$$

1.4.2 Transformador ideal con carga

Si al transformador de la figura anterior le conectamos una carga, figura 1.8, por el secundario circulará una corriente I_2 ; al atravesar las espiras del arrollamiento secundario, esta corriente produce una fuerza magnetomotriz dada por:

$$F_2 = N_2 I_2 \quad (1.4)$$

que altera el flujo magnético creado por la fuerza magnetomotriz producida por la corriente de magnetización, y que vale:

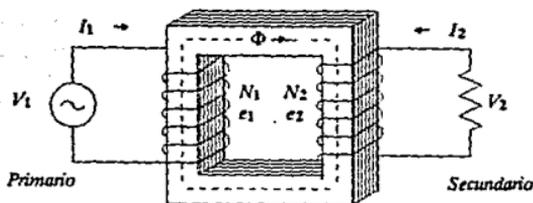


Figura 1.8 Transformador con carga

$$F_m = N_1 I_0 \quad (1.5)$$

En otras palabras, la corriente I_2 circulará en una dirección, de tal forma que tienda a neutralizar el campo creado por el primario, así, tendiendo a reducir la fem del primario y permitiendo incrementar la corriente I_1 en el primario, que no tiene por qué ser la misma que en vacío.

Si la red es de potencia suficientemente grande frente a la potencia de la carga, prácticamente no habrá caídas de tensión, por lo que V_1 permanecerá constante y, por lo tanto, no podrá variar tampoco el valor de e_1 . Como consecuencia, el flujo no puede variar tampoco, por lo que se necesitará una nueva fuerza magnetomotriz que contrarreste la variación del flujo.

Esta nueva fuerza magnetomotriz se obtiene, suponiendo que por el primario circula una corriente I_1' , diferente de la corriente de magnetización y cuyo valor ha de ser tal que se cumpla la relación que sigue:

$$N_1 I_1' = N_2 I_2 \quad (1.6)$$

o sea, que las fuerzas magnetomotrices primaria y secundaria sean iguales. Debido a que la corriente de excitación es de un valor muy pequeño y generalmente su defasamiento es considerable con respecto a la corriente total del primario, suele, despreciarse I_0 en comparación con la intensidad de la corriente total del primario.

Entonces la ecuación 1.6 se reduce a,

$$N_1 I_1 = N_2 I_2$$

Por lo tanto:

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad (1.7)$$

Es decir, las intensidades de corriente en el primario y en el secundario son inversamente proporcionales a sus respectivos números de espiras.

La relación anterior puede deducirse si las potencias en el primario y en el secundario en cualquier instante se consideran iguales, o sea, la potencia suministrada al primario será igual a la potencia suministrada por el secundario, es decir:

$$V_1 I_1 \cos \varphi_1 = V_2 I_2 \cos \varphi_2$$

Aceptando que a plena carga $\cos \varphi_1 \approx \cos \varphi_2$, resulta que:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = r \quad (1.8)$$

donde r es la relación de transformación.

1.4.3 Transformador real en vacío.

Si examinamos la operación de un transformador, es evidente que no partimos de las condiciones ideales, de tal forma que para analizar un transformador real es necesario introducir algunos factores que fueron despreciados en el transformador ideal.

- Los arrollamientos tienen cierta resistencia.
- La permeabilidad del núcleo no es infinitamente alta, por lo que se requiere una corriente magnetizante para producir el flujo.
- Hay una apreciable pérdida por histéresis en el núcleo.
- Existen pérdidas por corrientes parásitas.

En todos los transformadores, evidentemente existe una corriente en el primario, (aunque este abierto el secundario). Esta corriente, conocida como corriente de vacío o de excitación resulta de las imperfecciones del núcleo, el cual tiene baja permeabilidad y por lo tanto requiere de una fuerza de magnetización apreciable para producir el flujo.

La corriente de vacío I_0 puede descomponerse en dos componentes; una de ellas, denominada corriente de magnetización I_m , en fase con el flujo Φ y, por lo tanto, defasada 90° atrás respecto al voltaje primario V_1 y otra llamada corriente de pérdidas en el hierro I_{fe} , en fase con el voltaje V_1

Una afirmación concisa del modo de operación de un transformador puede ser hecha muy convenientemente en forma de un diagrama vectorial de corrientes y voltajes. El diagrama vectorial muestra no solamente las magnitudes relativas de varias cantidades sino también el ángulo de fase entre ellas.

Diagrama vectorial del transformador real en vacío.

En lo expuesto en las secciones 1.4.1 y 1.4.2 se supone que todo el flujo magnético abraza ambas bobinas. En la práctica esto no es posible. Todo el flujo producido por el primario no lo abraza el secundario, sino que una parte del mismo completa su circuito magnético a través del aire, en lugar de hacerlo por el núcleo, figura 1.9

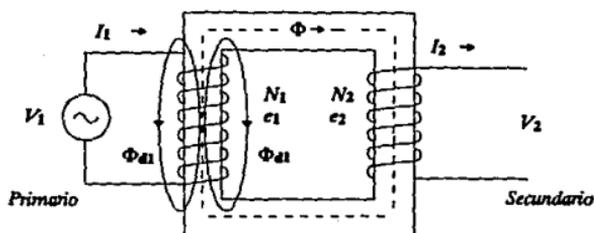


Figura 1.9 Flujo de dispersión en vacío

Este flujo Φ_{d1} , se denomina flujo de dispersión del primario y es proporcional únicamente al total de Ampers-vuelta del primario, ya que las espiras del secundario no abrazan el circuito magnético de Φ_{d1} , que, por lo tanto, induce una fem en el primario, pero no en el secundario. Como el flujo Φ_{d1} está en fase con la corriente total del primario I_1 , la fem inducida debe estar 90° atras con respecto a este flujo y a la corriente I_1 ; esta fem no es otra cosa que una caída de tensión por reactancia.

De acuerdo a las consideraciones anteriores el circuito equivalente del transformador se reduce al circuito de la figura 1.10

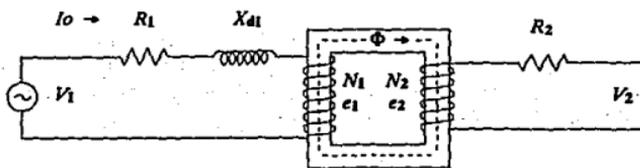


Figura 1.10 Circuito equivalente en vacío con flujo de dispersión

Si tomamos como punto de partida para construir el diagrama vectorial en vacío del transformador a el flujo común a ambos arrollamientos, las fuerzas electromotrices e_1 y e_2 , estarán defasadas 90° atrás con respecto a dicho flujo.

Como sabemos, la corriente de magnetización I_m está en fase con el flujo Φ , por lo tanto la componente de pérdidas en vacío I_{fe} está 90° adelante con respecto al flujo, de modo que la corriente de vacío I_0 en el primario será el resultado de la suma vectorial de I_m e I_{fe} . El ángulo α que forma I_0 con el flujo Φ se denomina ángulo de pérdidas y debe procurarse que sea lo más pequeño posible.

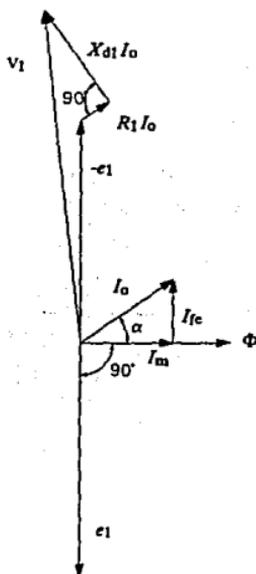


Figura 1.11 Diagrama vectorial del transformador monofásico en vacío

Para hallar el valor y dirección del vector V_1 , se toman en cuenta las caídas en la resistencia y en la reactancia. Por lo tanto, a continuación del vector $-e_1$ se sitúa el vector $R_1 I_0$, que representa la caída de voltaje en el primario debido a la circulación de I_0 a través de la resistencia del primario, y estará en fase con I_0 . A continuación, se traza el vector representativo de $X_{d1} I_0$, es decir, la caída de tensión en la reactancia de dispersión, que está adelantada 90° respecto a la corriente de vacío I_0 ; por lo que sumando esos tres vectores se obtiene el vector representativo de V_1 , que es el voltaje que debe aplicarse de la fuente, figura 1.11

Vectorialmente se tiene:

$$\vec{V}_1 = -\vec{e}_1 + I_0 \vec{R} + j I_0 \vec{X}_d \quad (1.9)$$

1.4.4 Transformador real con carga.

Para analizar el transformador con resistencia y reactancia de dispersión se aplica un razonamiento semejante al descrito en la sección 1.4.2.

Durante el funcionamiento a plena carga, circula una corriente I_2 por el secundario, por lo tanto, se produce un flujo magnético secundario que no se cierra totalmente a través del núcleo sino que una parte se cierra por el aire, aislamientos etc., como se ve en figura 1.12 Este flujo Φ_{d2} se denomina flujo de dispersión del secundario y es proporcional únicamente a los ampers-vuelta del secundario.

El flujo Φ_{d2} induce una fem en el secundario atrasada 90° con respecto a la intensidad de la corriente I_2 en dicho arrollamiento. Y esto resulta también una caída de tensión por reactancia.

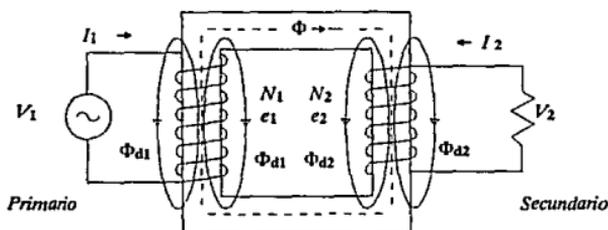


Figura 1.12 Flujo de dispersión en un transformador con carga

En estas condiciones, el circuito equivalente del transformador será el que se muestra en la figura 1.13

Diagrama vectorial del transformador con carga.

La figura 1.14 representa las relaciones que existen entre las intensidades de corriente, tensiones y flujos, en un transformador, cuando su secundario suministra una corriente I_2 a una tensión V_2 y con un factor de potencia $\cos \varphi_2$ con una relación de transformación $r = 1$

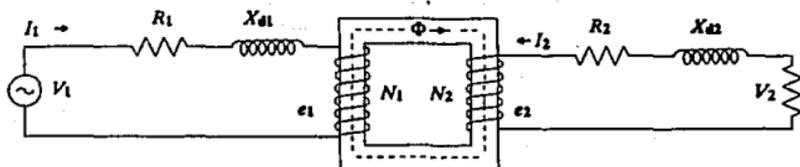


Figura 1.13 Circuito equivalente completo del transformador monofásico real con carga

De la figura 1.13 se pueden deducir las siguientes ecuaciones vectoriales:

$$I_1 = I_0 + I_1' \quad (1.10)$$

$$V_1 = I_1 R_1 + j I_1 X_{d1} - e_1 \quad (1.11)$$

$$e_2 = V_2 + I_2 R_2 + j I_2 X_{d2} \quad (1.12)$$

De acuerdo con estas ecuaciones vectoriales, puede trazarse el diagrama vectorial. El vector Φ representa el flujo mutuo, y es el que se elige como vector de referencia. Las fem's inducidas e_1 y e_2 están atrasadas 90° con respecto a este flujo. El vector I_2 de la intensidad de la corriente en el secundario, está atrasado un ángulo φ_2 respecto a V_2 , ángulo que corresponde al factor de potencia de la carga.

La fem inducida por el flujo de dispersión del secundario se contrarresta por una componente que está adelantada 90° con respecto al mismo flujo.

La fem inducida e_2 en el secundario se determina sumando vectorialmente a V_2 la caída de tensión por resistencia $I_2 R_2$ en el secundario y la caída por reactancia $I_2 X_2$ debida al flujo de dispersión en el secundario, adelantada 90° con respecto a I_2

La fem o tensión de la línea debe ser igual a $-e_1$, con un valor idéntico y en oposición a e_1 . Si el flujo Φ no varía en forma apreciable, el primario debe tener el número de ampers-vuelta suficiente para equilibrar los ampers-vuelta del secundario. Estos ampers-vuelta del primario $N_1 I_1'$ están defasados 180° con respecto a los ampers-vuelta $N_2 I_2$. A los ampers-vuelta $N_1 I_1'$ del primario hay que agregar los ampers-vuelta $N_1 I_m$ necesarios para producir el flujo común Φ , siendo I_m la componente de magnetización de la corriente de excitación I_0 . Sin embargo, también debe de tenerse en cuenta, la componente energética (I_{fe}) de I_0 que compensa las pérdidas en el núcleo. Por lo que la intensidad total de la corriente primaria I_1 es la suma vectorial de I_0 y de I_1' .

Así como se contrarresta la fem inducida por el flujo de dispersión del secundario, la fem inducida por el flujo de dispersión del primario se contrarresta también por una componente que está adelantada 90° con respecto al flujo de dispersión del primario.

La tensión V_1 en las terminales del primario se determina sumando vectorialmente $-e_1$, $I_1 R_1$ en fase con I_1 e $I_1 X_1$ adelantado 90° con respecto a I_1 . El ángulo φ_1 que forman V_1 e I_1 es el ángulo del factor de potencia del transformador.

1.5 Diagrama simplificado.

El diagrama de la figura 1.14 puede simplificarse mucho si se desprecia la corriente de excitación I_0 , tal como se representa en la figura 1.15. En la teoría de los transformadores normalmente se acostumbra reducir los valores de voltajes y corrientes de un lado del transformador a los correspondientes valores del otro lado, con lo cual se simplifican los razonamientos y los cálculos para determinar las condiciones de servicio.

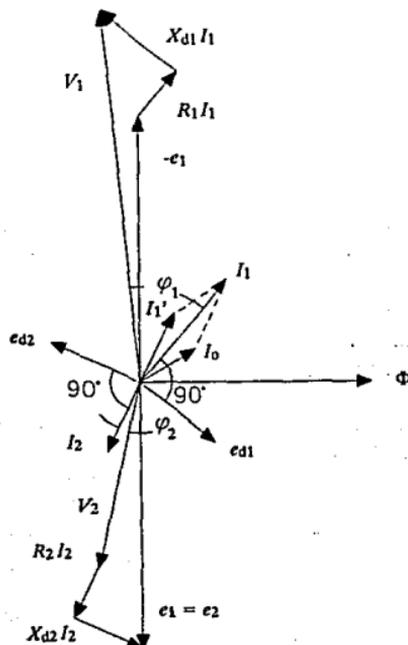


Figura 1.14 Diagrama vectorial del transformador monofásico con carga

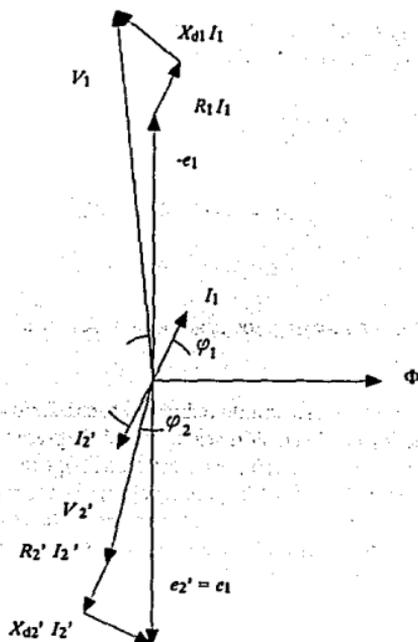


Figura 1.15 Diagrama vectorial del transformador con carga, con valores del secundario reducidos al primario

A continuación ejemplificaremos la reducción del secundario al primario. En este caso, para reducir los voltajes secundarios, se multiplican por la relación de transformación r , obteniendo así los nuevos valores:

$$e_2' = e_2 r = e_2 (N_1/N_2)$$

$$V_2' = V_2 r = V_2 (N_1/N_2)$$

$$V_{R_2}' = V_{R_2} r = R_2 I_2 r = R_2 I_2 (N_1/N_2)$$

$$V_{X_{d_2}'} r = V_{X_{d_2}} r = X_{d_2} I_2 r = X_{d_2} I_2 (N_1/N_2)$$

Las corrientes secundarias, se multiplican por el inverso de la relación de transformación, es decir,

$$I_2' = I_2 \frac{1}{r} = I_2 (N_2/N_1)$$

Las impedancias, resistencias y reactivas del secundario se reducen al primario, multiplicándolas por el cuadrado de la relación de transformación, o sea:

$$Z_2' = \frac{V_2'}{I_2'} = \frac{V_2}{I_2} r = Z_2 r^2 = Z_2 (N_1/N_2)^2$$

$$R_2' = R_2 r^2 = R_2 (N_1/N_2)^2$$

$$X_{d_2}' = X_{d_2} r^2 = X_{d_2} (N_1/N_2)^2$$

Las potencias del secundario y los ángulos de fase no se alteran al reducirlos de un lado a otro.

Se puede decir que la operación de reducir el secundario al primario, equivale a reducir a un transformador cuya relación sea 1 / 1. El diagrama vectorial, con los valores del secundario reducidos al primario, se muestra en la figura 1.15. Sin embargo, la forma más práctica y cómoda de dibujar el diagrama vectorial es la representación de la figura 1.16, es decir, realizando un giro de 180° a todos los vectores del secundario, omitiendo los vectores e_2' y $-e_1$; aquí se aprecia fácilmente que se puede pasar de una tensión a otra sin más que sumar o restar las caídas de tensión.

$$\vec{V}_1 = \vec{V}_2' + R_2' I_2' + jX_{d_2}' I_2' + R_1 I_1 + jX_{d_1}' I_1 \quad (1.13)$$

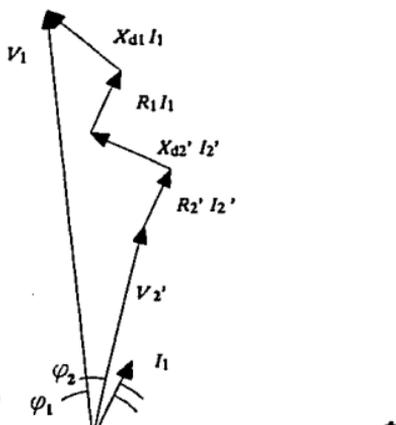


Figura 1.16 Diagrama vectorial práctico con carga y valores reducidos al primario

1.6 Circuito equivalente del transformador.

Los circuitos primario y secundario hasta ahora han sido considerados completamente por separado, excepto para analizar los efectos de acoplamiento magnético. En muchas ocasiones es conveniente considerar los dos circuitos como si estuvieran unidos en un circuito común, el cual represente a todo el transformador.

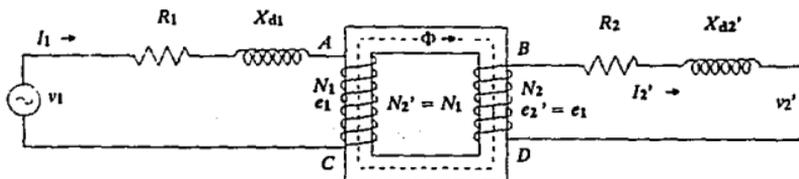


Figura 1.17 Deducción del circuito equivalente de un transformador en vacío

Supongamos un transformador con el secundario referido al primario, con una relación:

$$N_2' = N_1$$

pero también teniendo en cuenta que:

$$e_2' = e_1$$

Este circuito está representado en la figura 1.17, donde se puede observar que los puntos A y B son dos puntos de diferentes circuitos, pero sometidos a la misma tensión, por lo tanto se pueden unir sin provocar alguna alteración en cuanto a voltajes y corrientes. Con los puntos B y C se puede hacer lo mismo. Dicho lo anterior resulta que una bobina está de más, el circuito resultante es como el que se muestra en la figura 1.18

Ahora bien, por la única bobina que queda en el circuito pasa la corriente de vacío, es decir, la corriente que entra I_1 menos la corriente I_2' que sale por la rama del secundario. Por otro lado sabemos que la corriente de vacío tiene dos componentes: La corriente magnetizante y la corriente de pérdidas en el hierro.

Si despreciamos la corriente de excitación debido a las causas mencionadas en la sección 1.4.2 el circuito equivalente completo se sustituye por un circuito equivalente simplificado, por lo tanto se tiene:

$$I_1 \approx I_2'$$

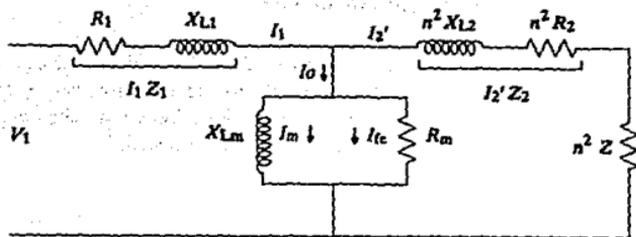


Figura 1.18 Circuito equivalente completo de un transformador monofásico

En este circuito resultante hay dos resistencias y dos reactancias en serie, o sea:

$$R_{cc} = R_1 + R_2'$$

$$X_{cc} = X_{d1} + X_{d2}'$$

Que son las únicas constantes del circuito equivalente que se oponen al paso de la corriente y que se denominan resistencia y reactancia de corto-circuito respectivamente, como se ve en la figura 1.19

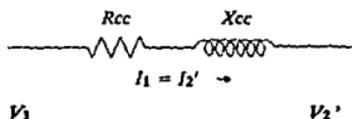


Figura 1.19 Circuito equivalente simplificado con inclusión de la resistencia y reactancia de corto-circuito

Corriente de corto-circuito.

La corriente de corto-circuito es la intensidad de corriente que absorbe un arrollamiento al aplicarle la tensión nominal, estando el otro arrollamiento cerrado en corto-circuito y además se supone que ambos arrollamientos están a la temperatura de régimen del transformador.

Tensión de corto-circuito.

La tensión de corto-circuito, se define como la tensión que es necesario aplicar a cualquiera de los dos arrollamientos para que estando el otro cerrado en corto-circuito, circule por el primero de ellos la corriente nominal correspondiente.

1.7 Transformadores trifásicos.

La gran mayoría de los sistemas de generación y de distribución de energía que existen en el mundo son sistemas trifásicos de ca. Como dichos sistemas son los más importantes en la vida moderna, se hace necesario entender la manera de como se utilizan. Los transformadores para circuitos trifásicos pueden construirse de dos formas: Una de ellas consiste en tomar tres unidades monofásicas y conectarlas en forma trifásica. La otra alternativa es proveer un transformador trifásico constituido por tres juegos de devanados arrollados sobre un núcleo común. La unidad trifásica se prefiere hoy en día, ya que resulta más ligera, más pequeña, más barata y ligeramente más eficiente. Pero la principal ventaja de utilizar tres transformadores monofásicos consiste en la posibilidad de cambiar cualquiera de ellos en caso se avería.

1.8 Acoplamiento en paralelo de los transformadores.

En los centros de transformación se pueden conectar en paralelo varios transformadores, uniendo los primarios de todos ellos a la misma línea primaria y los secundarios a la misma red de distribución. Muchas veces se prefiere instalar grandes transformadores capaces de dar por sí solos la potencia máxima, sobre todo si la carga no desciende durante mucho tiempo a un valor demasiado bajo. Sin embargo, otras veces, con el fin de una inversión mínima en los transformadores de reserva, se opta por disponer de unidades más pequeñas asociadas en paralelo.

1.8.1 Condiciones generales de la conexión en paralelo de los transformadores.

Si dos transformadores son conectados para trabajar en paralelo es esencial que cuando los primarios estén en paralelo, los potenciales instantáneos en las terminales secundarias correspondientes deberán ser iguales. Por regla dos transformadores trifásicos o grupos de unidades monofásicas pueden operar satisfactoriamente con sus primarios y secundarios en paralelo, las condiciones aplicables a la operación en paralelo de transformadores monofásicos se deben de cumplir, pero además hay otros requerimientos peculiares para el funcionamiento de transformadores trifásicos.

Los requerimientos para el funcionamiento de transformadores monofásicos en paralelo son:

- a) La misma polaridad.
- b) La misma relación de transformación
- c) El mismo porcentaje de impedancia.

El transformador debe de tener también:

- d) El mismo ángulo de fase entre las terminales primarias y secundarias correspondientes
- e) La misma secuencia de fases.
- f) El mismo tipo de regulación de voltaje trifásico con una carga balanceada.

Estos requerimientos especiales para transformadores trifásicos son detallados continuación.

1.8.1.1 Ángulo de fase entre primarios y secundarios.

Las diferentes combinaciones que existen, dependiendo del ángulo de defasamiento entre el primario y secundario pueden ser divididas en dos grupos.

El primer grupo consiste de aquellos en los cuales el voltaje de línea secundario es derivado directamente del voltaje de línea primario, y aquellos en los cuales los voltajes fase a neutro son derivados de fase a neutro. En cada caso los voltajes primario y secundario correspondientes están en fase. Esas combinaciones son:

Grupo I

- » Delta / Delta
- » Estrella / Estrella
- » Delta / Zig-zag
- » Delta abierta / Delta abierta
- » Conexión Scott. (Tee / Tee)

Al segundo grupo pertenecen todos aquellos en los cuales solo un devanado es conectado directamente entre líneas. Hay una diferencia de fase de 30° entre las correspondientes

terminales de entrada y salida en los transformadores de este grupo, por lo que las combinaciones son:

Grupo II

- » Estrella / delta
- » Delta / Estrella
- » Estrella / Zig-Zag
- » Zig-Zag / Estrella

1.8.1.2 Secuencia de fases.

Es indispensable que al conectar en paralelo un grupo de transformadores, estos tengan la misma secuencia de fases ABC o CBA.

1.8.1.3 Simetría de regulación.

Es probable que este factor sea de importancia solo cuando se usan grupos en delta abierta. Por ejemplo si conectamos una carga balanceada a un banco de transformadores en delta abierta se producirá un ligero desbalanceo en los voltajes debido a la diferente regulación de las tres fases. Consecuentemente un banco conectado en delta abierta no repartirá correctamente la carga como una delta cerrada.

1.8.2 Grupos de conexiones de los transformadores de potencia.

Los transformadores trifásicos o los bancos de transformadores monofásicos pueden ser conectados como se indica en el grupo I o II, a continuación veremos las conexiones más importantes.

1.8.2.1 Conexión Delta / Delta.

El método de conexión más común es ambos devanados en Delta. Si tres transformadores monofásicos tienen sus primarios conectados uno a cada uno de los tres posibles pares de líneas, las tensiones de línea son simplemente las correspondientes a los arrollamientos de cada transformador. Desde el momento en que cada línea es conectada a dos bobinas, las corrientes de fase en los arrollamientos son menores que las corrientes de

línea. Sin embargo, debido a la diferencia de fases entre las dos ramas, cada devanado toma $1/\sqrt{3}$ de la corriente de línea si es una carga balanceada, figura 1.20

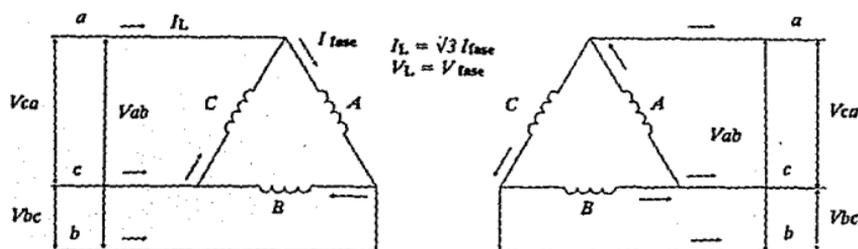


Figura 1.20 Conexión delta / delta

En esta conexión, no hay punto neutro disponible y en algunos casos es un inconveniente para alimentar cargas monofásicas. Para que los KVA de salida de un banco en delta se repartan igualmente entre las tres unidades, se debe de cumplir con lo siguiente:

- Es necesario que la relación de transformación sea igual
- Sus impedancias deben de ser iguales.
- La suma de los tres voltajes en los devanados secundarios conectados extremo a extremo con la misma polaridad deberá de ser cero en cualquier instante.

Algún desbalanceo de corrientes en el secundario originará una correspondiente diferencia en las corrientes del primario y un incremento de carga en el secundario producirá un incremento en la corriente del primario en esa fase.

1.8.2.2 Conexión estrella / estrella.

En esta conexión solo un devanado es conectado a cada línea, el extremo opuesto de los tres devanados se unen en un solo punto, llamado punto neutro. Este punto puede estar disponible o no. En esta conexión las corrientes en los devanados son igual a las corrientes de línea, pero los voltajes de fase en cada bobina en el caso de un sistema simétrico es $1/\sqrt{3}$ el voltaje de línea.

Esta conexión presenta dos inconvenientes serios:

- » Si la carga del transformador es desbalanceada, produce fuertes desbalanceos en los voltajes de fase del transformador.

- » Existe un problema grave con las terceras armónicas de voltaje.

Si se aplica un sistema trifásico de tensiones a un transformador con esta conexión, los voltajes de las diferentes fases estarán defasadas 120° entre sí. No obstante las componentes de 3er armónico de las tres fases están en fase entre sí, ya que hay tres ciclos del tercer armónico por cada ciclo de frecuencia fundamental. Siempre existirá algún componente de tercer armónico en un transformador debido a la no linealidad del material del núcleo, y estos componentes se suman dando como resultado una componente mayor de voltaje de tercer armónico superpuesto al voltaje fundamental. Este tercer armónico de tensión puede llegar a ser mayor que el mismo voltaje fundamental.

Los problemas de desequilibrio de voltajes y de tercer armónico pueden solucionarse juntos mediante dos maneras.

- » Conectando sólidamente a tierra los neutros de los transformadores, especialmente el del primario. Esta conexión permite que los componentes de tercer armónico originen corrientes en el neutro en vez de causar sobrevoltajes. Igualmente el neutro también provee trayectoria de retorno a cualquier desequilibrio de corriente de la carga.
- » Agregando un devanado terciario conectado en delta al banco de transformadores. Si se añade el devanado terciario conectado en delta los componentes de 3er armónico de tensión de la delta se suman dando lugar a la circulación de corriente por dicho devanado. Esto suprime los componentes de voltaje de tercer armónico de la misma forma que aterrizando los neutros del transformador.

1.8.2.3 Delta abierta / delta abierta (V).

Podemos pensar que la eliminación del transformador A en la figura 1.20 desequilibrará seriamente los voltajes del sistema, pero esto no es así. Si eliminamos el transformador A, los voltajes de línea V_{ab} y V_{bc} son producidos por los transformadores B y C en serie, el voltaje V_{ca} será igual en fase y en magnitud (solo habrá una pequeña caída por impedancia) como si este haya sido transformado por un tercer transformador conectado entre estos puntos. Los dos transformadores (B y C) están actuando como transformadores monofásicos.

Si conectamos una carga trifásica balanceada en el lado secundario, cada transformador es capaz de conducir su intensidad nominal de plena carga I , pero la intensidad en la línea es ahora la de un solo arrollamiento del transformador, por lo que la intensidad de plena carga $I\sqrt{3}$ se reduce a I amp. Sin embargo, la corriente I_{ca} es suministrada por los dos devanados secundarios en serie, por lo que la potencia suministrada es 0,577 de la capacidad total. Esta pérdida de capacidad se debe a que los dos devanados tienen que

transportar la corriente del transformador que falta, además de sus propias corrientes y como I_{ca} no está en fase con I_{ab} ni con I_{bc} , podemos deducir que I_{ab} e I_{bc} sufren un desfaseamiento. I_{ab} es desviado 30° en un sentido e I_{bc} 30° en sentido opuesto. En la conexión delta I_{ab} e I_{bc} forman un ángulo de 120° y su diferencia vectorial es $I\sqrt{3}$, mientras que en la conexión en "V" solo forman un ángulo de 60° y su diferencia vectorial es I .

1.8.2.4 Conexión Scott ó conexión "T"

La conexión Scott es muy poco utilizada para transformaciones trifásicas, pero es muy importante para conversiones trifásicas a bifásicas y viceversa.

Si se utilizan dos transformadores cuyos primarios son ad y bc con sus respectivos secundarios, y el extremo d del arrollamiento primario ad se conecta con el punto medio del primario bc . Y sus tres extremos a la línea de alimentación, se dice que el transformador bc se llama principal y el ad se llama transformador pequeño, figura 1.21

Los voltajes V_{dc} y V_{db} son $V_{bc}/2$ y desfasados 180° por estar sobre el mismo circuito magnético y conectados en oposición. El voltaje V_{da} vale $V_L\sqrt{3}/2$, por lo que podemos observar el transformador pequeño trabaja solo con el 86.6% de su tensión de régimen y en los arrollamientos bd y dc la corriente está desfasada por 30° , atrasados y adelantados respectivamente con $\text{fp} = 1$. Sin embargo, si el transformador está previsto para el 86.6% de la tensión funcionará a plena capacidad y ésta es entonces para todo el sistema igual a 0.928 de la total del transformador.

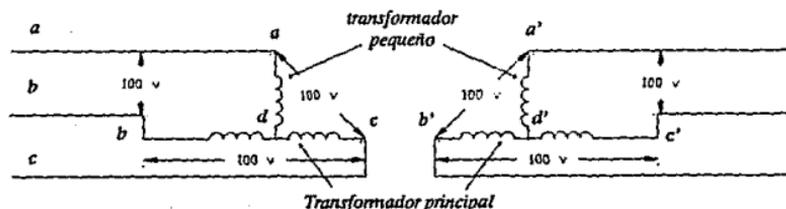


Figura 1.21 Transformadores monofásicos en conexión Scott

Si conectamos los extremos b' y d' del secundario, como se indica en la figura 1.22a, obtenemos un sistema bifásico trifilar. El voltaje $V_{a'a'}$ es igual $V_L\sqrt{3}/2$, mientras que $V_{b'b'}$ y $V_{c'c'}$ son iguales a V_L . Las dos fases del sistema tienen tensiones desiguales y esto se corrige si el conductor a se conecta en el punto a_1 del primario, tal que da_1 represente el 86.6% del arrollamiento de dicho transformador y formaremos así un sistema bifásico trifilar simétrico. Si conectamos los puntos medios de los secundarios puede obtenerse un

sistema trifásico con 4 o cinco conductores. El punto O es el neutro del sistema primario y se encuentra a $2/3$ de la distancia entre a_1 y d

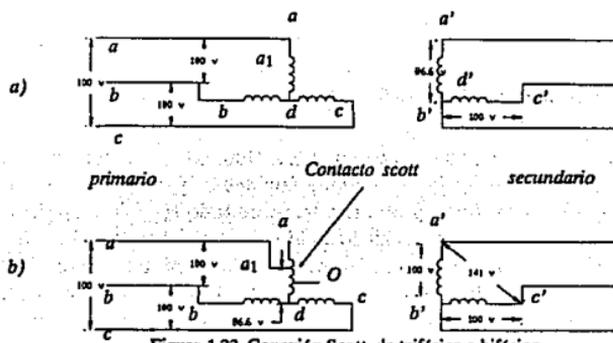


Figura 1.22 Conexión Scott, de trifásico a bifásico

En estas conexiones, las tensiones quedan ligeramente desequilibradas aun con cargas equilibradas, lo que se debe a las relaciones asimétricas de fase entre las tensiones y corrientes de los arrollamientos individuales.

1.8.2.5 Conexión estrella / delta.

Debido a las dificultades relacionadas con la 3ra armónica en la conexión estrella/estrella, la combinación del primario en estrella y el secundario en delta es una forma muy frecuente para conectar transformadores.

Para un voltaje dado entre líneas, cada una de las bobinas en estrella conducirá una corriente de línea total, pero solo tomará $1/\sqrt{3}$ veces el voltaje de línea. Las bobinas en delta, en cambio solo conducirán $1/\sqrt{3}$ veces la corriente de línea pero mantendrán el voltaje de la línea. Esta conexión no tiene problemas con los componentes de 3er armónico de voltaje, puesto que estos se consumen en corriente circulante en el lado conectado en delta. La conexión también es más estable bajo carga desbalanceada, ya que la delta redistribuye parcialmente cualquier desequilibrio que se presente.

1.8.2.6 Delta / estrella.

En esta conexión, los voltajes primarios de línea y de fase son iguales, pero cada bobina de la delta tomará $1/\sqrt{3}$ veces la corriente de línea; mientras que las corrientes secundarias de línea y de fase son iguales en tanto que cada bobina de la estrella tomará

solo $1/\sqrt{3}$ veces el voltaje de línea. Esta disposición es muy bien adaptada para alimentar a grupos de cargas monofásicas desbalanceadas en áreas residenciales, y es probablemente una de la mas utilizadas. La principal desventaja es la ausencia de un punto neutro aterrizado simétricamente.

1.8.2.7 Estrella / estrella zig-zag

Esta conexión fue introducida como un sustituto para la conexión delta / estrella, capaz de proveer una distribución secundaria con neutro y cargas desequilibradas, sin perder las ventajas de los primarios en estrella, sobre todo si se desea poner a tierra el neutro del primario. Los devanados están formados en cada fase conectando en serie dos bobinas con polaridades opuestas colocadas en columnas distintas. Así, la salida en la fase es la diferencia vectorial entre las salidas de las dos fases diferentes. Debido a la polaridad invertida de la segunda mitad de cada devanado, los voltajes armónicos son eliminados de los voltajes de línea a neutro en la salida de cada fase.

La corriente secundaria en cada fase influye sobre las corrientes de dos bobinas primarias y, por lo tanto sobre dos de los conductores de la línea. El neutro del secundario puede estar aterrizado sin causar algunos disturbios.

La salida en cada fase de una conexión estrella / zig-zag consiste de un vector voltaje primario y otro vector primario invertido, desde que la diferencia de fases en el primario es de 120° , la separación entre las dos componentes secundarias es $180^\circ - 120^\circ = 60^\circ$, por lo tanto la suma vectorial de esos dos componentes será el vector resultante.

1.9 Características nominales de los transformadores trifásicos.

1.9.1 Potencia nominal.

Se denomina potencia nominal, a la potencia aparente en los bornes del secundario, expresada en KVA y se obtiene realizando el producto de la tensión nominal secundaria a plena carga, por la intensidad nominal secundaria y por el coseno del ángulo de defasamiento.

1.9.2 Tensión nominal primaria.

Se llama tensión nominal primaria a aquella para la cuál se ha calculado el arrollamiento primario.

1.9.3 Corriente nominal primaria.

La corriente nominal primaria es la corriente que existe entre las terminales del primario a la tensión nominal, en condiciones de plena carga.

1.9.4 Tensión nominal secundaria.

La tensión nominal secundaria es la que aparece en los bornes de arrollamiento secundario, al alimentar el arrollamiento primario con su tensión nominal, durante el funcionamiento en vacío del transformador. Las tensiones nominales secundarias se elevan en un 5 % sobre las tensiones de servicio de los aparatos receptores.

1.9.5 Corriente nominal secundaria.

La corriente nominal secundaria es la corriente a plena carga, para la cual se ha diseñado el arrollamiento secundario.

1.9.6 Relación de transformación.

La relación de transformación nominal es la relación que existe entre las tensiones de vacío. En los transformadores de arrollamientos fijos, la relación de transformación coincide prácticamente con la relación del número de espiras de los respectivos arrollamientos, teniendo siempre en cuenta el grupo de conexión a que pertenezcan.

$$r = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

La relación de transformación debe de indicarse siempre en vacío.

CAPITULO 2

Transitorios en transformadores de potencia.

2.1 Consideraciones generales.

Un transitorio eléctrico es una manifestación externa de un cambio repentino en las condiciones de un circuito, como cuando se abren o cierran interruptores o ocurre una falla en el sistema. El período de un transitorio es usualmente muy corto. La fracción de tiempo de operación que la mayoría de los circuitos consumen en las condiciones transitorias es insignificante comparada con el tiempo empleado en un régimen permanente. Antes de ocurrir algún cambio en las condiciones del circuito los valores de voltaje y corriente se encuentran en estado permanente; cuando ha transcurrido un intervalo de tiempo después del cambio de condiciones, el estado o régimen permanente es alcanzado nuevamente. A ese intervalo de tiempo es lo que se le conoce como **régimen transitorio**. Sin embargo, esos procesos transitorios son muy importantes; para tal período los componentes del circuito son sometidos a los más grandes esfuerzos mecánicos y eléctricos debido a las sobrecorrientes y sobretensiones. En casos extremos pueden ocasionar daños, estos pueden desabilitar un generador, un transformador, parar una central generadora u originar apagones en los centros de consumo. Por estas razones,

es esencial tener una clara apreciación de los eventos que tienen lugar durante un período transitorio en un transformador de potencia para entender completamente el comportamiento de sus elementos ante estas circunstancias. Desafortunadamente, muchas de las veces se tiene confuso el concepto de qué está pasando en el transformador en tal período. No obstante los transitorios pueden ser entendidos, calculados y algunas veces prevenidos, o al menos controlados.

Una primera preocupación desde el principio de éste análisis es el énfasis en el aspecto físico de que está ocurriendo en el circuito durante el disturbio. Las matemáticas son usadas como un aditamento para éste fin, no como un sustituto de éste. El método de la transformada de Laplace será utilizado en lo que sigue de nuestro estudio para simplificar y sistematizar las matemáticas. Sin embargo, donde hay la oportunidad de simplificar las matemáticas adicionales, lo hacemos. Finalmente, encontraremos que podemos evitar las matemáticas por completo en muchos de los problemas que estamos por discutir, procediendo directamente a la solución por deducción.

2.2 Nociones fundamentales acerca de los transitorios.

Para predecir la respuesta transitoria de un circuito a un estímulo en particular, es necesario reducir el sistema a un circuito de parámetros concentrados R_s , L_s y C_s , por lo tanto la solución requiere de ecuaciones integro-diferenciales. Esas ecuaciones describen el desarrollo transitorio del circuito determinando la frecuencia natural del sistema, el voltaje y la corriente máximos que están presentes en una situación en particular así como la constante de amortiguamiento de la perturbación.

Los parámetros L y C se caracterizan por su habilidad para almacenar energía, la inductancia en un campo magnético y la capacitancia en un campo eléctrico del circuito. Esas energías almacenadas están en función de los valores instantáneos de corriente I y de voltaje V , y son respectivamente.

$$\frac{1}{2} LI^2 \quad \text{y} \quad \frac{1}{2} CV^2$$

En contraste el parámetro R es un disipador de energía, siendo la relación de disipación RI^2 en cualquier instante. En un circuito de corriente directa bajo condiciones permanentes la energía almacenada en las inductancias y capacitancias es constante, mientras que en un circuito de corriente alterna la energía está siendo transferida ciclicamente entre L_s y C_s . Este proceso es acompañado después por ciertas pérdidas, dependiendo de la resistencia presente.

Cuando ocurre algún cambio repentino en un circuito, hay generalmente una redistribución de energía para llegar a las nuevas condiciones, y de alguna manera, esto

es lo que estamos estudiando cuando indagamos sobre la naturaleza de los transitorios. Esto es muy importante para darse cuenta que esa redistribución de energía no puede suceder por dos razones:

- » Para variar el campo magnético requerimos de un cambio de corriente, pero el cambio de corriente en un inductor esta en contra por medio de una fem de magnitud $L di / dt$. Por consiguiente un cambio instantáneo de corriente requeriría un voltaje infinito para ocasionarla. Puesto que esto es prácticamente imposible, la corriente en un circuito inductivo no puede cambiar bruscamente y consecuentemente la energía magnética almacenada no puede cambiar bruscamente.
- » Para variar la energía eléctrica almacenada requerimos de un cambio en el voltaje. El voltaje a través del capacitor está dado por $V = Q/C$, donde Q es la carga, y su razón de cambio es:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} = \frac{1}{C}$$

Para un cambio instantáneo de voltaje deberá de fluir una corriente infinita. Esto también es imposible; por consiguiente el voltaje a través del capacitor no puede variar bruscamente ni la energía almacenada en su campo eléctrico asociado.

- » También la redistribución de energía siguiente a un cambio en las condiciones del sistema requiere de un tiempo finito, y el proceso durante ese intervalo, como cualquier otro tiempo es gobernado por la ley de la conservación de la energía, esto es, la energía suministrada es igual a la energía almacenada mas la energía de disipación.

Esos tres simples factores son fundamentales para entender los transitorios eléctricos.

2.3 Parámetros transitorios para transformadores

2.3.1 Inductancia.

En la sección 1.4.3 y 1.4.4 mencionamos que el fenómeno de dispersión es muy común en los transformadores, por lo tanto en muchas ocasiones, la inductancia que nos importa cuando un transformador es parte de un sistema oscilando, es la inductancia de dispersión, la cual se obtiene usualmente por un simple cálculo de su reactancia de dispersión en por unidad, X_{pu} :

$$L_d = \frac{X_{pu} V^2}{\omega (S)} \quad (2.1)$$

Donde el voltaje V esta dado en KV, y la potencia aparente S esta dada en MVA. Si el voltaje utilizado es de línea a línea, entonces S es la potencia total de las tres fases del transformador. Si se especifica un voltaje de línea a neutro, entonces la potencia S es por fase.

2.3.2 Capacitancia.

Para el caso de la capacitancia vamos a iniciar considerando un dispositivo muy simple compuesto por dos devanados cilindricos, un núcleo y un tanque. El devanado interior, el más próximo a el núcleo, es el devanado de bajo voltaje; rodeado por el devanado de alto voltaje. No hay dificultad para poder pensar en esos devanados como cilindros de metal coaxiales. Los cuales forman las placas de un capacitor. Similarmente, habrá un capacitor formado entre el devanado interior y el núcleo. Esto es sin duda una supersimplificación, pero este es un buen punto para iniciar. Como en cualquier capacitor, sus valores dependerán del área de separación entre las placas y la permeabilidad del material que las separa. Aquí hemos estado considerando un modelo muy simple, los detalles de diseño, específicamente el tipo de devanado usado, puede afectar significativamente a los valores de capacitancia. Como sabemos, existen dos tipos de devanados comúnmente utilizados, devanados tipo capa y tipo disco, y experimentalmente se ha encontrado que la capacitancia efectiva a tierra de un devanado tipo disco es frecuentemente de no más que el 30 al 40% del valor de un devanado en capas del mismo rango.

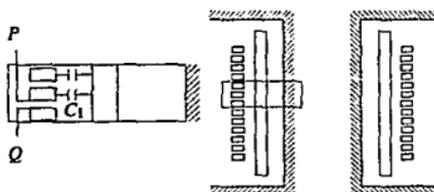


Figura 2.1 Sección transversal de un transformador mostrando la capacitancia entre los devanados.

La figura 2.1 muestra una sección transversal a través de un transformador con devanados de bajo voltaje en capas y un devanado de alto voltaje tipo disco. La capacitancia entre dos "galletas" del devanado de disco es entre las superficies P y Q , puede ser bastante exacto calcularla por la formula. $C = k\epsilon_0 A / d$ donde A es el área formada por la superficie P ó superficie Q , d es la separación entre P y Q , y k es la permeabilidad relativa del dieléctrico formado por el aislamiento del conductor y espacio relleno de aceite entre las dos galletas. Esta capacitancia es significativamente más grande que la capacitancia

C_1 entre una galleta y el devanado de bajo voltaje, esto es por que el área del borde de una galleta es mucho más pequeño que las áreas P y Q.

2.3.3 Resistencia.

Si estamos hablando acerca de una verdadera resistencia de los devanados, ésta es muy baja, típicamente esta en el rango de 0.2 a 1.5 % del valor de la reactancia. Las pérdidas por el hierro en el núcleo pueden considerarse también originadas por una resistencia, la cual puede ser representada como un resistor en paralelo con el circuito tanque, formado por L_m y C_{eff} . Esto amortigua muy eficazmente las oscilaciones. En un sistema de potencia bajo condiciones de falla, la mayor parte del flujo en los transformadores se cierra por medio del aire; por lo tanto la resistencia efectiva debería ser colocada con una L_d y una C_{eff} en serie.

Las reactancias de dispersión son las únicas que conjuntamente con las resistencias ohmicas determinan la evolución integra del proceso transitorio conservando todas ellas los mismos valores que en servicio normal.

2.3.4 Frecuencia natural del transformador.

En el caso de fenómenos transitorios de frecuencia elevada es necesario representar a los transformadores no solo por su impedancia de cortocircuito y de circuito abierto sino también tomar en cuenta la capacitancia de los devanados y de las boquillas terminales. En algunos casos es necesario tomar en cuenta la característica de saturación del núcleo magnético; por lo que la inductancia y capacitancia centran su influencia en la frecuencia natural a la cual el transformador oscila cuando ocurre un disturbio. Esto es muy importante en las operaciones de switcheo.

2.4 Transitorios simples.

2.4.1 Corto-circuito en transformadores.

Un transformador monofásico, en caso de corto-circuito, puede representarse por medio de un circuito equivalente como el que se obtuvo en la sección 1.6, siendo representado por el circuito de la figura 2.2 El cual tiene un factor de potencia en régimen permanente dado por:

$$\cos \varphi_{cc} = \frac{R_{cc}}{|Z_{cc}|} = \frac{R_{cc}}{\sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}} \quad (2.2)$$

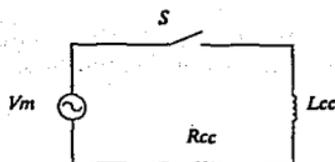


Figura 2.2 Circuito equivalente de un transformador en corto - circuito.

Asumiendo que la impedancia de la fuente es despreciable comparada con la del transformador, la fuente de tensión senoidal tiene un valor $V = V_m \sin \omega t$; además si consideramos que la corriente de carga se puede despreciar con respecto a la de corto-circuito, y suponiendo que éste se produzca partiendo de unas condiciones precedentes de marcha en vacío; resulta entonces aplicable el siguiente análisis.

Cuando se cierra el interruptor S (ocurrencia de un corto-circuito), la ecuación del circuito es:

$$R_{cc}I + L_{cc} \frac{dI}{dt} = V = V_m \sin(\omega t + \beta) \quad (2.3)$$

La inclusión arbitraria del ángulo de fase β permite cerrar el interruptor en cualquier instante en el ciclo de voltaje. Por lo que, la ecuación 2.3 puede reescribirse como:

$$R_{cc}I + L_{cc} \frac{dI}{dt} = V_m [\sin \omega t \cos \beta + \cos \omega t \sin \beta]$$

Aplicando la transformada de Laplace a ambos lados:

$$R_{cc}i(s) + L_{cc}s i(s) - L_{cc}I(0) = V_m \left\{ \frac{\omega \cos \beta}{s^2 + \omega^2} + \frac{s \sin \beta}{s^2 + \omega^2} \right\} \quad (2.4)$$

Recordando que $\sin \beta$ y $\cos \beta$ son constantes una vez que el valor de β ha sido asignado, y además como se menciono $I(0) = 0$, la ecuación queda:

$$i(s) = \frac{v_m}{L_{cc}} \frac{1}{(R_{cc}/L_{cc} + s)} \left\{ \frac{\omega \cos \beta}{s^2 + \omega^2} + \frac{s \sin \beta}{s^2 + \omega^2} \right\} \quad (2.5)$$

Pero esta ecuación puede reescribirse más consistentemente como sigue:

$$i(s) = \frac{A}{(s + \alpha)(s^2 + \omega^2)} + \frac{Bs}{(s + \alpha)(s^2 + \omega^2)} \quad (2.6)$$

donde:

$$A = \frac{V_m}{L_{cc}} \omega \cos \beta \quad B = \frac{V_m}{L_{cc}} \operatorname{sen} \beta \quad \alpha = \frac{R_{cc}}{L_{cc}}$$

Las transformadas que aparecen se pueden resolver fácilmente por el método de fracciones parciales, obteniendo:

$$\frac{1}{(s + \alpha)(s^2 + \omega^2)} = \frac{1}{(\alpha^2 + \omega^2)} \left\{ \frac{1}{(s + \alpha)} - \frac{s}{(s^2 + \omega^2)} + \frac{\alpha}{(s^2 + \omega^2)} \right\} \quad (2.7)$$

por lo tanto,

$$L^{-1} \frac{1}{(s + \alpha)(s^2 + \omega^2)} = \frac{1}{(\alpha^2 + \omega^2)} (e^{-\alpha t} - \cos \omega t + \frac{\alpha}{\omega} \operatorname{sen} \omega t) \quad (2.8)$$

El término en s de la ecuación 2.6 se evalúa por el mismo método, obteniendo:

$$L^{-1} \frac{s}{(s + \alpha)(s^2 + \omega^2)} = \frac{1}{(\alpha^2 + \omega^2)} (-\alpha e^{-\alpha t} + \omega \operatorname{sen} \omega t + \alpha \cos \omega t) \quad (2.9)$$

Si evaluamos la ecuación 2.6 con la ayuda de las ecuaciones 2.8 y 2.9 y tomando en cuenta que $\operatorname{Tan} \varphi_{cc} = \omega L_{cc} / R_{cc} = \omega / \alpha$, de tal modo que $\operatorname{sen} \varphi_{cc} = \omega / (\alpha^2 + \omega^2)^{1/2}$ y $\cos \varphi_{cc} = \alpha / (\alpha^2 + \omega^2)^{1/2}$ realizando operaciones y factorizando se obtiene la solución:

$$i_{cc}(t) = \frac{V_m}{\sqrt{R_{cc}^2 + \omega^2 L_{cc}^2}} [\operatorname{sen}(\omega t + \beta - \varphi_{cc}) - \operatorname{sen}(\beta - \varphi_{cc}) e^{-\alpha t}] \quad (2.10)$$

2.4.2 Amortiguamiento.

Si hacemos que $\tau_{cc} = 1 / \alpha$, podemos definir a la constante de tiempo $\tau_{cc} = L_{cc} / R_{cc}$ y es finita gracias a la presencia de la resistencia ohmica R_{cc} en el circuito, y en general de cualquier clase de pérdidas energéticas que pudieran traducirse por una resistencia equivalente de pérdidas. Si R_{cc} fuese estrictamente nula, τ_{cc} sería infinita, $e^{-t/\tau_{cc}} = 1$, y la onda de corriente de la ecuación 2.10 estaría desviada por el instante de cierre, es decir, según el ángulo respectivo de β frente al ángulo φ_{cc} propio del circuito, o sea $\theta_{cc} = \varphi_{cc} - \beta$, y que daría origen a una oscilación permanente. Si sustituimos el valor de la constante de tiempo τ_{cc} y θ_{cc} en la ecuación 2.10 tenemos:

$$i_{cc}(t) = \frac{V_m}{\sqrt{R_{cc}^2 + \omega^2 L_{cc}^2}} [\operatorname{sen}(\omega t - \theta_{cc}) + \operatorname{sen} \theta_{cc} e^{-t/\tau_{cc}}] \quad (2.11)$$

En la ecuación anterior el ángulo θ_{cc} caracteriza el grado de asimetría de la onda de corriente transitoria, y

$$I_{mcc} = \frac{V_m}{\sqrt{R_{cc}^2 + X_{cc}^2}} = \frac{V_m}{|Z_{cc}|}$$

es la amplitud de la corriente de cortocircuito permanente, donde Z_{cc} es la impedancia de corto-circuito del transformador reducido al primario o secundario siendo dadas las resistencias y reactivas de corto-circuito R_{cc} y X_{cc} respectivamente, en función de las de ambos devanados, o sea, el valor de la corriente se reduce a,

$$i_{cc}(t) = I_{mcc} [\text{sen}(\omega t - \theta_{cc}) + \text{sen} \theta_{cc} e^{-t/\tau_{cc}}] \quad [A] \quad (2.12)$$

La ecuación 2.12 se puede ver gráficamente en la figura 2.3

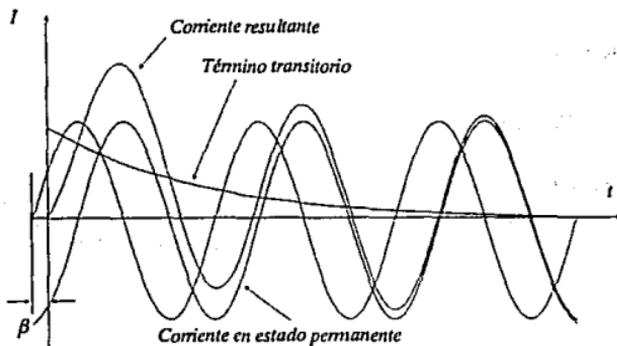


Figura 2.3 Componentes transitoria y permanente en un circuito lineal RL

La onda de corriente de la ecuación 2.12 consta de dos componentes:

- a) Una corriente alterna senoidal.

$$i_{cc}(t) = I_{mcc} [\text{sen}(\omega t - \theta_{cc})]$$

- b) Sobrepuesta a esta onda, una corriente transitoria. Esta involucra, como esperabamos, un término exponencial; sin embargo en $t = 0$, esta es igual y de signo opuesto a la corriente en estado permanente, asegurando así que la corriente inicie desde cero.

$$i_t = I_{mcc} \text{sen} \theta_{cc} e^{-t/\tau_{cc}}$$

2.5 Corriente ideal máxima

En el caso especial en el cual el interruptor cierre en el instante cuando $\varphi_{cc} = \beta$, o sea, $\theta_{cc} = 0$, el término transitorio es cero y la onda de corriente es simétrica, pero esta amplitud no se logra para $t = 0$ sino para cuando $\omega t - \theta_{cc} = \pi / 2$.

De otra forma, si el interruptor cierra cuando cuando $\theta_{cc} = \varphi_{cc} - \beta = \pi / 2$ o $3\pi / 2$ y $t = 0$, el término transitorio obtiene su máxima amplitud.

Se ve claramente que ambos máximos no se presentan simultáneamente por lo cual la suma aritmética es:

$$I_{cc} = i_t + I_{mcc} = 2I_{mcc} \quad [A] \quad (2.13)$$

En otras palabras, la primer cresta de la onda de corriente resultante se aproximará a dos veces la amplitud de cresta de la componente senoidal en estado permanente.

El valor de la corriente ideal máxima es inalcanzable en la practica, pero cuya magnitud servirá de punto de partida para relacionar otras magnitudes características de la onda transitoria.

Este fenómeno siempre se estudiará en base a $\theta_{cc} = \pi / 2$, lo que implica la máxima desviación vertical posible de la onda, ya que ello provoca las situaciones más desfavorables en cuanto a las intensidades de corriente transitoria se refiere, figura 2.4 Afortunadamente, cuando se produce un corto-circuito no suelen hallarse presentes estas condiciones, ya que al mismo tiempo el ángulo de corto-circuito φ_{cc} de tales circuitos es muy próximo a los 90° , el arco tiene mayores probabilidades de saltar al pasar la fem por un máximo, es decir, también para $\beta = \pm 90^\circ$, con lo cual $\theta_{cc} = 0$ o bien $\theta_{cc} \pm 2\pi$ y la componente transitoria máxima tiende a ser nula.

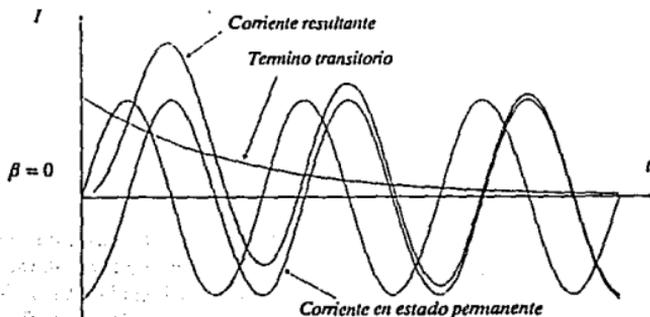


Figura 2.4 Máxima desviación de la onda de corriente

No obstante debe prevenirse el caso de mayor peligro, siempre posible aunque menos probable. Obsérvese que la evolución de la corriente transitoria de conexión se realiza con la máxima asimetría, alcanzando, los valores instantáneos más altos, si el cierre se produce en el momento de pasar la fem por cero $\beta = 0$ y $\theta_{cc} = \pi / 2$, mientras que si se conecta cuando la fem pasa por un máximo ($\theta_{cc} = 0$), la corriente evoluciona desde el primer momento simétricamente sin componente transitoria.

2.5.1 Corriente cuadrática ideal máxima

La ecuación 2.13 en función del valor eficaz queda:

$$I_{oc} = 2 I_{mcc} = 2 (\sqrt{2} I_{cc}) \quad [A] \quad (2.14)$$

donde el valor cuadrático es:

$$I_{oc}^2 = 8 I_{cc}^2 \quad [A^2] \quad (2.15)$$

Este valor llega a ser igual a 8 veces el cuadrado del valor eficaz de la corriente de régimen permanente, figura 2.5

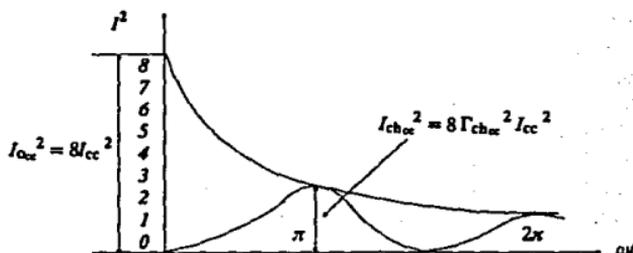


Figura 2.5 términos básicos de la corriente cuadrática transitoria en un circuito monofásico.

2.6 Corriente de cresta.

La corriente de cresta se define como la corriente instantánea máxima que llega a circular efectivamente por el circuito en el caso más desfavorable como se vio en la sección 2.5; la corriente de cresta I_{chcc} es siempre inferior al valor ideal I_{oc} , y lo más simple es definir a este valor por su relación con el valor ideal correlativo. Para este fin puede tenerse en

cuenta que, aunque no de un modo rigurosamente exacto, I_{chcc} viene a coincidir en el tiempo con el instante en que la componente permanente pasa por su primer máximo. I_{chcc} se presenta, pues, transcurrido el ángulo eléctrico π o sea tras el cierre del circuito, al cabo de un tiempo igual al semiperíodo $T/2$.

Por lo tanto, si introducimos los siguientes valores en la ecuación 2.12

$$\theta_{cc} = \pi/2 \quad \text{y} \quad t = T/2$$

$$I_{ch\alpha} = I_{mcc} \left[\text{sen} \left(\frac{\omega T}{2} - \frac{\pi}{2} \right) + \text{sen} \frac{\pi}{2} e^{-T/\pi\alpha} \right]$$

pero además como $\omega T = 2\pi$, y también;

$$\frac{T}{2\tau_{cc}} = \frac{\omega T}{2\omega\tau_{cc}} = \frac{\omega T}{2\omega} \frac{L_{cc}}{R_{cc}} = \frac{2\pi}{2 \tan \varphi_{cc}} = \frac{\pi}{\tan \varphi_{cc}}$$

la expresión de la corriente de cresta queda:

$$I_{ch\alpha} = I_{mcc} [e^{-\pi/\tan \varphi_{cc}} + 1] \quad [A] \quad (2.16)$$

Por lo que definiremos una relación entre la corriente de cresta y la corriente ideal denominada factor de cresta Γ_{chcc}

$$\Gamma_{chcc} = \frac{I_{chcc}}{I_{oc}} = \frac{I_{ch\alpha}}{2I_{mcc}} = \frac{1 + e^{-\pi/\tan \varphi_{cc}}}{2} \quad (2.17)$$

por lo que ahora definiremos la corriente de cresta por:

$$I_{ch\alpha} = \Gamma_{chcc} I_{oc} = \Gamma_{chcc} 2I_{mcc} \quad [A] \quad (2.18)$$

2.6.1 Corriente cuadrática de cresta.

Esta corriente corresponde al valor físico de la corriente de cresta de la intensidad transitoria para el caso de máxima asimetría y, como tal, experimenta una disminución apreciable con respecto al cuadrado de la corriente ideal. De acuerdo a la ecuación 2.15 y 2.17 tenemos:

$$I_{ch\alpha}^2 = \Gamma_{chcc}^2 I_{oc}^2 = 8 \Gamma_{chcc}^2 I_{cc}^2 \quad [A^2] \quad (2.19)$$

Estos valores cuadráticos se ilustran en la figura 2.5

2.7 Corriente eficaz cuadrática durante los primeros ν ciclos.

Esta corriente constituye la base para el cálculo de las pérdidas de energía por efecto de Joule en el circuito durante el intervalo transitorio considerado. La coincidencia de este intervalo con un número exacto de ciclos simplifica mucho el problema y es suficiente para cualquier cálculo energético que pueda derivarse del valor eficaz I_{cc} . El valor cuadrático del valor eficaz de una corriente con un período T es:

$$I_{\nu}^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i_{cc}^2 dt \quad (2.20)$$

y para un período νT se tiene:

$$I_{\nu\alpha}^2 = \frac{1}{\nu T} \int_0^{\nu T} i_{cc}^2 dt \quad (2.21)$$

Sustituyendo la ecuación 2.12 en la ecuación 2.21, integrando y simplificando se tiene.

$$I_{\nu\alpha}^2 = I_{cc}^2 \left[1 + \frac{\tau_{cc} (1 - e^{-2\nu T/\tau_{cc}})}{\nu T} \operatorname{sen}^2 \theta_{cc} + \dots \right. \\ \left. \dots + \frac{2(1 - e^{-\nu T/\tau_{cc}})}{\nu T (1 + \omega^2 \tau_{cc}^2)} (\omega \tau_{cc}^2 \operatorname{sen} 2\theta_{cc} + 2\tau_{cc} \operatorname{sen}^2 \theta_{cc}) \right] \quad (2.22)$$

2.7.1 Corriente simétrica.

Con $\theta_{cc} = 0$, el cuadrado de la corriente eficaz, independientemente del intervalo νT que se elija queda reducido a:

$$I_{\nu\alpha}^2 = I_{cc}^2 \quad [A^2] \quad (2.23)$$

La corriente eficaz durante ν ciclos es invariablemente igual al valor eficaz de la corriente permanente de corto-circuito, resultado obvio ya que no existe componente transitoria, lo que equivale a decir que la corriente de régimen permanente se establece desde el primer momento.

2.7.2 Corriente asimétrica.

Con $\theta_{cc} = \pi/2$ se tiene:

$$I_{\nu\alpha}^2 = I_{cc}^2 \left[1 + \frac{\tau_{cc}}{\nu T} \left[(1 - e^{-2\nu T/\tau_{cc}}) + \frac{4}{1 + \omega^2 \tau_{cc}^2} (1 - e^{-\nu T/\tau_{cc}}) \right] \right] \quad (2.24)$$

Se observa fácilmente que a medida que $\nu T \rightarrow \infty$, los exponenciales tienden a cero, así como $\tau_{cc}/\nu T$, con lo cual, la corriente eficaz transitoria se aproxima al valor de régimen permanente, puesto que al alargarse el tiempo νT disminuye la influencia de la componente transitoria. La ecuación 2.24 puede escribirse de otra forma, en base a parámetros conocidos del siguiente factor,

$$\frac{\tau_{cc}}{\nu T} = \frac{\tau_{cc} f}{\nu} = \frac{\frac{L_{cc} f}{R_{cc}}}{\nu} = \frac{\frac{2\pi f L_{cc}}{2\pi R_{cc}}}{\nu} = \frac{X_{cc}}{2\pi \nu R_{cc}} = \frac{\tan \varphi_{cc}}{2\pi \nu} = \frac{\tan \varphi_{cc}}{\alpha \nu} \quad (2.25)$$

En donde $\alpha \nu$ representa el ángulo en radianes cubierto por los ν períodos tomados en consideración,

$$\alpha \nu = \nu(2\pi) \quad [\text{rad}] \quad (2.26)$$

Y además

$$1 + \omega^2 \tau_{cc}^2 = 1 + \omega^2 \frac{L_{cc}^2}{R_{cc}^2} = 1 + \frac{X_{cc}^2}{R_{cc}^2} = 1 + \tan^2 \varphi_{cc} = \frac{1}{\cos^2 \varphi_{cc}} \quad (2.27)$$

por lo que sustituyendo las ecuaciones 2.25 y 2.27 en la ecuación 2.24, se obtiene:

$$I_{V_{cc}}^2 = I_{cc}^2 \left\{ 1 + \frac{\tan \varphi_{cc}}{\alpha \nu} \left[(1 - e^{-2\alpha \nu / \tan \varphi_{cc}}) + 4 \cos^2 \varphi_{cc} (1 - e^{-\alpha \nu / \tan \varphi_{cc}}) \right] \right\} [A^2] \quad (2.28)$$

Si al término entre llaves de la ecuación 2.28 lo hacemos igual con

$$\Gamma_{V_{cc}}^2 = \left\{ 1 + \frac{\tan \varphi_{cc}}{\alpha \nu} \left[(1 - e^{-2\alpha \nu / \tan \varphi_{cc}}) + 4 \cos^2 \varphi_{cc} (1 - e^{-\alpha \nu / \tan \varphi_{cc}}) \right] \right\}$$

La ecuación 2.28 se convierte en:

$$\boxed{I_{V_{cc}}^2 = I_{cc}^2 \Gamma_{V_{cc}}^2} \quad [A^2] \quad (2.29)$$

2.8 Valores relativos en por unidad (p.u.)

Un sistema eléctrico esta formado por diversos elementos, como lo son: generadores, motores, transformadores, conductores, etc. La representación de estos equipos, para el análisis de su comportamiento bajo diferentes condiciones dentro del sistema debe hacerse de una manera consistente. Es por esto que al determinar las distintas magnitudes que caracterizan la evolución de la corriente de corto-circuito durante el proceso transitorio, es preferible operar con los valores relativos de las mismas referidos a los

valores nominales del transformador tomados como valores de comparación, es decir, expresar dichas magnitudes en pu o en % de estos mismos valores.

En cuanto a los valores de referencia pueden tomarse; para las caídas de tensión en resistencias, reactivas e impedancias, la tensión nominal eficaz del transformador; para las intensidades la corriente eficaz nominal, y para los parámetros ohmicos (resistencias, reactivas e impedancias internas), la impedancia de carga nominal; todo ello, por fase.

2.8.1 Resistencia, reactiva e impedancia relativas de corto-circuito.

Se entiende por impedancia nominal Z_n del transformador la relación de la tensión V_n a la intensidad I_n , valores nominales eficaces por fase, tomados sobre el mismo lado, primario o secundario.

Si Designamos por R_{cc} , X_{cc} y Z_{cc} a los respectivos valores absolutos primarios o secundarios, la resistencia, reactiva e impedancia de corto-circuito referidas al valor Z_n del mismo lado, vendrán dadas por las siguientes relaciones invariables.

$$R_{cc\text{pu}} = \frac{R_{cc}}{Z_n}, \quad X_{cc\text{pu}} = \frac{X_{cc}}{Z_n} \quad \text{y} \quad Z_{cc\text{pu}} = \frac{Z_{cc}}{Z_n} \quad [^{\circ}/1] \quad (2.30)$$

2.8.2 Caídas nominales o a plena carga relativas, $V_{R\text{pu}}$, $V_{X\text{pu}}$ y $V_{Z\text{pu}}$.

Las caídas de resistencia, reactiva e impedancia, con la corriente nominal I_n , referidas a la tensión nominal V_n del transformador en p.u., son características bien conocidas que suelen utilizarse en el estudio del régimen estacionario de servicio, y vienen dadas por:

$$V_{R\text{pu}} = \frac{V_R}{V_n} = \frac{R_{cc} I_n}{V_n} = \frac{R_{cc}}{Z_n} = R_{cc\text{pu}} \quad (2.31)$$

$$V_{X\text{pu}} = \frac{V_X}{V_n} = \frac{X_{cc} I_n}{V_n} = \frac{X_{cc}}{Z_n} = X_{cc\text{pu}} \quad (2.32)$$

$$V_{Z\text{pu}} = \frac{V_Z}{V_n} = \frac{Z_{cc} I_n}{V_n} = \frac{Z_{cc}}{Z_n} = Z_{cc\text{pu}} \quad (2.33)$$

Expresadas de esta forma, las caídas de tensión coinciden además numéricamente con los parámetros ohmicos respectivos y son también independientes del lado del transformador.

2.8.3 Corriente permanente de corto-circuito en p.u.

Como en la ecuación 2.12 interviene el factor que determina la amplitud de la corriente permanente, será necesario conocer previamente esta última, la cual valoraremos en términos relativos de la corriente nominal eficaz del mismo lado del transformador. La corriente eficaz de corto-circuito en régimen permanente es:

$$I_{cc} = \frac{V_n}{Z_{cc}} \quad (2.34)$$

Referida a la corriente nominal se tiene:

$$I_{ccpu} = \frac{I_{cc}}{I_n} = \frac{1}{V_{zpu}} = \frac{1}{Z_{ccpu}}$$

$$\boxed{I_{ccpu} = \frac{1}{Z_{ccpu}}} \quad [^{\circ}/1] \quad (2.35)$$

La expresión anterior se establece análogamente si todas las magnitudes se contemplan del lado primario o secundario. De la ecuación 2.35 observamos que numéricamente, la corriente eficaz permanente de corto-circuito, en p.u., es igual a la impedancia inversa relativa del transformador.

2.8.4 Corriente instantánea de corto-circuito en pu.

La amplitud de la corriente senoidal en régimen permanente es:

$$I_{mccpu} = \frac{I_{mcc}}{I_n} = \frac{\sqrt{2}I_{cc}}{I_n} = \sqrt{2} I_{ccpu} = \frac{\sqrt{2}}{V_{zpu}} = \frac{\sqrt{2}}{Z_{ccpu}} \quad (2.36)$$

Transformemos ahora ligeramente la ecuación 2.12 para ponerla a su vez en forma adimensional, con

$$I_{ccpu} = \frac{I}{\tau_{cc}} \quad (2.37)$$

es decir, tomando en cuenta como módulos a la corriente nominal eficaz, y para el tiempo a la constante del transformador en corto-circuito τ_{cc} , siendo:

$$\tau_{cc} = \frac{L_{cc}}{R_{cc}} = \frac{\omega L_{cc}}{\omega R_{cc}} = \frac{\tan \varphi_{cc}}{\omega} \quad ; \quad \omega \tau_{cc} = \tan \varphi_{cc} \quad (2.38)$$

Sustituyendo la ecuación 2.36, 2.37 y 2.38 en la ecuación 2.12 se encuentra la fórmula general de la corriente instantánea primaria o secundaria en p.u. de la intensidad eficaz nominal del mismo arrollamiento.

$$i_{ccpu} = \frac{\sqrt{2}}{Z_{ccpu}} [e^{-t_{ccpu}} \operatorname{sen} \theta_{cc} + \operatorname{sen} (t_{ccpu} \tan \varphi_{cc} - \theta_{cc})] \quad (2.39)$$

En el caso más desfavorable de la corriente transitoria, cuando $\theta_{cc} = \pi / 2$ se reduce:

$$i_{ccpu} = \frac{\sqrt{2}}{Z_{ccpu}} [e^{-t_{ccpu}} + \operatorname{sen} (t_{ccpu} \tan \varphi_{cc} - \frac{\pi}{2})] \quad [^{\circ}/i] \quad (2.40)$$

Debe notarse que la expresión $t_{ccpu} \tan \varphi_{cc} = \omega t$, es el valor numérico en radianes del ángulo variable correlativo a cada instante t considerado.

2.8.5 Corriente relativa ideal máxima.

Si referimos la ecuación 2.13 al valor eficaz de la corriente nominal del transformador, tenemos,

$$I_{\alpha ccpu} = \frac{I_{\alpha cc}}{I_n} = \frac{2 I_{mcc}}{I_n} = \frac{2\sqrt{2} I_{cc}}{I_n} = 2\sqrt{2} I_{ccpu} = \frac{2\sqrt{2}}{V_{ccpu}} = \frac{2\sqrt{2}}{Z_{ccpu}}$$

$$I_{\alpha ccpu} = \frac{2\sqrt{2}}{Z_{ccpu}} \quad [^{\circ}/i] \quad (2.41)$$

Para los transformadores monofásicos, y por extensión también para los transformadores trifásicos en caso de corto-circuito simétrico, la corriente ideal máxima, sólo viene afectada por la impedancia de corto-circuito en valor relativo.

2.8.6 Corriente relativa de cresta.

Esta corriente corresponde al primer máximo efectivo de la corriente transitoria. De manera similar, si referimos la ecuación 2.16 al valor eficaz de la corriente nominal.

$$I_{chccpu} = \frac{I_{chcc}}{I_n} = \sqrt{2} I_{mccpu} [1 + e^{-\pi/\tan \varphi_{cc}}] \quad (2.42)$$

o con relación al factor de cresta:

$$I_{ch\alpha_{pu}} = \frac{2\sqrt{2}}{Z_{cc\,pu}} \Gamma_{ch\alpha} \quad [^{\circ}/i] \quad (2.43)$$

Con respecto a la corriente ideal máxima, tanto en valores absolutos como relativos, se conserva para la corriente de cresta la misma relación de la ecuación 2.17. La corriente de cresta es peligrosa sobre todo por sus efectos dinámicos sobre los devanados, ya que ni los más rápidos sistemas de protección consiguen interrumpir el circuito antes de su aparición, y los esfuerzos entre conductores son proporcionales al cuadrado de la misma. Con la corriente de cresta de corto-circuito vienen a ser mayores que los que se producen con el valor máximo o de cresta de la intensidad en servicio normal.

2.8.7 Constante de tiempo del transformador en corto-circuito.

Además de las expresiones generales de la constante de tiempo para el transformador en corto-circuito señaladas en la sección 2.4.2 y 2.8.4, es cómodo calcularla directamente en función de las caídas relativas, que constituyen los datos más comunes del transformador, de tal forma que:

$$\tau_{cc} = \frac{\tan \varphi_{cc}}{\omega} = \frac{X_{cc\,pu}}{\omega R_{cc\,pu}} = \frac{X_{cc\,pu}}{R_{cc\,pu}} \frac{1}{2\pi f} = \frac{V_{X_{cc\,pu}}}{V_{R_{cc\,pu}}} \frac{1}{2\pi f} \quad [s] \quad (2.44)$$

2.8.8 Corriente eficaz cuadrática relativa en el intervalo de los ν primeros ciclos.

Esta corriente se define como la relación entre el cuadrado del valor eficaz de la corriente de corto-circuito en el intervalo νT considerado y el cuadrado de la corriente eficaz nominal, ambas del mismo lado.

$$I_{V_{cc\,pu}}^2 = \frac{I_{V_{cc}}^2}{I_n^2} \quad (2.45)$$

Dividiendo ambos miembros de la ecuación 2.29 por el valor eficaz cuadrático y puesto que la corriente eficaz permanente de corto-circuito se halla con respecto a la eficaz nominal en la ecuación 2.35, tendremos

$$I_{V_{cc\,pu}}^2 = \frac{I_{V_{cc}}^2}{I_n^2} = \frac{I_{V_{cc}}^2 I_{cc}^2}{I_{cc}^2 I_n^2} = \Gamma_{V_{cc}}^2 \left(\frac{1}{Z_{cc\,pu}} \right)^2$$

$$I_{V_{cc\,pu}}^2 = \Gamma_{V_{cc}}^2 \left(\frac{1}{Z_{cc\,pu}} \right)^2 \quad (2.46)$$

2.9 Potencias de corto-circuito.

Evidentemente, la potencia cedida por el transformador al exterior desde el momento en que se inicia el corto-circuito en los bornes es nula. Las únicas potencias que entran en juego se circunscriben en el ámbito del propio transformador tanto si se trata de potencias activas, reactivas o aparentes.

La potencia activa consumida se reduce a las pérdidas en el cobre y en el hierro y que para todos los fines prácticos, las pérdidas en el hierro se pueden considerarse despreciables comparadas con las de los devanados.

Todas las potencias serán expresadas por sus valores relativos, referidos a la potencia aparente nominal del transformador, tensión y corrientes eficaces nominales por fase.

2.9.1 Potencia activa media relativa de corto-circuito permanente.

La corriente alterna simétrica I_{mcc} y el valor eficaz I_{cc} producen en la resistencia de corto-circuito R_{cc} una pérdida de potencia, como única fuente de energía absorbida, dada por:

$$P_{cc} = R_{cc} I_{cc}^2 \quad [W]$$

referida a la potencia aparente nominal,

$$P_{ccpa} = \frac{P_{cc}}{S_n} = \frac{R_{cc} I_{cc}^2}{V_n I_n} = \frac{R_{cc} I_n I_{cc}^2}{V_n I_n^2}$$

y teniendo en cuenta las ecuaciones 2.31 y 2.35 la ecuación anterior queda:

$$P_{ccpa} = \frac{R_{ccpa}}{Z_{ccpa}^2} \quad [^{\circ}/1] \quad (2.47)$$

Este valor medio es constante, pero la potencia instantánea de corto-circuito permanente oscila a una frecuencia $2f$, doble que de la corriente como la de todo sistema monofásico.

2.9.2 potencia activa de cresta en corto-circuito.

Despreciando la variación de la resistencia de los arrollamientos por acción del calentamiento, las pérdidas de potencia en todo momento son proporcionales al cuadrado de la corriente instantánea en los devanados, y esta es la única potencia activa a tener en

cuenta. Previendo la máxima desviación posible de la onda de corriente como se vio en la sección 2.5 tenemos que:

$$P_{chcc} = R_{cc} I_{chcc}^2 \quad [W] \quad (2.48)$$

refiriendo ahora la ecuación anterior a la potencia aparente nominal

$$P_{chccpu} = \frac{P_{chcc}}{S_n} = \frac{R_{cc} I_{chcc}^2}{V_n I_n} \quad (2.49)$$

teniendo presentes las ecuaciones 2.19, 2.31 y 2.35 la ecuación anterior se convierte en:

$$P_{chccpu} = 8 \Gamma_{chcc}^2 \frac{R_{cc} I_n I_{cc}^2}{V_n I_n^2} = 8 \Gamma_{chcc}^2 \frac{R_{ccpu}}{Z_{ccpu}^2}$$

$$P_{chccpu} = 8 \Gamma_{chcc}^2 \frac{R_{ccpu}}{Z_{ccpu}^2} \quad [0/1] \quad (2.50)$$

Toda la potencia monofásica es variable y durante el período transitorio la variación se acentúa aún más por el aumento que experimentan las corrientes instantáneas máximas.

2.9.3 Potencia activa media en valor relativo. (energía de pérdidas por efecto Joule durante el corto-circuito).

Definiremos como tal potencia la que corresponde simplemente a las pérdidas por resistencia que se derivan del valor eficaz cuadrático de la corriente durante los primeros ν ciclos del cortocircuito.

En otras palabras, son las pérdidas por efecto Joule, a lo largo de los ν ciclos completos que pueden ser los que transcurren contados en exceso hasta el instante en que se inicia la apertura del interruptor. Teniendo en cuenta la expresión 2.29 tenemos que:

$$P_{Vcc} = R_{cc} I_{Vcc}^2 = \Gamma_{Vcc}^2 I_{cc}^2 R_{cc} \quad [W]$$

y en valores relativos,

$$P_{Vccpu} = \frac{P_{Vcc}}{S_n} = \Gamma_{Vcc}^2 \frac{R_{cc} I_{cc}^2}{V_n I_n} = \Gamma_{Vcc}^2 \frac{R_{cc} I_n I_{cc}^2}{V_n I_n^2} = \Gamma_{Vcc}^2 R_{ccpu} \left\{ \frac{1}{Z_{ccpu}} \right\}^2$$

$$P_{Vccpu} = \Gamma_{Vcc}^2 R_{ccpu} \left[\frac{1}{Z_{ccpu}} \right]^2 \quad [0/1] \quad (2.51)$$

Esta potencia, transformada toda ella en calor, provoca una sobreelevación de temperatura, principalmente en los devanados, pero puede ser reducida en general a límites no peligrosos gracias al disparo de los interruptores o a la operación de los fusibles en un tiempo conveniente.

Es distinto de lo que sucede con las fuerzas electrodinámicas, proporcionales al cuadrado de las intensidades instantáneas, que aparecen ya con su máximo efecto en los primeros ciclos del corto-circuito y que no pueden ser evitadas por dispositivos de protección mecánicos o térmicos.

2.10 Corto-circuito de los transformadores trifásicos

En este análisis se supone que el transformador está conectado a una red de potencia infinita; y además, los parámetros nominales del transformador referidos a cualquiera de los lados.

Las tensiones de un sistema trifásico simétrico están defasadas entre sí 120° eléctricos, donde V_m representa el valor máximo común a las tres tensiones, por fase, con lo cual las ecuaciones de las tres tensiones serán:

$$V_1 = V_m \operatorname{sen} (\omega t + \beta) \quad (2.52a)$$

$$V_2 = V_m \operatorname{sen} (\omega t + \beta - 120^\circ) \quad (2.52b)$$

$$V_3 = V_m \operatorname{sen} (\omega t + \beta - 240^\circ) \quad (2.52c)$$

Considerando los valores instantáneos iniciales y los parámetros R y L por fase del circuito como constantes, se establecerá en cada una de las tres fases la intensidad transitoria conforme a las ecuaciones que se desprenden de la ecuación 2.12 obtenida para el circuito monofásico; teniendo en cuenta las mismas consideraciones establecidas en la sección 2.4, se obtiene:

$$i_{cc1} = I_{cc} [e^{-t/\tau_{cc}} \operatorname{sen} \theta_{cc} + \operatorname{sen} (\omega t - \theta_{cc})] \quad (2.53a)$$

$$i_{cc2} = I_{cc} [e^{-t/\tau_{cc}} \operatorname{sen} (\theta_{cc} + 120^\circ) + \operatorname{sen} (\omega t - \theta_{cc} - 120^\circ)] \quad (2.53b)$$

$$i_{cc3} = I_{cc} [e^{-t/\tau_{cc}} \operatorname{sen} (\theta_{cc} + 240^\circ) + \operatorname{sen} (\omega t - \theta_{cc} - 240^\circ)] \quad (2.53c)$$

La ecuación 2.53a es una nueva transcripción de la fórmula fundamental 2.12; las dos restantes, no expresan sino el mismo fenómeno para otras dos tensiones defasadas sucesivamente 120° y 240° eléctricos en retraso respecto a la primera.

Es importante hacer notar que, la simetría del régimen permanente queda modificada durante el período transitorio, sin embargo, se conserva la propiedad más característica de un sistema trifásico equilibrado; la suma de los valores instantáneos de las tres intensidades es constantemente nula.

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad (2.54)$$

El sistema trifásico equilibrado a pesar de no poseer neutro mantiene un perfecto equilibrio de corrientes y tensiones durante el período transitorio de conexión. No así, como vamos a ver en cuanto a las potencias.

La uniformidad de estas características, tan apreciable en los sistemas trifásicos, desaparece en estado transitorio y los valores instantáneos resultantes de las tres fases sufren fuertes oscilaciones, incluso dentro de un mismo ciclo de corriente, dando origen a vibraciones mecánicas, irregularidades y perturbaciones altamente perjudiciales. Con respecto a las desviaciones verticales que experimentan las ondas de corriente en los primeros ciclos, la situación más favorable correspondería a aquella fase para la cual el valor del ángulo de entrada, β , ($\beta - 120^\circ$) o ($\beta - 240^\circ$) fuese tal que su diferencia respecto a φ_{cc} alcance los 90° . Evidentemente, esta situación no puede satisfacer a la vez más que una fase. Suponiendo que se trata de la fase 1; entonces con $\theta_{cc} = \pi / 2$ el sistema de ecuaciones 2.53a - 2.53c se reduce a:

$$i_{cc1} = I_{mcc} [e^{-t/\tau_{cc}} - \cos \omega t] \quad (2.55a)$$

$$i_{cc2} = I_{mcc} [-\frac{1}{2} e^{-t/\tau_{cc}} - \cos (\omega t - 120^\circ)] \quad (2.55b)$$

$$i_{cc3} = I_{mcc} [-\frac{1}{2} e^{-t/\tau_{cc}} - \cos (\omega t - 240^\circ)] \quad (2.55c)$$

2.10.1 Corriente ideal máxima y corriente de cresta.

Los valores de corriente ideal máxima y de cresta de la fase afectada por las condiciones más desfavorables responden al mismo proceso de un circuito monofásico, y por lo tanto las ecuaciones para estas corrientes son idénticas a las ecuaciones 2.13 y 2.18

2.10.2 Suma de corrientes cuadráticas.

Evidentemente, la evolución de los cuadrados de los valores instantáneos en las tres fases será distinta por el defasamiento existente entre las tres ondas. La suma de estos cuadrados se mantiene invariable una vez rebasado el intervalo transitorio, es decir en régimen permanente, pero ofrece una fuerte oscilación durante dicho intervalo que,

aunque teóricamente es de duración infinita, puede considerarse extinguido al cabo de un tiempo t igual a tres o cuatro veces τ_{cc} . Distinguiremos, pues el estado simétrico de aquel otro asimétrico que se extiende hasta $t \approx 4 \tau_{cc}$

2.10.2.1 En régimen permanente.

La suma de los valores instantáneos de las intensidades cuadráticas en las tres fases, con corrientes senoidales idénticas, pero defasadas entre sí 120° eléctricos, es constante (independiente del tiempo t) e igual a $3 I_{cc}^2$, triple del cuadrado del valor eficaz de la componente alterna por fase a la cual ha quedado reducido el curso de las corrientes una vez rebasado el período transitorio.

Tendremos, pues, en régimen permanente, pudiendo calcularse así ya a partir de un tiempo $t \gg 4 \tau_{cc}$

$$\sum i^2 = i_1^2 + i_2^2 + i_3^2 = 3I_{cc}^2 \quad (2.56)$$

2.10.2.2 Instantáneas transitorias.

Partiendo de las ecuaciones correspondientes a la intensidades por fase 2.53a - 2.53c. Elevando cada una de ellas al cuadrado, sumando y efectuando las simplificaciones adecuadas se deduce que la suma cuadrática propuesta es en todo instante, independiente de θ_{cc} , y por tanto, de la naturaleza del circuito conectado y del momento de la conexión, y que en forma de ecuación se tiene:

$$\sum i_{cc}^2 = i_{cc1}^2 + i_{cc2}^2 + i_{cc3}^2 = 3I_{cc}^2 (1 + e^{-2t/\tau_{cc}} - 2e^{-t/\tau_{cc}} \cos \omega t)$$

$$\boxed{\sum i_{cc}^2 = 3I_{cc}^2 (1 + e^{-2\omega t / \tan \phi_{cc}} - 2e^{-\omega t / \tan \phi_{cc}} \cos \omega t)} \quad (2.57)$$

La ecuación 2.57 consta de tres términos: el primero, es la suma cuadrática constante de régimen permanente; otro, transitorio decreciente que iniciándose con el mismo valor $3I_{cc}^2$, para ($t = 0$) decae sucesivamente a ritmo exponencial rápido; y un tercero, alterno de amplitud igual a la suma inicial de los dos anteriores pero de signo contrario, tal como se requiere para dar en este instante una resultante nula; la oscilación se amortigua al ritmo de la exponencial $e^{-t/\tau_{cc}}$, más lentamente, que el término anterior; al cabo de cierto intervalo (para $t > 4 \tau_{cc}$) la expresión queda prácticamente reducida al término constante $3I_{cc}^2$ de régimen permanente.

La suma de las corrientes cuadráticas del sistema trifásico equilibrado dentro del período transitorio de conexión, tan ligada a la potencia activa puesta en juego durante el mismo intervalo, no permanece ni mucho menos constante, sino que sigue el curso de una fuerte

oscilación, cuyos efectos hay que tener en cuenta en ciertas ocasiones (conexión de transformadores muy potentes, cortocircuitos, variaciones bruscas de carga etc.,...).

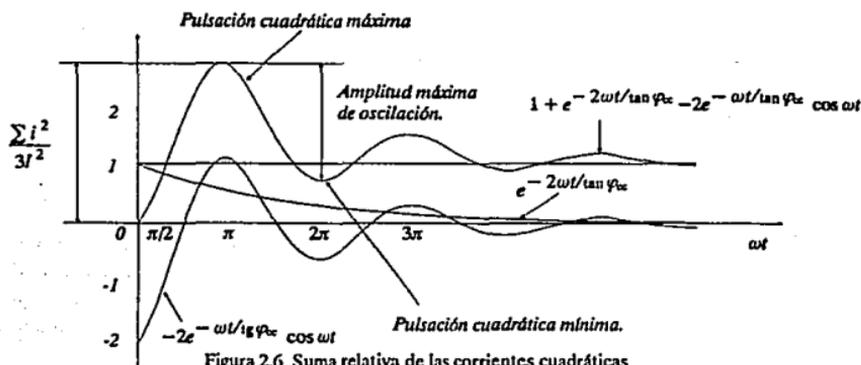


Figura 2.6 Suma relativa de las corrientes cuadráticas de un sistema trifásico.

La ecuación 2.57 puede ponerse, dándole un significado más general, en forma de relación con respecto a la suma cuadrática de régimen permanente. Así tenemos:

$$\frac{\sum i^2}{3I_{cc}^2} = 1 + e^{-2\omega t / \tan \varphi_{cc}} - 2e^{-\omega t / \tan \varphi_{cc}} \cos \omega t \quad (2.58)$$

En la figura 2.6 se ilustra una de estas curvas cuadráticas relativas mostrando sus tres componentes: constante, transitoria y oscilatoria de amortiguamiento progresivo. Se debe de notar que esta relación, salvo en el instante de cierre ($t = 0$), no puede reducirse a cero en otro momento y tiende asintóticamente hacia la unidad a medida que t aumenta.

2.10.2.3 Oscilaciones cuadráticas trifásicas.

El carácter oscilatorio de las sumas de las intensidades cuadráticas instantáneas, reflejado en el tercer término de la ecuación 2.57, induce a valorar los máximos y mínimos de la oscilación.

Los instantes en que se producen se hallan normalmente derivando la ecuación 2.57 respecto a t e igualando a cero. Y sustituyendo estos valores de la variable independiente en 2.57 aparecen los máximos y mínimos mencionados.

Los valores de ωt para los cuales la suma cuadrática instantánea pasa por dichos límites debe satisfacer la siguiente ecuación,

$$\cos \omega t + \tan \varphi_{cc} \operatorname{sen}(\omega t) = e^{-\omega t / \tan \varphi_{cc}} \quad (2.59)$$

La figura 2.7 muestra las raíces de la ecuación 2.59. Para un caso en particular se ha supuesto $\operatorname{tg} \varphi_{cc} = L_{cc} / R_{cc} = 4$, dibujándose todos los términos en el intervalo de $\omega t = 0$ a $\omega t = 2\pi$. Las intersecciones de las gráficas 1 y 2, en los puntos a y b, nos proporcionan por sus abscisas las raíces buscadas, las cuales como puede observarse, se encuentran muy próximas a los ángulos eléctricos π , 2π ,... Estas serían exactamente las raíces de la ecuación 2.57 si el punto a de intersección coincidiese con a', b con b',... lo que ocurriría tan sólo para $\tan \varphi_{cc} = \infty$, es decir en un circuito puramente inductivo sin resistencia ohmica ni amortiguamiento alguno.

Sin embargo, con un valor tan moderado de $\tan \varphi_{cc} = 4$, muy inferior por lo general a los que se encuentran en casi todos los casos de aplicación práctica (corto-circuito de transformadores y líneas), las diferencias de estas raíces respecto a los múltiplos de π son lo bastante pequeñas para que podamos tomar estas últimas como soluciones.

Es fácil comprobar que la primera de dichas raíces $\omega t = \pi$, corresponde a un máximo y la segunda $\omega t = 2\pi$, a un mínimo.

Si sustituimos las raíces en la ecuación 2.57, tendremos muy aproximadamente los valores del máximo y del mínimo cuadrático, y la diferencia entre ambos, nos da el valor de la máxima oscilación.

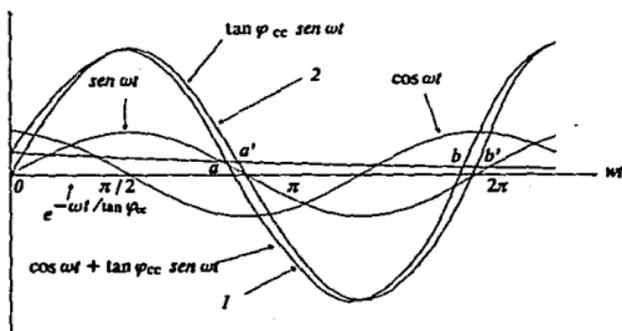


Figura 2.7 Determinación gráfica de las raíces de la ecuación 2.59

» Máxima suma cuadrática.

Para $\omega t = \pi$, la ecuación 2.57 queda como:

$$\sum \Delta i_{cc}^2 = 3 I_{cc}^2 (1 + e^{-2\pi/\omega\varphi_{cc}} + 2e^{-\pi/\omega\varphi_{cc}}) \quad (2.60)$$

Con un factor multiplicador definido por:

$$\Gamma \Delta i_{cc}^2 = 1 + e^{-2\pi/\omega\varphi_{cc}} + 2e^{-\pi/\omega\varphi_{cc}} \quad (2.61)$$

El factor multiplicador crece asintóticamente hacia 4 a medida que $\tan \varphi_{cc} \rightarrow \omega$, es decir, el máximo cuadrático instantáneo llega casi a cuadruplicar el de régimen estacionario cuando el circuito es puramente inductivo.

- » Primer mínimo de la suma cuadrática.

Para $\omega t = 2\pi$, la ecuación 2.57 se reduce a:

$$\sum \nabla i_{cc}^2 = 3 I_{cc}^2 (1 + e^{-4\pi/\omega\varphi_{cc}} - 2e^{-2\pi/\omega\varphi_{cc}}) \quad (2.62)$$

Con un factor de reducción,

$$\Gamma \nabla i_{cc}^2 = 1 + e^{-4\pi/\omega\varphi_{cc}} - 2e^{-2\pi/\omega\varphi_{cc}} \quad (2.63)$$

- » Amplitud máxima de la oscilación trifásica cuadrática.

Como mencionamos anteriormente, corresponde a la diferencia del primer máximo y el primer mínimo. Por lo que si restamos la ecuación 2.62 de 2.60, realizando operaciones y reduciendo términos obtenemos:

$$\sum \Delta i_{cc}^2 = 3 I_{cc}^2 (3e^{-2\pi/\omega\varphi_{cc}} + 2e^{-\pi/\omega\varphi_{cc}} - e^{-4\pi/\omega\varphi_{cc}}) \quad (2.64)$$

siendo el factor de oscilación máxima:

$$\Gamma \Delta i_{cc}^2 = (3e^{-2\pi/\omega\varphi_{cc}} + 2e^{-\pi/\omega\varphi_{cc}} - e^{-4\pi/\omega\varphi_{cc}}) \quad (2.65)$$

2.10.3 Suma de la Corriente eficaz durante los ν primeros ciclos.

Viene a responder a la potencia alterna media del sistema durante el intervalo transitorio elegido. La corriente eficaz en una de las fases queda definida por la ecuación 2.21. Así es que la suma de los cuadrados de estos tres valores en el conjunto trifásico valdrá,

$$\sum I_{\omega}^2 = \frac{1}{\nu T} \int_0^{\nu T} (i_1^2 + i_2^2 + i_3^2) dt \quad (2.66)$$

El paréntesis subintegral no es más que la suma de las corrientes cuadráticas instantáneas, cuya expresión independiente de θ_{cc} se encuentra dada por la ecuación 2.57. Si ésta la sustituimos en la ecuación 2.66, integrando y simplificando se tiene:

$$\sum I_{\omega}^2 = 3 I_{cc}^2 \left\{ 1 + \frac{r}{2\nu T} (1 - e^{-2\nu T}) + \frac{2r}{\nu T} \frac{1 - e^{-\nu T}}{1 + \omega^2 r^2} \right\}$$

referida esta suma de corrientes eficaces cuadráticas a las tres fases en régimen permanente,

$$\frac{\sum I_{\omega}^2}{3 I^2} = \Gamma_{\nu(\theta)_{cc}}^2 \quad (2.67)$$

siendo:

$$\Gamma_{\nu(\theta)_{cc}}^2 = 1 + \frac{r}{\nu T} \left\{ \frac{(1 - e^{-2\nu T})}{2} + \frac{2}{1 + \omega^2 r^2} (1 - e^{-\nu T}) \right\}$$

y teniendo en cuenta las ecuaciones 2.25 y 2.27 obtenemos,

$$\Gamma_{\nu(\theta)_{cc}}^2 = 1 + \frac{\tan \varphi_{cc}}{\alpha \nu} \left\{ \frac{(1 - e^{-2\alpha \nu / \omega \nu \varphi_{cc}})}{2} + 2 \cos^2 \varphi_{cc} (1 - e^{-\alpha \nu / r}) \right\} \quad (2.67a)$$

El exceso de las corrientes eficaces cuadráticas, a lo largo del mismo número de ciclos, sobre la onda de régimen permanente, se reduce, pues, a la mitad para el sistema trifásico. En cualquier caso, la relación anterior es tanto más elevada cuanto menor es el número de ciclos contados dentro del proceso transitorio y tiende a la unidad en la medida que $t \rightarrow \infty$

2.11 Potencias de corto-circuito de los transformadores trifásicos.

Durante el corto-circuito, al ser nula la tensión en los bornes de salida, toda la energía activa consumida se disipa prácticamente en las resistencias ohmicas de los devanados y circunstancialmente en algunos elementos próximos, al alcance de los flujos de dispersión; las pérdidas en estos elementos las supondremos adicionadas en la resistencia de los devanados, incrementándose el valor asignado a ésta. En régimen transitorio estas pérdidas adicionales suelen ser algo mayores, puesto que los flujos de dispersión son considerables. El estudio de las potencias de corto-circuito puede efectuarse en cualquier caso prescindiendo de las pérdidas en el hierro y de la potencia magnetizante, muy reducidas en estas circunstancias.

2.11.1 Potencia activa en corto-circuito permanente.

El efecto Joule en estas condiciones de perfecta simetría para cada una de las tres ondas de corriente I_{mcc} de valor eficaz I_{cc} , y con una resistencia de corto-circuito por fase, R_{cc} , incluyendo los efectos adicionales es:

$$P(3)_{cc} = 3 R_{cc} I_{cc}^2 \quad [W] \quad (2.68)$$

Si referimos la ecuación anterior a la potencia aparente nominal y de acuerdo con las ecuaciones 2.31 y 2.35 se tiene,

$$P(3)_{ccpu} = \frac{P(3)_{cc}}{S_n} = \frac{R_{ccpu}}{Z_{ccpu}^2} \quad (2.69)$$

que es la misma expresión de la sección 2.9.1, pero con la diferencia de que ahora se trata de una potencia rigurosamente constante mientras que en aquel otro caso era pulsante de frecuencia $2f$.

2.11.2 Potencia activa trifásica de cresta en cortocircuito.

Viene dada ya como potencia de un significado físico real por el efecto Joule que corresponde al máximo valor efectivo de la suma de las intensidades cuadráticas.

$$P(3)_{hcc} = R_{cc} \sum_{\Delta} i_{cc}^2 \quad (2.70)$$

En cierto modo ésta es la que podría llamarse potencia activa combinada de cresta. Sustituyendo las ecuaciones 2.60 y 2.61 en 2.70 obtenemos:

$$P(3)_{hcc} = 3 \Gamma \Delta (i)_{cc}^2 I_{cc}^2 R_{cc} \quad [W] \quad (2.71)$$

si referimos ésta ecuación a la potencia aparente nominal, y además teniendo en cuenta las ecuaciones 2.31 y 2.35, se tiene:

$$P(3)_{hccpu} = \frac{P(3)_{hcc}}{S_n} = \Gamma \Delta (i)_{cc}^2 \frac{R_{ccpu}}{Z_{ccpu}^2}$$

$$P(3)_{hccpu} = \Gamma \Delta (i)_{cc}^2 \frac{R_{ccpu}}{Z_{ccpu}^2} \quad (2.72)$$

2.11.3 Oscilación máxima de la potencia activa trifásica de corto-circuito.

Esta oscilación marca los límites máximo y mínimo entre los cuales varía la potencia activa trifásica instantánea transitoria, la cual, a diferencia de la potencia activa de corto-circuito permanente, no se mantiene invariable sino que oscila en consonancia con el efecto Joule de las corrientes y es proporcional al valor cuadrático instantáneo de estas últimas.

$$P_{(3)cc} = R_{cc} \sum_{\Lambda} i_{cc}^2 \quad [\text{W}] \quad (2.73)$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones 2.64 y 2.65, además de distinguir esta suma cuadrática de la de régimen permanente en corto-circuito solo por el factor de oscilación máxima dado por la ecuación (2.65), hallaremos paralelamente a 2.68 y a 2.69 la siguiente ecuación:

$$P_{(3)cc} = 3 \Gamma_{\Lambda(i)cc}^2 I_{cc}^2 R_{cc} \quad [\text{W}] \quad (2.74)$$

nuevamente refiriendo a la potencia nominal y teniendo en cuenta las ecuaciones 2.31 y 2.35 se obtiene:

$$P_{(3)thccpu} = \frac{P_{(3)thcc}}{S_n} = \Gamma_{\Lambda(i)cc}^2 \frac{R_{ccpu}}{Z_{ccpu}^2}$$

$$P_{(3)thccpu} = \Gamma_{\Lambda(i)cc}^2 \frac{R_{ccpu}}{Z_{ccpu}^2} \quad (2.75)$$

2.11.4 Potencia activa media trifásica de corto-circuito durante los primeros ν ciclos.

Es la potencia media conjunta de las tres fases que multiplicada por el tiempo νt del número de ciclos considerado nos da la energía total puesta en juego en el transcurso de este intervalo, la cual se transforma en calor en los devanados.

$$P_{\nu(i)cc} = R_{cc} \sum I_{\nu cc}^2 \quad [\text{W}] \quad (2.76)$$

Evidentemente, siendo la suma de los cuadrados de las corrientes eficaces en las tres fases en el mismo tiempo y referida a la suma de las corrientes eficaces cuadráticas de las tres fases en régimen permanente, y con el factor definido en la ecuación 2.67 tenemos:

$$P_{\nu(i)cc} = \Gamma_{\nu(i)cc}^2 3 R_{cc} I_{cc}^2 \quad (2.77)$$

y referida a la potencia aparente nominal del transformador es,

$$P_{V(t)_{ccpu}} = \frac{P_{V(t)_{cc}}}{S_n} = \Gamma_V(3)_{cc}{}^2 \frac{R_{ccpu}}{Z_{ccpu}^2}$$

o sea,

$$\boxed{P_{V(t)_{ccpu}} = \Gamma_V(3)_{cc}{}^2 \frac{R_{ccpu}}{Z_{ccpu}^2}} \quad (2.78)$$

Durante el corto-circuito, la tensión en los bornes de salida del transformador es nula, por lo cual, toda la energía activa consumida se disipa prácticamente en las resistencias ohmicas de los devanados y circunstancialmente en algunos elementos constructivos próximos, al alcance de los flujos de dispersión; estas pérdidas en los elementos, son comunmente llamadas pérdidas adicionales. El cálculo exacto de las pérdidas en estos elementos se puede obtener por medio de la prueba de corto-circuito en régimen permanente.

En régimen transitorio, las pérdidas adicionales suelen ser un poco mayores debido a que los flujos de dispersión son considerables.

El estudio de las potencias de corto-circuito puede efectuarse en cualquier caso prescindiendo de las pérdidas en el hierro y de la potencia magnetizante, muy reducidas en estas circunstancias.

CAPITULO 3

3 Circuito magnético, devanados, dieléctricos y sujeción mecánica en los transformadores de potencia.

3.1 Circuito magnético.

3.1.1 Concepto de circuito magnético

Los efectos del magnetismo se manifiestan a través de un campo magnético, siendo este el mecanismo fundamental por medio del cual los motores, generadores y transformadores convierten la energía de una forma a otra. Llamémosle campo magnético a una región del espacio en la que existe un estado magnético; el campo magnético es una magnitud vectorial que tiene en cada punto determinado de esta región un cierto valor y una determinada dirección.

Un campo magnético puede representarse por líneas de inducción, por convención, el número de estas líneas por unidad de superficie normal a su dirección se hace igual al

valor de la inducción B , por lo tanto la inducción en un punto puede expresarse en líneas de inducción por unidad de superficie. El número total de líneas de inducción que atraviesan una superficie se denomina flujo magnético a través de dicha superficie y se representa por Φ , y en el caso de que B sea uniforme y normal a la superficie finita A :

$$\Phi = B \cdot A$$

(3.1)

En función de la expresión 3.1, a B se le conoce más comúnmente como densidad de flujo. Las unidades de medida internacionales para el flujo son el Weber (wb) y para la densidad de flujo es el Wb/m^2 .

3.1.1.1 Campo magnético de un solenoide.

La densidad de flujo producido en cualquier punto por una corriente que circula en un arrollamiento solenoidal es simplemente la resultante de las densidades de flujo creadas en dicho punto por cada espira del solenoide. Un arrollamiento tal como el que se muestra en la figura 3.1 se denomina toroide; puede imaginarse que es un solenoide que se ha encorvado hasta adquirir una forma circular, de modo que sus extremos queden unidos.

Prácticamente todo el flujo magnético se confina en el interior del toroide, y la densidad de flujo en cualquier punto, dentro del arrollamiento está dado por:

$$B = \mu_0 \frac{NI}{l_{eq}} \quad (3.2)$$

donde l_{eq} es la longitud media de la trayectoria magnética dentro del toroide

Recordando que B es el flujo por unidad de área de la sección transversal, el flujo total dentro del toroide está dado por:

$$\Phi = BA = \frac{\mu_0 N I A_{eq}}{l_{eq}}$$

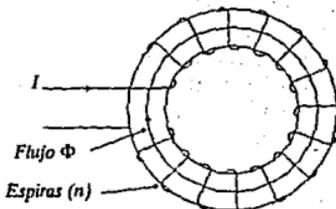


Figura 3.1 Campo magnético de un solenoide.

Reordenando,

$$\Phi = \frac{N I A_{eq} \mu_0}{l_{eq}}$$

$$\Phi = N I \Lambda_{eq} \quad (3.3)$$

Donde Λ_{eq} es la permeancia magnética del circuito, o de otra forma:

$$\Phi = \frac{N I}{\mathfrak{R}} \quad (3.4)$$

donde, el denominador de la ecuación se denomina reluctancia \mathfrak{R} de la estructura magnética, y esta dada por:

$$\mathfrak{R} = \frac{l_{eq}}{\mu_0 A_{eq}}$$

3.1.1.2 Circuito magnético.

El funcionamiento magnético de máquinas y transformadores se puede representar por modelos de circuitos magnéticos. En un circuito eléctrico, el voltaje o fuerza electromotriz impulsa la circulación de corriente. Por analogía, la cantidad correspondiente en circuitos magnéticos es la fuerza magnetomotriz (fmm), la cual es igual a la corriente efectiva aplicada al núcleo por el número de vueltas de la bobina, o sea,

$$F = N I \quad (3.5)$$

donde F es el símbolo para la fuerza magnetomotriz, la cual se mide en amperes-vuelta.

En un circuito eléctrico, el voltaje aplicado ocasiona la circulación de una corriente I . De manera similar, en un circuito magnético, la aplicación de una fmm produce un flujo magnético Φ . La relación entre fuerza magnetomotriz y flujo es conocida como ley de Ohm para los circuitos magnéticos.

$$F = \Phi \mathfrak{R} \quad (3.6)$$

Como en el caso de la resistencia en el circuito eléctrico, la reluctancia es directamente proporcional a la longitud l_{eq} e inversamente proporcional al área de la sección transversal A_{eq} y dependiente del material del circuito magnético, con l_{eq} en metros y A_{eq} en m^2

3.1.2 Propiedades de los materiales ferromagnéticos.

Observaciones experimentales han mostrado que ciertos materiales, cuando son colocados en un campo magnético, reaccionan con éste y lo modifican. Este fenómeno es llamado magnetización y los materiales que muestran esta característica son llamados materiales magnéticos. Estos materiales son clasificados en tres grupos: Diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos, siendo este último el de mayor interés para nosotros.

Las propiedades de los materiales ferromagnéticos son:

- » Llegan a magnetizarse fuertemente en la misma dirección del campo magnético donde están colocados.
- » La densidad de flujo en los materiales varía en forma no lineal con la intensidad magnética, con excepción de pequeños rangos donde la variación es lineal.
- » Estos materiales presentan saturación, histéresis y retentividad.

Si de la ecuación 3.2 definimos a la intensidad magnética H como:

$$H = \frac{NI}{l_{eq}} \quad (3.7)$$

y debido a que la permeabilidad del medio μ_0 es constante, la densidad de flujo es proporcional a la intensidad magnética H y la característica de magnetización es una línea recta. Ahora bien, si el núcleo del toroide es de un material ferromagnético, la densidad de flujo es diferente al valor dado por la ecuación 3.2, esto puede ser expresado matemáticamente por la siguiente ecuación:

$$B = \mu_0 H + \beta \quad (3.8)$$

Donde β es la contribución del material magnético a la densidad de flujo total y es llamada densidad de flujo intrínseco. Si expresamos a β en términos de H tenemos:

$$\beta = \chi H \quad (3.9)$$

Para materiales ferromagnéticos, χ es una cantidad variable, usualmente mucho mayor que la unidad. Si sustituimos la ecuación 3.9 en la ecuación 3.8 tenemos:

$$B = \mu_0 H + \chi H = \mu H \quad (3.10)$$

Donde $\mu = \mu_0 + \chi$ es la llamada permeabilidad del material magnético, y es una cantidad variable, frecuentemente mucho mayor que μ_0 .

La densidad de flujo magnético B varía linealmente con H para pequeños valores de H ; conforme H tiende a incrementarse la variación de B gradualmente decrecerá y para valores grandes de H la curva caerá, a tal grado que, aunque H crezca rápidamente, B prácticamente se mantendrá sin incrementarse; esta característica es conocida como saturación.

3.1.2.1 Histéresis y retentividad.

Si sometemos a un toroide de material ferromagnético a una magnetización cíclica. La variación de B con respecto a H se muestra en la figura 3.2 Para empezar, supondremos que el material no está magnetizado; por lo que la corriente en el enbobinado es cero y esta condición está representada por el punto O . Si se aumenta la corriente en el enbobinado de excitación, la intensidad magnética H se incrementa, por lo que la densidad de flujo B se incrementa a lo largo de la curva Ob . En el punto " b " ($H = H_{max}$ y $B = B_{max}$) si hacemos disminuir gradualmente la intensidad magnética; al contrario de lo que se puede esperar, la densidad de flujo varía a lo largo de la curva diferente bd . Para un valor específico de H ; el valor de B es más grande cuando H disminuye que cuando se incrementa. En otras palabras se dice que el flujo se retrasa con respecto a la intensidad magnética, esta característica es conocida como histéresis. Obsérvese que en el punto d , aunque H es cero, B no lo es, lo cual es debido a la retentividad, siendo esta la tendencia del material a retener algo de magnetismo aún después de remover la fuente de excitación, por lo que la ordenada Od es la densidad de flujo residual.

Si gradualmente se disminuye la intensidad magnética, la densidad de flujo varía a lo largo de la curva $b'd'b''$ debido a la histéresis. El punto b'' difiere de b por una pequeña diferencia por lo cual la curva no llega a cerrarse todavía. Si el material se somete a ciclos repetidos de magnetización, la curva B contra H formará finalmente un anillo cerrado.

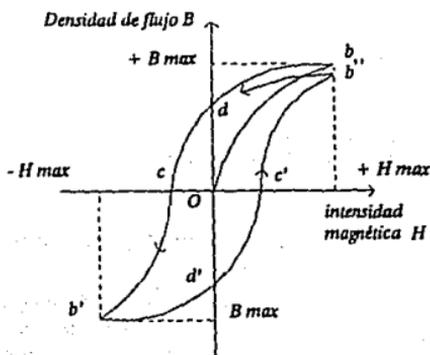


Figura 3.2 Efecto de histéresis de un material ferromagnético

Este anillo es conocido como anillo o ciclo de histéresis donde la amplitud de B depende de la amplitud de H y la forma del anillo depende del material usado.

3.1.2.2 Anillos secundarios o auxiliares.

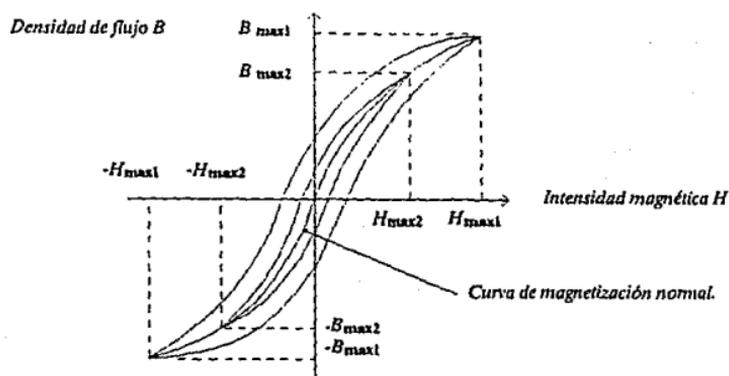


Figura 3.3 Familia de anillos de histéresis y curva de magnetización normal

Un anillo secundario se forma si durante una prueba se decide por alguna razón hacer decrecer la corriente ligeramente y regresarla posteriormente a su valor, figura 3.3

3.1.3 Curvas de magnetización normal.

En la figura 3.4 la curva resultante B vs. H , obtenida al unir las puntas extremas de una familia de anillos de histéresis, es conocida como la curva de magnetización normal. Si los antecedentes históricos de un material magnético no son relevantes en el problema por resolver, entonces todos los cálculos prácticos del circuito magnético pueden ser realizados usando la curva de magnetización normal. La figura 3.4 muestra algunas curvas de magnetización típicas para algunos materiales usados en circuitos magnéticos.

3.1.4 Voltajes inducidos magnéticamente, autoinductancia.

Algunas de las observaciones realizadas por Michael Faraday en la sección 1.1.1, pueden ser sintetizadas en la ley de Faraday: Esta ley establece que si un flujo pasa a través de una espira de una bobina, en ella se induce un voltaje que es directamente proporcional a la razón de la variación del flujo con respecto al tiempo, en forma de ecuación,

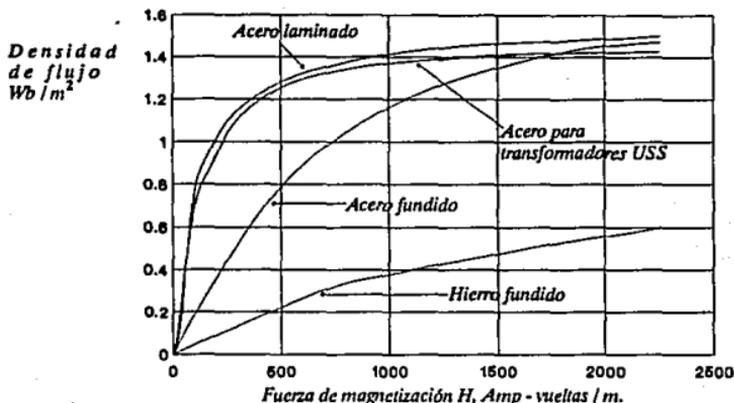


Figura 3.4 Curvas de magnetización para algunos materiales ferromagnéticos.

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.11)$$

Si una bobina tiene N espiras, entonces el voltaje inducido es:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.12)$$

El signo menos se establece por la ley de Lenz, que dice lo siguiente: Una fem está siempre en tal dirección que se opone al cambio en el flujo magnético que la produce. Es decir, si el flujo se incrementa a través de una bobina, la corriente producida por la fem inducida generará un flujo que tiende a cancelar el incremento en el flujo. O bien, si el flujo disminuye a través de la bobina, la corriente de la fem inducida producirá un flujo que tiende a restaurar la disminución en el flujo.

El voltaje inducido aparece en cualquier circuito que esté bajo la influencia de un flujo variable, incluyendo el circuito que da origen al flujo. El aumento, disminución o cualquier otra variación de la corriente con el tiempo produce las variaciones correspondientes del flujo magnético e induce un voltaje en el circuito; por lo que la tensión de autoinducción es:

$$e = N \frac{d\Phi}{dt} = N \frac{d\Phi}{di} \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt} \quad (3.13)$$

donde:

$$L = N \frac{d\Phi}{di}$$

y se denomina autoinductancia, o sencillamente inductancia del circuito que se expresa en Henrios cuando Φ se está en webers.

El concepto de inductancia es de gran utilidad cuando el flujo es directamente proporcional a la corriente, lo cual implica que la permeabilidad del medio correspondiente a la trayectoria del flujo es constante. Hablando en términos prácticos, este párrafo significa que ninguna parte importante de la trayectoria del flujo se encuentra en hierro saturado. En estas circunstancias, la ecuación 3.13 se reduce a

$$L = \frac{N\Phi}{i} \quad (3.14)$$

Con Φ e i directamente proporcionales; la inductancia es una constante independiente de la corriente y dependiente solamente de la geometría del elemento del circuito y de la permeabilidad del medio magnético.

3.1.5 Circuitos magnéticos con excitación de ca.

3.1.5.1 Relación entre voltaje aplicado, voltaje inducido y flujo en un núcleo.

En la figura 1.7 se muestra un núcleo con una bobina de excitación, a la cual se le aplica un voltaje alterno. Como sabemos fluirá una corriente i_o , la cual establecerá un flujo Φ en el núcleo, por tanto el flujo variable inducirá una tensión en la bobina de excitación. Para conocer la forma de onda del flujo magnético se puede recurrir a el siguiente análisis matemático despreciando los flujos de dispersión.

Si el voltaje V de la fuente es de la forma:

$$V = V_m \text{ sen } \omega t \quad (3.15)$$

Despreciando la resistencia de la bobina, la ecuación del circuito es:

$$V + e = 0 \quad \text{o} \quad V = -e \quad (3.16)$$

De otra forma,

$$N \frac{d\Phi}{dt} = V_m \text{ sen } \omega t \quad (3.17)$$

despejando a $d\Phi$ e integrando hallamos la ecuación del flujo instantáneo:

$$\Phi = \frac{V_m}{N} \int \text{sen } \omega t \, dt = -\frac{V_m}{\omega N} \cos \omega t + C$$

donde el factor $V_m / \omega N$ es la amplitud del flujo Φ_m en régimen permanente, o sea,

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + C \quad (3.18)$$

por lo tanto, la expresión 3.18 es una expresión senoidal. Por otro lado, el valor de la fem inducida establecida en la ecuación 3.12 es:

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.19)$$

sustituyendo la ecuación 3.18 en 3.19, diferenciando y simplificando operaciones se tiene:

$$e = -V_m \text{sen } \omega t \quad (3.20)$$

que es una expresión senoidal. Por lo que se puede concluir, que la respuesta de una estructura ferromagnética y su bobina magnetizante a la aplicación de una fuente senoidal, es un flujo y una fem senoidales.

De la ecuación 3.18 tenemos que:

$$\Phi_m = \frac{V_m}{\omega N}$$

Si despejamos V_m , se tiene,

$$V_m = N \Phi_m \omega = N \Phi_m (2\pi f) \quad (3.21)$$

Donde el valor eficaz se determina de la siguiente forma.

$$V = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f N \Phi_m = 4.44 f N \Phi_m \quad (3.22)$$

3.1.5.2 Corriente de excitación

La figura 3.5 muestra gráficamente a V y Φ , así como la onda de flujo vs. i_0 para el núcleo. Esta se obtiene de la curva B vs. H del material del núcleo, al multiplicar la ordenada por el área de la sección transversal A_{eq} y la abscisa por l_{eq} / N . Los puntos 1, 2, 3, ... se escogen de la curva Φ vs. i_0 según se muestra en la figura 3.5, y se dibujan líneas horizontal

y verticalmente sobre estos puntos; los valores de tiempo correspondientes a los valores del flujo en estos puntos se obtienen del eje tiempo de la curva Φ y se transfieren al eje de tiempo de i_0 . Los valores de i_0 correspondientes a estos instantes de tiempo se leen en la curva de histéresis, en los puntos 1, 2, 3, ... Entonces se dibuja la curva i_0 vs t ; como el anillo de histéresis no es lineal y tiene dos valores para una misma abscisa, la forma de onda de la corriente de excitación no es senoidal, aún cuando el flujo es senoidal.

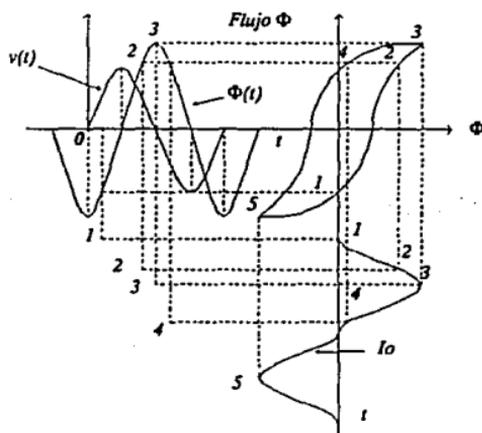


Figura 3.5 Forma de onda de la corriente de excitación para el flujo senoidal en un núcleo ferromagnético.

Como la curva representativa de i_0 no es una onda senoidal, puede definirse una curva ideal, denominada senoide equivalente que sustituya a la curva real de i_0 en algunas aplicaciones; la senoide equivalente debe de estar definida por las siguientes condiciones:

- Su valor eficaz debe ser el mismo que el de la curva real.
- La componente activa ha de ser igual a la corriente de pérdidas I_{fe} , para que las pérdidas en el hierro sean las mismas.

3.1.6 Energía almacenada en un núcleo ferromagnético.

La ley de la conservación de la energía es uno de los postulados básicos usado por muchas ramas de la ciencia e ingeniería para explicar varios fenómenos. Evidencias experimentales muestran que para crear un campo magnético, tiene que emplearse energía en una u otra forma. Esta energía es almacenada por el campo magnético y la totalidad o parte de ella, es regresada a su fuente inicial o convertida en otras formas útiles.

Con frecuencia, la energía almacenada se expresa en términos de la densidad de flujo B y de la fuerza magnetizante H , siempre y cuando la curva B vs. H del núcleo se considere lineal; en forma de ecuación tenemos:

$$W = \frac{1}{2} H B = \frac{1B^2}{2\mu} = \frac{1}{2} \mu H^2 \quad (3.23)$$

o expresada en términos de la inductancia de la bobina de excitación:

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \quad (3.24)$$

3.1.7 Pérdidas de energía en los núcleos ferromagnéticos.

Cuando los circuitos magnéticos se someten a densidades de flujo variables con el tiempo, existen dos causas de las pérdidas de potencia en forma de calor en el núcleo de hierro, estas pérdidas son importantes cuando se trata de determinar el calentamiento, las características nominales y el rendimiento de las máquinas y transformadores.

3.1.7.1 Pérdidas por histéresis.

Cuando disminuyen los campos magnéticos asociados con núcleos ferromagnéticos, parte de la energía almacenada es regresada a la fuente o convertida en alguna otra forma útil. Sin embargo, parte de energía almacenada se pierde irremediamente en el núcleo en forma de calor. Esta pérdida de energía es debida a dos causas.

- Característica de histéresis del material
- Corrientes inducidas en el núcleo.

Una fórmula empírica que nos proporciona las pérdidas por histéresis en un núcleo ferromagnético es:

$$P_h = \eta V f (B_{m\acute{a}x})^2 \quad (3.25)$$

donde

P_h son las pérdidas por histéresis en watts.

η es el coeficiente de Steinmetz, el cual es una constante que depende del material. n es el exponente de Steinmetz y es un valor comprendido entre 1.5 y 2.5

V es el volumen total del núcleo ferromagnético en m^3

f es la frecuencia del sistema.

$B_{m\acute{a}x}$ es la densidad máxima de flujo que circula en el núcleo.

3.1.7.2 Pérdidas por corrientes parásitas.

La segunda clase de pérdidas surge del hecho de que el propio núcleo está constituido de material conductor, por lo que los voltajes que induce en el flujo producen corrientes circulantes en el hierro. Estas corrientes se llaman parásitas y van acompañadas de una pérdida I^2R en el núcleo, llamada pérdida por corrientes parásitas. Como estas corrientes dependen de la variación del flujo y de la resistencia de la trayectoria, es lógico suponer que esta pérdida varíe con el cuadrado de la densidad de flujo máximo y de la frecuencia. La pérdida por corrientes parásitas puede expresarse como,

$$P_e = \frac{\pi^2 v f^2 \tau^2 B_{m\max}^2}{6\rho} \quad (3.26)$$

donde:

P_e son las pérdidas por corrientes parásitas en watts.

V es el volumen total del núcleo ferromagnético en m^3

f es la frecuencia del sistema.

τ es el espesor de una lamina del núcleo laminado en metros.

$B_{m\max}$ es la densidad máxima de flujo que circula en el núcleo.

ρ es la resistividad del material ferromagnético del núcleo en Ohms-metro.

3.1.8 Disposición del circuito magnético.

Como se ha mencionado anteriormente, un transformador consta de dos partes esenciales: el núcleo magnético y los devanados.

En cuanto a las disposiciones constructivas, el núcleo determina características relevantes, de manera que se establece una diferencia fundamental en la construcción de transformadores, dependiendo de la forma del núcleo, pudiendo ser el llamado núcleo tipo columnas y el núcleo tipo acorazado.

El núcleo está constituido 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 parásitas.

Las laminaciones llegan a magnetizarse fuertemente en la misma dirección del campo magnético donde están colocadas, por tal motivo, los núcleos para transformadores están formados por un conjunto de laminaciones acomodadas en la forma y dimensiones requeridas. 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 y en consecuencia las pérdidas por este concepto. En general, las laminaciones al silicio se saturan para valores de inducción más bajos de aquellos relativos a las laminaciones normales, tales valores van disminuyendo al aumentar el contenido de silicio.

En el caso de transformadores de gran potencia, se usan las llamadas "laminaciones de grano orientado" cuyo espesor es de algunos milímetros y contienen entre 3% y 4% de silicio. Todas las laminaciones magnéticas van aisladas a ambos lados, por medio de esmalte o con aislamiento de papel; esto se hace así para reducir las pérdidas por corrientes parásitas.

Cuando se desean propiedades magnéticas especiales para los núcleos se usan numerosas aleaciones de hierro con otros metales. Dichas aleaciones se conocen generalmente con nombres diferentes. Cuando se desea una permeabilidad muy alta puede usarse la aleación de níquel-hierro conocida como Permalloy o Hipernik.

La formación del circuito magnético debe de hacerse de tal manera, que permita la colocación de las bobinas que constituyen los arrollamientos y después cerrarlo en la forma debida.

3.1.9 Elementos de los núcleos.

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 unen entre sí a las columnas para cerrar el circuito magnético.

Las secciones de las columnas determinan automáticamente las secciones de los núcleos. Por razones de tipo económico y también para equilibrar los esfuerzos electrodinámicos que se pueden presentar entre los conductores, los devanados se construyen casi siempre en forma circular.

Esto requiere, al menos técnicamente, que las columnas del núcleo deban tener sección circular. Debido a que esta condición no es prácticamente realizable, se busca aproximarse haciendo la sección de la columna en escalones. Desde luego que la construcción es más costosa, mientras mayor sea el número de escalones, debido a que cada escalón requiere de dimensiones distintas de las laminaciones. Para transformadores pequeños, se puede aceptar el uso de sección cuadrada o cruciforme (sección cruz).

En transformadores grandes, se hacen las columnas con un número elevado de escalones con el objeto de obtener un mayor "factor de utilización geométrica" de la sección. A mayor capacidad del transformador, mayor es el número de escalones, pudiendo llegar

a ser hasta 10 o 12 escalones. Este es el procedimiento más empleado en el caso de transformadores de mediana y gran potencia, figura 3.6

En transformadores de gran potencia se consigue una mayor ventilación, subdividiendo los paquetes de laminaciones mediante separadores constituyendo así canales de ventilación.

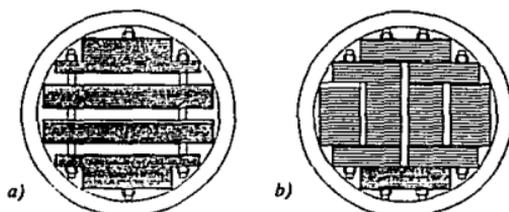


Figura 3.6 Núcleos de sección escalonada
a) núcleo con subdivisión de los paquetes de chapas mediante separadores; b) núcleo con canales longitudinales de ventilación.

En cuanto a los yugos, como estos no están vinculados directamente con los devanados, pueden ser, entonces, de sección cuadrada o rectangular, aunque pueden tener también sección escalonada para mejorar el enfriamiento.

La unión entre yugos y columnas puede efectuarse por dos procedimientos:

- » Por junta ensamblada en que la unión se hace por ensamble y es el procedimiento más utilizado en transformadores de pequeña y mediana potencia.
- » Por junta lisa en que la unión entre yugos y columnas se hace simplemente por contacto y suele emplearse en transformadores de gran potencia.

Debido a que las bobinas se deben montar bajo un cierto procedimiento y desmontar cuando sea necesario por trabajos de mantenimiento, los núcleos magnéticos son armados de tal forma que son desmontables, para poder meter y sacar las bobinas de las columnas, pudiendo los núcleos que cierran el circuito magnético, terminar al mismo nivel en la parte que está en contacto con los yugos, o bien con salientes. En ambos casos los núcleos se arman con "juegos" de laminaciones para columnas y yugos que se arman por capas de arreglos "pares" e "impares". Es importante mencionar que cuando se emplean laminaciones de grano orientado, es necesario que las uniones entre yugos y columnas se realicen con cortes inclinados para evitar trayectorias transversales de las líneas de flujo respecto a tales direcciones.

3.2 Devanados.

3.2.1 Características de diseño

Los órganos eléctricos de los transformadores están constituidos por los devanados o arrollamientos de alta y de baja tensión. A este respecto, caben hacer consideraciones previas, para justificar los conceptos posteriores sobre la forma y realización de los arrollamientos.

La mayor parte de los disturbios que se producen en los transformadores, se deben a las siguientes causas:

- » Sobretensiones, de origen atmosférico o debidas a las maniobras en la red.
- » Sobrecorrientes, que son consecuencia de corto-circuitos, y que provocan elevados esfuerzos electrodinámicos, los cuales pueden comprometer seriamente la resistencia mecánica de los arrollamientos.
- » Descomposición de un aislante.

Por lo tanto, los arrollamientos han de preverse teniendo en cuenta los siguientes criterios.

- » Comportamiento ante sobretensiones.
- » Resistencia mecánica a los esfuerzos electrodinámicos de corto-circuito
- » Envejecimiento de los aislantes.

El comportamiento ante las sobretensiones tiene especial importancia en los arrollamientos de alta tensión. La tendencia actual consiste en repartir los esfuerzos lo más uniformemente posible a lo largo del arrollamiento. Durante los primeros microsegundos, la onda de sobretensión tiene un carácter esencialmente capacitivo; solamente intervienen las capacidades entre los elementos próximos del devanado (espiras, bobinas o capas de bobinas sucesivas.), denominadas capacidades serie (C_s), y las capacidades entre estos mismos elementos y tierra, denominados capacidades derivación (C_D). Experimentalmente se ha demostrado que el comportamiento ante las ondas de impulso de tensión de un devanado está caracterizado por el factor

$$\alpha = \sqrt{C_D / C_s}$$

(3.27)

Cuanto menor sea el factor α , mejor diseñado está el devanado. Como la capacidad derivación C_D está determinada por las distancias de aislamiento necesarias debidas a la tensión de prueba, para disminuir el valor de α , hay que aumentar el valor de la capacidad serie.

La segunda condición que debe tenerse en cuenta en el proyecto de un devanado es su buen comportamiento ante el corto-circuito; esta condición debe considerarse como la más importante para los devanados de baja tensión, por los que circulan corrientes elevadas.

3.2.2 Devanados para transformadores de distribución.

Para los fines constructivos, no tiene ninguna importancia la función de un devanado, es decir, que sea primario o secundario, solo importa la tensión para la cual debe ser previsto.

En los transformadores de distribución, normalmente la diferencia entre las tensiones primaria y secundaria es notable, por lo que se emplean criterios constructivos distintos para los devanados de baja y alta tensión.

Devanados de baja tensión.

Generalmente están constituidos de una sola espira (algunas veces en dos o tres capas sobrepuestas), con alambre rectangular aislado. El conductor se usa generalmente para potencias pequeñas y tiene diámetros no superiores a 3 o 3.5 mm. El aislamiento de los conductores, cuando son cilíndricos, puede ser de algodón o de papel, y en algunos casos conductor esmaltado cuando los transformadores no son enfriados por aceite.

Para transformadores de mediana y gran potencia, se recurre al uso de placa o solera de cobre o aluminio aislada, siendo este aislamiento generalmente esmalte o papel. En el caso de que las corrientes que transporte el devanado sean elevadas ya sea por facilidad de manipulación en la construcción o bien para reducir las corrientes parásitas, se puede construir el devanado con más de una solera o placa en paralelo.

Devanados de alta tensión.

Los devanados de alta tensión. tienen en comparación con los devanados de baja tensión, muchas espiras, y la corriente que circula por ellos, es relativamente baja, por lo que son de conductor de cobre de sección circular con diámetro de 2.5 a 3.0 mm.

3.2.3 Tipos de devanados.

Con respecto a las características constructivas, se tienen variantes de fabricante a fabricante, pero básicamente hay tres tipos de devanados.

3.2.3.1 Arrollamiento helicoidales.

Por lo general, están constituidos por un gran número de conductores, arrollados sobre un cilindro aislante de gran resistencia mecánica de sección relativamente pequeña y conectados en paralelo ya que de esta forma se reducen las pérdidas por corrientes parásitas. Los conductores deben de trasponerse de forma que cada uno ocupe todas las posiciones posibles en el conjunto de ellos para conseguir un reparto equilibrado de corrientes, que reduce al mínimo las pérdidas por corrientes parásitas.

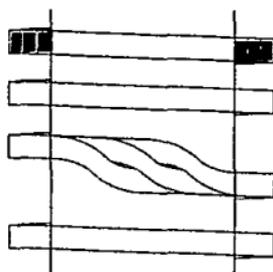


Figura 3.7 Transposición de dos conductores en un arrollamiento helicoidal

En la figura 3.7 se muestra esquemáticamente un cruce de transposición para tres soleras en un arrollamiento helicoidal. Estos arrollamientos se emplean, sobre todo, para fuertes intensidades de corriente, es decir, en los arrollamientos de baja tensión.

3.2.3.2 Arrollamiento con bobinas superpuestas

Como su nombre lo indica, están constituidos por un gran número de bobinas de pocas espiras dispuestas en capas y aisladas entre sí por papel aislante, cada bobina al terminar se "amarra" con cinta de lino o algodón para darle consistencia mecánica y posteriormente se les da un baño de barniz y se hornean a una cierta temperatura, con lo cual adquiere la rigidez mecánica necesaria. Cada bobina, está diseñada para tener una tensión no superior a 1 500 volts, por lo que para dar la tensión necesaria para una fase, se deben colocar varias bobinas en serie. Estos arrollamientos posiblemente, son las más empleados, y generalmente se subclasifican en dos grupos:

- » **Arrollamiento tipo galleta.** Está formado por bobinas de dos capas de espiras, denominadas dobletes, devanadas en sentido contrario. Este tipo de arrollamiento, se emplea para tensiones de hasta 110 KV. Para tensiones superiores a 130 KV el reparto inicial de la onda de impulso de tensión a lo largo del arrollamiento, es un factor determinante del dimensionado y aislamiento de este arrollamiento; un arrollamiento se comporta mejor con respecto a las sobretensiones, cuanto mayor se su capacidad serie.

Para aumentar los valores de las capacidades serie, se emplean también pantallas electrostáticas metálicas y aisladas, que se oponen al potencial de las espiras vecinas, para mejorar el reparto del campo electrostático; estas pantallas se disponen con arrollamientos de galleta normales o entrelazados y, en este último caso, la capacidad serie puede resultar hasta 100 veces mayor que la de un arrollamiento de galleta normal. De esta forma, la distribución de la onda de impulso de tensión a lo largo del devanado, es prácticamente lineal y desaparece la necesidad de reforzar el aislamiento de las galletas de entrada.

- » Así como los arrollamientos de galletas se emplean preferentemente para altas tensiones, los arrollamientos de bloques se utilizan, sobre todo para tensiones medias; estos arrollamientos están constituidos por un número limitado de capas de espiras de conductor de sección circular o rectangular, según los casos. Generalmente, se subdivide cada bobina en dos medias bobinas o dobletes realizando los empalmes por la parte exterior y separando las dos semibobinas por un tabique aislante radial, figura 3.8

3.2.3.3 Arrollamiento con bobinas concéntricas. (por capas)

Este arrollamiento esta dividido en unas cuantas capas concéntricas, largas, cilíndricas y de pequeño espesor, conectadas en serie entre ellas. Entre las bobinas se disponen canales verticales de refrigeración, por los que circula el aceite, asegurando de esta forma la disposición activa del calor. Este tipo de arrollamiento tiene excelente comportamiento a las sobretensiones, ya que las capacidades serie son las capacidades entre capas sucesivas y resultan muy superiores a las capacidades derivadas de cada capa respecto a las tierras circundantes. Hacia el interior, cada capa está aislada de la siguiente por un tubo de papel enrollado cuyos extremos quedan redoblados en forma de collarines y, hacia el exterior, por un canal de refrigeración, relleno de aceite, que sirve, a la vez, como aislante y como refrigerante.

3.2.4 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, del aislamiento y de la menor dispersión del flujo.

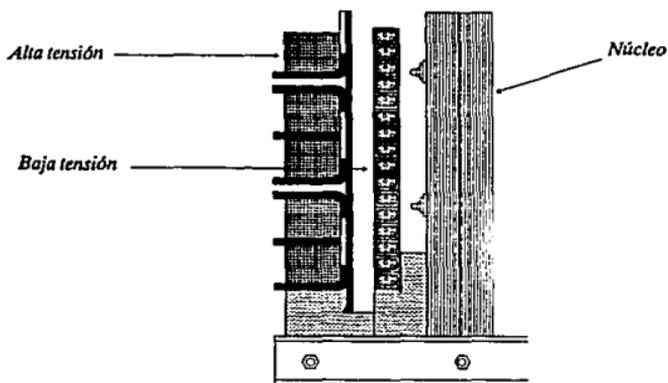


Figura 3.8 Sección de un arrollamiento de alta tensión con bobinas de bloques en dobles, asociado a un arrollamiento helicoidal de baja tensión.

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 tipos ya vistos en la sección 1.2.5, y que son principalmente:

- Concéntricos.
- Doblemente concéntricos.
- Alternados.

Las consideraciones que orientan desde el punto de vista de diseño, la disposición de los devanados, son aquellas referentes al enfriamiento, a la aislación, a la reactancia de dispersión y a los esfuerzos mecánicos.

Con relación a los aislamientos, la solución más conveniente la representa el tipo concéntrico, ya que requiere de una sola capa aislante entre los dos devanados, por lo que esta disposición es ventajosa en el caso de tensiones elevadas.

El llamado doblemente concéntrico tiene la prerrogativa de dar lugar a la reactancia de dispersión con valor de alrededor de la mitad de aquel relativo al concéntrico.

El tipo alternado, en cambio, permite variar tales reactancias, repartiendo en forma distinta las posiciones de las bobinas de los devanados. Para los esfuerzos mecánicos son mejor las disposiciones de tipo alternado, pues permite que el transformador soporte mejor los esfuerzos mecánicos.

3.3 Dieléctricos.

3.3.1 Función de los dieléctricos.

La finalidad de los materiales aislantes en las máquinas e instalaciones eléctricas, es asegurar un aislamiento eléctrico, seguro y suficiente entre los conductores y entre éstos y las partes metálicas del dispositivo o instalación. Para cumplir lo anterior, es necesario que los materiales utilizados como aislantes, cumplan ciertas propiedades.

3.3.2 Propiedades eléctricas, mecánicas, físicas, térmicas y químicas.

3.3.2.1 Propiedades eléctricas.

Para elegir un material aislante deben de tenerse en cuenta las siguientes propiedades:

a) Resistencia de aislamiento. Se denomina resistencia de aislamiento a la resistencia que se opone al paso de la corriente eléctrica, medida en la dirección en que deba asegurarse el aislamiento.

- » La resistencia de aislamiento superficial es la resistencia que ofrece la superficie del material al paso de la corriente, cuando se aplica una tensión entre dos zonas de dicha superficie.
- » La resistencia de aislamiento transversal corresponde a la resistencia que opone el material a ser atravesado por la corriente, cuando se aplica una tensión entre dos de sus caras.

b) Rigidez dieléctrica. Se denomina rigidez dieléctrica a la propiedad de un material de oponerse a ser perforado por la corriente eléctrica. Su valor se expresa por la relación entre la tensión máxima que puede soportar sin que el aislamiento se perfora y la distancia entre las partes energizadas o partes energizadas y tierra.

c) Constante dieléctrica. Se llama constante dieléctrica de un material, a la relación entre la capacidad de un condensador que emplea como dieléctrico el material considerado, y la capacidad del mismo condensador empleando como dieléctrico el vacío.

d) Factor de pérdidas dieléctricas. Se entiende por pérdidas eléctricas, a la potencia eléctrica perdida a través de los aislantes. Este factor constituye un criterio para medir la pérdida de potencia por calentamiento de los aislamientos.

e) Factor de potencia. El factor de potencia en este caso es el coseno del ángulo de defasamiento entre la tensión y la componente de la corriente que atraviesa el aislante. Por consiguiente, se puede decir que un material es un buen aislante cuanto más bajo sea su factor de potencia.

f) Resistencia al arco. La resistencia al arco se mide por el tiempo que un material aislante es capaz de resistir los efectos destructivos de un arco antes de inutilizarse por haber formado el arco un camino carbonizado conductor sobre la superficie del aislante.

3.3.2 Propiedades mecánicas.

Las principales propiedades mecánicas que deben considerarse son las siguientes:

a) Resistencia a la tensión. Es la propiedad de resistir esfuerzos mecánicos que tienden a estirar o alargar un material.

b) Resistencia a la compresión. Es la propiedad del material que le permite resistir esfuerzos mecánicos que tienden a acortarlo o comprimirlo.

c) Resistencia a la flexión. Es la capacidad del material para resistir esfuerzos que tienden a doblarlo.

d) Resistencia al corte. Es la propiedad por la cual un material resiste esfuerzos mecánicos que tienden a cortarlo, haciendo deslizar una parte del material sobre la otra.

e) Resistencia al choque. Es la capacidad del material para resistir el impacto de un choque o golpe.

f) Dureza. Es una característica directamente relacionada con la resistencia a la compresión y puede definirse como la resistencia que opone un material a ser penetrado.

g) Límite elástico. Se denomina límite elástico de un material, al esfuerzo máximo que puede aplicarse al mismo, sin que experimente deformaciones permanentes.

3.3.2.3 Propiedades físicas.

- a) *Peso específico.* Es el peso de la unidad de volumen de dicho material.
- b) *Porosidad.* Es la propiedad que tienen todos los cuerpos de dejar espacios vacíos, o poros, entre sus moléculas, gracias a lo cual pueden ser comprimidos o dilatados y hacerse permeables a los gases y aún a los líquidos.
- c) *Higroscopicidad.* Es la capacidad de absorción de la humedad que tiene un material.

3.3.2.4 Propiedades térmicas.

- a) *Calor específico.* El calor específico de un material, es la cantidad de calor necesaria para elevar un grado centígrado, la temperatura de un gramo de dicho material.
- b) *Conductividad térmica.* Se llama así a la facilidad que un material presenta al paso del calor.
- c) *Inflamabilidad.* Es la facilidad que tiene un material para inflamarse.
- d) *Temperatura de seguridad.* Es la capacidad de resistencia a la acción del calor o la temperatura límite a que pueden estar sometidos los aislantes sin que se produzca la degradación de sus características, que los conducirá a su destrucción.

3.3.2.5 Propiedades químicas.

Los materiales que constituyen los aislamientos de las máquinas, aparatos e instalaciones eléctricas están frecuentemente sometidos a la acción de ambientes que contienen líquidos, gases y vapores corrosivos, que ocasionan su lento pero continuo envejecimiento, acabando por su destrucción. A la acción destructiva de los agentes químicos, se une la del campo eléctrico, que actúa desfavorablemente sobre los aislamientos por medio de las descargas que se producen con las elevadas tensiones. El campo eléctrico transforma parte del oxígeno del aire en ozono, de gran poder oxidante y que actúa nociva e intensamente sobre los materiales aislantes.

- a) *Resistencia al ozono.* Como se menciona en el párrafo anterior el ozono es un poderoso oxidante, pero para contrarrestar en lo posible, sus efectos, se utilizan sustancias especiales denominadas antioxidantes.
- b) *Resistencia a los ácidos y a los álcalis.* El efecto de los ácidos y de los álcalis sobre los materiales aislantes difiere de su efecto sobre los metales, pues éstos se disuelven por la

acción de los ácidos, mientras que por lo general, los aislantes se descomponen por la acción de los ácidos fuertes y de los álcalis. Esta descomposición se manifiesta primero por un ablandamiento y, a veces, por un aumento de volumen del material afectado, resultando notablemente disminuidas las propiedades mecánicas y eléctricas.

c) Resistencia a los aceites. En general, los aislantes son resistentes a la penetración del aceite y a la pérdida de resistencia por ésta causa, tanto si se trata de aceites minerales, vegetales o animales.

3.3.3 Dielectricos utilizados en los transformadores de potencia.

Puede decirse que la vida de un transformador en operación normal, mientras no sufra un accidente, depende de la duración de sus aislamientos. Con el tiempo, los aislamientos se van carbonizando por la acción prolongada del calor, esta carbonización los debilita mecánicamente y como están sujetos a esfuerzos mecánicos constantemente, acaban por fallar e inutilizar al transformador.

El aislamiento puede ser líquido en algunas partes y sólido en otras. El aislamiento líquido está constituido generalmente por aceite mineral. Si bien, en años recientes se han introducido los dieléctricos líquidos "Pyranol" e "Inerteen", no inflamables en estado líquido, prácticamente inalterables por variaciones térmicas cuando están en contacto con el aire, y con una alta rigidez dieléctrica, resulta que, son volátiles y pueden presentar reacciones químicas con otros materiales, que son nocivas para el medio ambiente y para la salud de las personas; por lo cual su utilización ha sido prohibida.

Generalmente los materiales más usados como aislantes en los transformadores son los siguientes: El aire, aceite; diferentes tipos de hilos como algodón, lino, cáñamo, etc.; papel, madera, baquelita corcho, porcelana, asbesto y diferentes tipos de cartones y ciertas sustancias plásticas.

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

3.3.3.1 Clasificación de los materiales aislantes.

La clasificación de los materiales aislantes para máquinas eléctricas con relación a su estabilidad térmica, cubre básicamente siete clases de materiales aislantes que se usan por lo general y que son los siguientes:

Clase O. Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales, tales como algodón, seda y papel sin impregnar.

Clase A. Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales, tales como algodón, seda y papel con alguna impregnación o recubrimiento o cuando se sumergen en dieléctricos líquidos tales como aceite. Otros materiales o combinación de materiales que caigan dentro de estos límites de temperatura, pueden caer dentro de esta categoría.

Clase E. Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales que por experiencia o por pruebas, pueden operar a temperaturas hasta de 5° C sobre la temperatura de los aislamientos clase A.

Clase B. Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales tales como la mica, fibra de vidrio, asbesto, etc. Con algunas sustancias aglutinantes, pueden haber otros materiales inorgánicos.

Clase F. Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales tales como mica, fibra de vidrio, asbesto, etc. Con sustancias aglutinables, así como otros materiales o combinaciones de materiales no necesariamente inorgánicos.

Clase H. Este aislamiento consiste de materiales tales como el silicón, elastómeros y combinaciones de materiales tales como la mica, fibra de vidrio, asbesto, etc. Con sustancias aglutinables como son las resinas y silicones apropiados.

Clase C. Este aislamiento consiste de materiales o combinaciones de materiales tales como mica, la porcelana, vidrio, cuarzo con o sin aglutinantes.

3.3.4 Tipos de aislamientos en los transformadores.

Con objeto de conseguir mejor aislamiento, mayor impermeabilidad, buenas propiedades de conductividad térmica y suficiente rigidez mecánica para proteger las bobinas contra los esfuerzos mecánicos, se procede a la impregnación de las bobinas, antes de montarlas sobre los núcleos, mediante un secado previo al vacío, en caliente, tras de cuya operación, las bobinas se sumergen en barniz aislante para, finalmente, realizar un último secado según las especificaciones especiales de cada tipo de barniz.

En lo que se refiere al aislamiento, propiamente dicho, cabe distinguir:

- » Aislamiento entre espiras. El aislamiento entre espiras está constituido generalmente por varias capas de papel enrolladas sobre el conductor con un espesor, entre

dos espiras consecutivas de unos 0.5 mm para los arrollamientos de baja, y de 0.7 a 1.5 mm para los de alta.

- » Aislamiento entre capas. El aislamiento entre capas está formado generalmente por dos capas de papel, que deben alargarse de forma que rodeen las espiras extremas; en las bobinas de entrada hay que reforzar este aislamiento.
- » Aislamiento entre bobinas. En lo que se refiere al aislamiento entre bobinas, estas se colocan sobre tubos aislantes de papel baquelizado que, no solamente actúan como aislamiento, sino también para proporcionar la fijación mecánica necesaria. Además de los aislantes sólidos a que hemos hecho referencia, el aislamiento entre bobinas también lo constituye el aceite que circula por los canales de refrigeración que forman los separadores y tubos aislantes; este aceite actúa, como fluido refrigerante.
- » El aislamiento entre arrollamientos de alta y de baja y entre arrollamientos y tierra está constituido, generalmente, por uno o más cilindros aislantes de cartón prensado, de papel impregnado con resinas sintéticas, etc., colocados entre ambos arrollamientos o entre el arrollamiento más cercano al núcleo y éste.

3.4 Sujeción mecánica

3.4.1 Esfuerzos electrodinámicos desarrollados por el corto-circuito.

Los esfuerzos mecánicos desarrollados entre las espiras recorridas por las corrientes primaria y secundaria, tienen escasa importancia para las intensidades correspondientes a un régimen normal, pero pueden adquirir valores enormes cuando se produce un corto-circuito. Si el transformador se somete a un sobrevoltaje, los esfuerzos mecánicos aumentan en gran forma; si el transformador experimenta un corto-circuito los esfuerzos mecánicos en el aislamiento (y también en la estructura), crecen en razón al cuadrado de la corriente de corto-circuito. El valor medio de dicha fuerza será proporcional al cuadrado del valor eficaz de la corriente; por lo que es preciso, proteger a las bobinas contra tales esfuerzos y darles la forma y las posiciones más adecuadas.

Los esfuerzos entre espiras de una misma bobina actúan de tal forma que se atraen unas a otras y tienden solo a comprimir los aislamientos entre espiras, sin efectos perjudiciales si los aislamientos soportan mecánicamente y no ceden. Los esfuerzos que causan bastante preocupación son los de repulsión desarrollados entre los arrollamientos primario y secundario, por sumarse los debidos a todas las espiras de dos bobinas próximas de ambos devanados, para producir un esfuerzo resultante entre dichas bobinas, capaz de dar lugar a la deformación de las mismas.

Los sentidos en que se ejercen las acciones entre las bobinas, son dos, radial y longitudinal, y originan efectos distintos, según sean los devanados concéntricos o alternados.

La figura 3.9a indica el sentido de las fuerzas que actúan radialmente sobre las bobinas de dos devanados concéntricos, tendiendo a aumentar el espacio entre ambos, ya que cuanto mayor sea este más grande es la dispersión. Las bobinas de forma rectangular tenderían a convertirse en circulares y, por esto, la mejor forma de bobina, convenientemente también por otras razones descritas anteriormente, es la circular. Con esta forma, la fuerza A actúa tendiendo a aumentar la longitud de las espiras, o sea, haciendo trabajar por tensión a los conductores, los cuales resisten perfectamente en este sentido, y la fuerza B produce un efecto de compresión. Naturalmente, para igualar los esfuerzos radiales en todos los sentidos, las bobinas deben estar bien centradas.

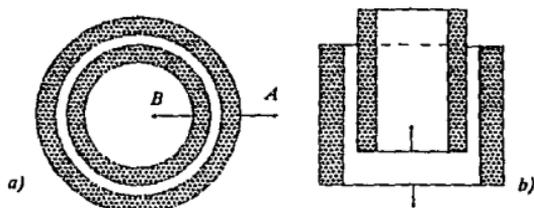


Figura 3.9 Esfuerzos en las bobinas provocados por la corriente de corto-circuito

La figura 3.9b muestra el sentido de la fuerza que se ejerce en el sentido longitudinal, tendiendo a producir un deslizamiento axial entre los dos devanados, con el cual aumentaría la dispersión; este esfuerzo es nulo, evidentemente, para una posición simétrica de ambos.

Para el cálculo de los esfuerzos dinámicos se parte del concepto básico que cuando circula una corriente alterna por un conductor se crea un campo magnético a su alrededor.

Si se tienen dos conductores cercanos, los campos magnéticos de estos interactúan y se crea una fuerza entre ellos, que puede ser como ya mencionamos, de repulsión o de atracción, dependiendo del sentido instantáneo de la corriente.

La expresión práctica de esta fuerza está dada por:

$$F = \frac{2.04 L I_{cc}^2}{S} \times 10^{-4} \quad [\text{Kg}] \quad (3.28)$$

Donde:

S es la distancia entre los conductores en cm.

L es la longitud del conductor en cm.

I_{cc} es la corriente eficaz de corto-circuito en KA.

3.4.2 Fijación mecánica de los núcleos.

La construcción del circuito magnético debe de realizarse de tal forma que, después de la colocación de las bobinas y la terminación de las conexiones, todas las chapas, tanto de las columnas como de las culatas, constituyan un conjunto rígido. Esto es necesario por dos razones: en primer lugar, para resistir los esfuerzos dinámicos y, en segundo, para evitar las vibraciones mecánicas producidas por las pulsaciones del flujo magnético que, a la larga, son perjudiciales para la construcción mecánica del transformador, además de que el ruido producido por dichas vibraciones puede resultar molesto a las personas. Por consiguiente, deben preverse los adecuados dispositivos de fijación de las chapas que constituyen el circuito magnético y de las columnas y yugos entre sí.

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 madera para protección de la sujeción de los yugos.

Cuando se han armado los niveles a base de juegos de laminaciones colocadas en "pares" e "impares" el núcleo se sujeta usando tornillos opresores y se separa por medio de los tornillos tensores.

El montaje del núcleo en los transformadores de media potencia (hasta algunos cientos de KVA), se hace como se ha mencionado antes, formando paquetes de laminaciones que se sujetan en distintas formas, pero usando elementos que no dañen a las laminaciones como madera o fibras de pequeño espesor (2 a 3 mm.) como en el caso de la fibra de vidrio.

Actualmente, se tiende a la supresión de los remaches y tornillos pasantes como órganos de fijación de los transformadores de pequeña y mediana potencia.

En transformadores de gran potencia, el conjunto de laminaciones de cada columna se sujeta rígidamente mediante tornillos pasantes, estos tornillos se aíslan con tubos de papel, cartón o baquelita y se sujetan a las tuercas con rondanas aislantes. Estos elementos aislantes no requieren propiedades dieléctricas particulares, dado que los valores de tensión que pueden ser inducidos en el núcleo son bajos. Cuando se usan tornillos no aislados se inducen en estos corrientes que producen calentamientos que son inadmisibles.



Figura 3.10
Forma de las líneas de flujo magnético en las proximidades de un remache o tornillo pasante.

Las líneas de flujo en los núcleos tienen la forma indicada en la figura 2.10; evidentemente, parte de la sección transversal del hierro se desperdicia a causa de los tornillos de fijación, lo que debe tenerse en cuenta en el proyecto del circuito magnético del transformador.

3.4.4 Sujeción mecánica de los devanados.

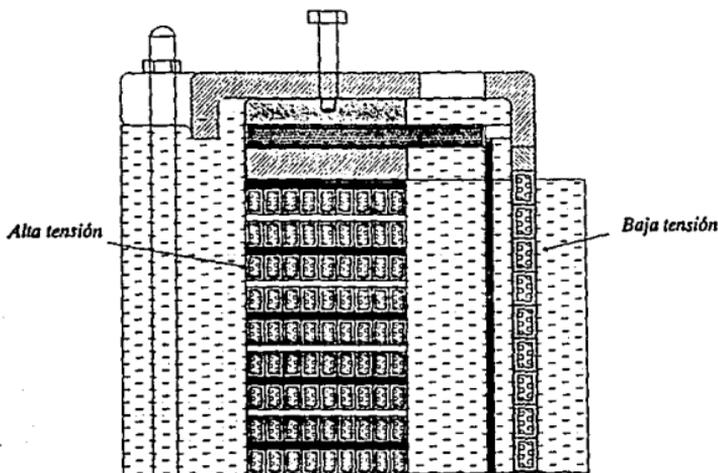


Figura 3.11 Fijación de las bobinas a las columnas.

La fijación mecánica de las bobinas de cada columna ha de evitar, en lo posible, cualquier deformación que pueda producirse a causa de los esfuerzos electrodinámicos de cortocircuito. Para ello, sobre las cabezas, por medio de capas aislantes, aprietan fuertes tornillos fijados al armazón de la culata o, en otros casos, se disponen tirantes longitudinales, paralelamente al eje del núcleo.

Con estas disposiciones de fijación debe evitarse que se formen espiras metálicas cerradas sobre la totalidad o una parte del flujo principal o del flujo de dispersión. En los transformadores pequeños, como órganos de fijación bastan las propias cabezas de madera utilizadas como aislamiento, si se ajustan fuertemente. Figura 3.11

CAPITULO 4

Efectos de los transitorios sobre los transformadores de potencia.

4.1 Sobretensiones en los sistemas eléctricos.

Se denomina sobretension a todo aumento de tensión capaz de poner el peligro el material o el buen servicio de una instalación eléctrica. Por lo tanto, el estudio de las sobretensiones en los sistemas eléctricos, ha adquirido una importancia relevante en los últimos años, a medida que se han incrementado los valores en los voltajes de transmisión.

Existen distintas formas de enfocar el estudio de las sobretensiones según sea la aplicación que se tenga; pero una manera lógica de estudiar las sobretensiones en los sistemas eléctricos, es agruparlas de acuerdo al origen que tienen; para lo cual se pueden agrupar como:

- Sobretensiones de origen externo.
- Sobretensiones de origen interno.

4.1.1 Sobretensiones de origen externo.

En este grupo se incluyen las sobretensiones que tiene una procedencia exterior a la instalación y en los que, por lo tanto sus amplitudes no están en relación directa con la tensión de servicio de la instalación. Comprenden sobre todo, las sobretensiones de origen atmosférico.

4.1.1.1 El alcance de las descargas eléctricas.

El fenómeno físico de las descargas, muestra que las nubes adquieren carga o al menos llegan a polarizarse en forma de un campo eléctrico. Cuando esos campos llegan a ser excesivos originan un relámpago o un rayo; esto es usualmente una descarga de alta-corriente. Los rayos que crean problemas para las fines de la ingeniería eléctrica son aquellos que terminan en o cerca de las líneas de potencia.

4.1.1.2 Efectos de las descargas atmosféricas.

El conocimiento de los efectos de las descargas atmosféricas es muy importante para determinar la protección más adecuada a la instalación. Basta con que se tengan nubes sobre la línea o subestación para que se presente la posibilidad de un sobrevoltaje. En general los sobrevoltajes de tipo externo pueden ser de tres tipos:

- » Por carga estática. Estos sobrevoltajes se presentan en las instalaciones, pero particularmente en la líneas de transmisión por el simple hecho de que existen nubes sobre éstas, y que las nubes sean desplazadas por el viento; este caso es el menos peligroso ya que se disminuye considerablemente su efecto mediante el uso de hilos de guarda en la línea y bayonetas e hilos de guarda en las subestaciones, que se encuentran permanentemente conectadas a tierra y representan un medio de descarga "natural".
- » Por descarga indirecta. Estos se presentan en la instalación por la presencia de rayos que caen en puntos cercanos y que por efecto de inducción electrostática introducen transitorios en las instalaciones. Este tipo de sobrevoltajes es el más frecuente y puede ser tan grave dependiendo de la intensidad de descarga.
- » Por descarga directa. Este tipo de sobrevoltajes son los que ocurren con menos frecuencia pero los que pueden causar los daños más graves, debido a la enorme cantidad de energía que trae consigo una descarga, las corrientes pueden alcanzar valores hasta de 100 KA instantáneos, pero que inducen esfuerzos electrodinámicos y térmicos en las instalaciones.

Por lo general una descarga directa sobre una línea provoca una onda de sobrevoltaje inicial que se divide en dos ondas viajeras que van hacia ambos lados del punto en que se produce la descarga con una velocidad igual a la de la luz en el caso de conductores aéreos. Este tipo de sobrevoltajes somete a los aislamientos de la instalación y en particular a los de las máquinas a esfuerzos dieléctricos que se desintegran a los niveles básicos de aislamiento; una falla del aislamiento origina otro tipo de falla.

Otros efectos que ocasionan las descargas sobre las instalaciones son:

- » La corriente de corto-circuito, ocasionada por una descarga eléctrica alcanza valores instantáneos extremadamente altos que someten a los elementos de la instalación a esfuerzos electrodinámicos y térmicos y que requieren para su disminución de un diseño adecuado del sistema de tierras.
- » Los esfuerzos electrodinámicos producidos por la corriente de corto-circuito debido a la descarga, someten a los conductores a esfuerzos de atracción y repulsión que pueden llegar a romper los aisladores soporte o deformar los tableros.

4.1.2 Sobretensiones de origen interno.

Estas sobretensiones son las producidas al variar las propias condiciones de servicio del circuito. A este grupo pertenecen las oscilaciones de intensidad de corriente, las variaciones de carga, las descargas a tierra etc... En todos estos procesos la energía acumulada puede llegar a descargarse de tal modo que origine aumentos de tensión. Esta clase de sobretensiones puede preverse en gran parte y, por lo tanto, evitarse. Estas a su vez se pueden clasificar en dos categorías.

- » Sobretensiones de maniobra que designan los fenómenos transitorios que acompañan a los bruscos cambios de estado de una red, maniobras de interruptores, descargas a tierra, etc...
- » Sobretensiones temporales. Estas comprenden el estado permanente que puede resultar durante la puesta en servicio o fuera de servicio de una carga, sobre todo cuando la red comprende líneas de gran longitud; también se incluyen en este grupo las sobretensiones permanentes provocadas por fallas a tierra.

La forma de onda de las sobretensiones originadas por fenómenos transitorios es, casi siempre, una oscilación amortiguada de frecuencia media y escasa duración. Por el contrario, la forma de onda de las sobretensiones producidas por fenómenos estacionarios tienen una amplitud constante o casi constante; estas sobretensiones se desplazan por las líneas y aparatos en forma de ondas de choque. Los esfuerzos producidos por las sobretensiones de maniobra, sobre los aparatos y máquinas eléctricas;

son principalmente de naturaleza dieléctrica; por lo general, no existen efectos térmicos directos.

4.1.2.1 Casos de sobretensiones por maniobra.

Las operaciones de maniobra de interruptores, generan sobretensiones que pueden tener distinto origen, y por lo mismo producir distinto efecto. Algunos de los casos más comunes, son los que se mencionan a continuación.

- a) Energización de líneas de transmisión.
- b) Energización de transformadores.
- c) Operación de apertura en vacío o con carga.
- d) Desconexión de reactores y transformadores en vacío.
- e) Desconexión de cargas capacitivas.
- f) Desconexión trifásica.
- g) Fallas.

4.1.3 Sobretensiones temporales.

Las sobretensiones temporales no amortiguadas, se presentan en los sistemas en condiciones de estado permanente; y consisten en cambios en la amplitud de los voltajes a la frecuencia del sistema, debido a las operaciones de maniobra, cambios en la distribución de la potencia reactiva, etc.

La amplitud de las sobretensiones temporales, se indica por medio de un factor de "sobretensiones a la frecuencia del sistema". Las sobretensiones temporales son particularmente peligrosas para los transformadores, en los cuales, un valor elevado de este tipo de sobretensiones, causa una fuerte saturación en el núcleo magnético; con el consecuente incremento de las pérdidas en el hierro, y calentamiento interno. Aún en intervalos cortos de operación, bajo tales condiciones, pueden conducir a daños serios en el transformador.

4.2 Sobrecorrientes.

4.2.1 Causas, naturaleza y efectos.

Se agrupan bajo el nombre de corto-circuito a todos disturbios provocados por un contacto, entre un conductor y tierra o cualquier pieza metálica unida a ella o bien entre

conductores. En la casi totalidad de los casos, este contacto tiene lugar por medio de un arco eléctrico.

Los corto-circuitos tiene múltiples causas, estas pueden ser:

- » De origen eléctrico.
- » De origen mecánico.
- » De origen atmosférico

Experimentalmente se encuentra que del 70 al 80 % de los corto-circuitos se producen o al menos empiezan, entre una fase y tierra, si el disturbio no se elimina con suficiente rapidez, el arco puede reencender por segunda o tercera vez.

Los disturbios entre las tres fases (corto-circuito simétrico), que afectan a las líneas aéreas son debidos:

- » A fenómenos mecánicos susceptibles de producir un contacto entre ellas o de poner a tierra simultáneamente los tres conductores.
- » A una descarga atmosférica.
- » A causa de una falsa maniobra.

Los corto-circuitos entre dos fases, aparecen excepcionalmente y son debidos casi únicamente a causas mecánicas.

En general, la presencia de un corto-circuito sobre una red provoca sobrecorrientes, caídas de tensión, y desequilibrios en las tensiones y corrientes de las tres fases. Estos fenómenos, cuya importancia depende de la constitución de la red, origina toda una serie de consecuencias como se ve a continuación.

a) Calentamientos debidos a las corrientes de corto-circuito y averías originadas por los arcos. Los calentamientos producidos por las corrientes de corto-circuito, particularmente, en los cables subterráneos de mediana tensión que no poseen una tolerancia calorífica considerable.

b) Accidentes de interruptores. Los interruptores y fusibles deben tener una capacidad de apertura adecuada para que durante un corto-circuito puedan funcionar y cumplir su propósito. sin sufrir avería ni representar peligro para el personal y el equipo eléctrico. Además de la suficiente capacidad de apertura, para eliminar el disturbio con rapidez y

seguridad, el interruptor o fusible debe tener también una capacidad instantánea suficiente para resistir los efectos de los valores máximos de las corrientes de corto-circuito.

c) Esfuerzos electrodinámicos. El paso de las corrientes muy intensas va acompañado de esfuerzos dinámicos muy importantes que puedan producir deformaciones de barras y de conexiones, roturas de aisladores soportes e incluso, a veces, averías considerables sobre los arrollamientos de las bobinas de reactancia y de los transformadores, si estos no tienen la rigidez mecánica suficiente.

d) Caídas de tensión elevadas. Las corrientes de corto-circuito, al atravesar los diferentes elementos de las redes provocan caídas de tensión que pueden provocar la salida de operación de las máquinas síncronas o asíncronas y poner en peligro la estabilidad de las redes.

4.3 Efectos de los transitorios en el circuito magnético del transformador.

4.3.1 Conexión de un circuito monofásico con núcleo ferromagnético.

El planteamiento teórico de un circuito con núcleo ferromagnético es semejante al de un circuito de resistencia e inductancia constantes. El circuito se muestra en la figura 4.1 y la ecuación del sistema es la misma que se estableció en la sección 2.4.1

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V_m \sin(\omega t + \beta) \quad (4.1)$$

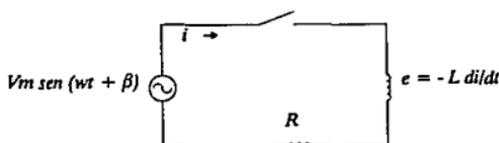


Figura 4.1 Representación de un circuito magnético no lineal.

solo que en este caso la ecuación no es lineal, a causa de la variación del coeficiente

$$L = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.2)$$

El desarrollo matemático exacto se hace prácticamente inaccesible dada la complejidad de la relación que pudiera existir entre L y la corriente i , sin embargo, para los casos de

aplicación práctica, es posible establecer ciertas hipótesis suficientemente aproximadas que permiten transformar nuevamente en lineal la ecuación diferencial propuesta facilitando así su solución. Esto consiste esencialmente en sustituir la característica magnética del hierro por segmentos rectilíneos y operar sobre éstos a los cuales, sin gran error, puede considerarse reducida la curva, para todos los efectos numéricos, en la principal aplicación de la conexión en vacío de un transformador.

El ciclo de histéresis del hierro tiene en general la forma indicada en la figura 4.2a) con las inducciones máximas de trabajo normales, $+B$ y $-B$; pero si estas rebasan ampliamente la saturación, la forma se acerca a la de la figura 4.2b) aproximada por segmentos rectilíneos. La corriente i_s para la cual se inicia la saturación total del hierro al llegar a la inducción B_s resulta despreciable comparada con la intensidad i de inducción máxima B en cuanto ésta excede apreciablemente el valor de saturación B_s .

Recordemos que la inducción de saturación B_s , es aquella a partir de la cual se puede considerar que el hierro ha perdido todas sus propiedades multiplicadoras del flujo con respecto al aire, lo que equivale a decir que la permeabilidad relativa del circuito magnético habrá descendido prácticamente a la unidad, como para el aire mismo y los materiales diamagnéticos.

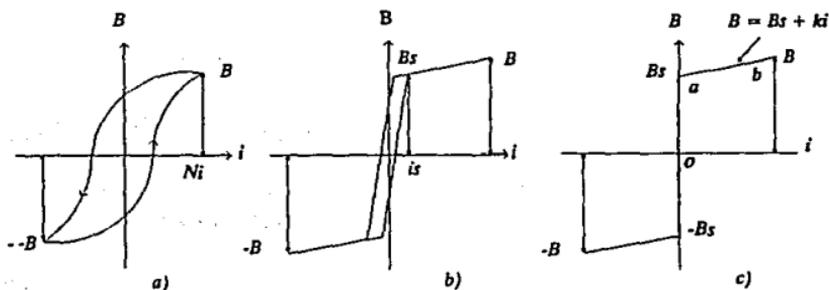


Figura 4.2 Evolución teórica del ciclo de histéresis para una fuerte saturación

Al ser i_s tan insignificante en el caso señalado, podemos considerarla sin ningún problema igual a cero, y entonces el ciclo de histéresis se transforma en la característica magnética de la figura 4.2c) constituida dentro de la región positiva por una zona oa de permeabilidad infinita y otra ab de permeabilidad relativa $\mu_r = 1$; y análogamente para la región negativa. La ecuación de B , en la zona positiva es:

$$B = B_s + ki$$

Si designamos por A_{eq} la sección total equivalente o efectiva de la bobina saturada, y a Φ_s como el flujo de saturación en dicha sección

$$\Phi = B A_{eq} = B_s A_{eq} + k_i A_{eq} = \Phi_s + k_1 i$$

con

$$\Phi_s = B_s A_{eq} = \text{cte.}$$

para una calidad determinada del hierro definida en este caso por la inducción de saturación B_s y para una sección A_{eq} dada, la ecuación del Φ es lineal, de donde se deriva el valor constante de la inductancia, como si el circuito magnético fuese de aire,

$$L = N \frac{d\Phi}{di} \quad (4.3)$$

Obsérvese que ahora, la inductancia constante L se calcula en base al circuito magnético completo de la bobina, exento de hierro mientras que L representa la inductancia instantánea variable, mucho más elevada, del circuito ferromagnético verdadero.

Sin embargo, lo más importante es conocer el valor máximo o de cresta de la corriente de cierre, para llegar de una manera simple a este resultado primero despreciaremos la resistencia y cualquier caída que pudiese ocurrir en la línea.

4.3.2 Cálculo aproximado del flujo máximo de conexión Φ despreciando la resistencia.

Si en la ecuación 4.1, suponemos $R = 0$, esta se convierte en,

$$L \frac{di}{dt} = V_m \text{sen}(\omega t + \beta) \quad (4.4)$$

puesto que las condiciones límites que nos permitirán hallar la constante de integración se caracteriza precisamente por el flujo Φ , introduciremos el valor de este, siendo;

$$L \frac{di}{dt} = N \frac{d\Phi}{di} \frac{di}{dt} = N \frac{d\Phi}{dt}$$

por lo tanto, resulta la siguiente ecuación;

$$N \frac{d\Phi}{dt} = V_m \text{sen}(\omega t + \beta)$$

Está ecuación es semejante a la ecuación 3.17, por lo que se resuelve de manera semejante, por tanto la solución puede escribirse como sigue:

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \beta) + C \quad (4.5)$$

En el momento de cerrarse el interruptor, el núcleo se encuentra preimantado con un cierto flujo remanente Φ_r determinado en magnitud y signo por el instante en que se interrumpió el último ciclo de histéresis a que hubiese quedando sometido anteriormente el núcleo; para $t = 0$ sería, pues, $\Phi = \Phi_r$ y,

$$\Phi_r = -\Phi_m \cos \beta + C \quad (4.6)$$

Siendo Φ_m la amplitud de la onda de flujo senoidal pura capaz de inducir la fem senoidal.

De la ecuación 4.6 el valor de la constante es:

$$C = \Phi_m \cos \beta + \Phi_r$$

sustituyendo en 4.5,

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \beta) + (\Phi_m \cos \beta + \Phi_r) \quad (4.7)$$

Por lo tanto, el flujo evolucionará según la senoide de régimen permanente dada por:

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \beta)$$

sobrepuesta a una componente continua, en $t = 0$, figura 4.3,

$$\Phi_c = \Phi_m \cos \beta + \Phi_r$$

Esta componente continua depende por una parte, del instante en que se aplica la fem, instante definido por el ángulo eléctrico β de la onda en el momento de cierre del interruptor; y por otra parte, de la magnitud del flujo remanente Φ_r consecuencia del estado magnético previo a la conexión.

Las circunstancias más desfavorables, es decir las que provocarían una máxima asimetría y la máxima desviación simultánea de la onda de flujo y, por consecuencia, el valor máximo de corriente, ocurren cuando el interruptor se cierra al pasar por cero la onda de la fem ($\beta = 0$, $\cos \beta = 1$) coincidiendo con un estado de imantación previa del hierro, tal que retenga en el núcleo el mayor valor posible de flujo remanente justamente en sentido contrario al que se precisaría en régimen permanente. Este valor no puede exceder nunca de Φ_m y en la práctica llega a alcanzar como máximo el 80% de la amplitud de éste flujo.

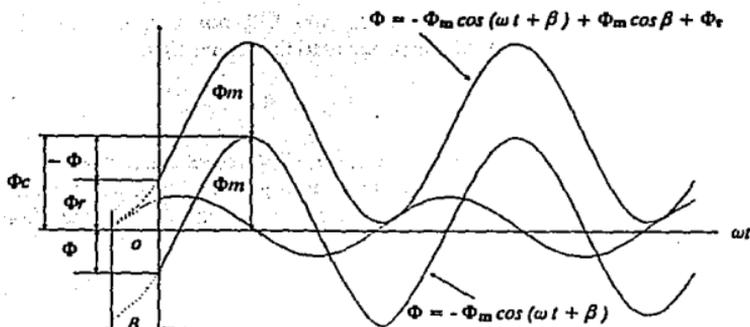


Figura 4.3 Evolución del flujo al cerrar el interruptor de un circuito, despreciando la resistencia y caídas de tensión.

Dado el carácter aleatorio de ambos factores, y contando con la presencia simultánea de una y otra circunstancia desfavorable, a fin de poder adoptar las medidas convenientes de seguridad¹, la ecuación 4.7 del flujo instantáneo se convierte en,

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + \Phi_m + \Phi_r$$

$$\Phi = \Phi_m (1 - \cos \omega t) + \Phi_r \quad (4.8)$$

Con una amplitud instantánea máxima posible cuando $\cos \omega t = -1$

$$\Phi = 2\Phi_m + \Phi_r = 2.8\Phi_m \quad (4.9)$$

No debemos olvidar que esta ecuación resulta de las condiciones inicialmente descritas. La ecuación 4.8 se comprende físicamente ante la necesidad de una evolución senoidal del flujo por exigencias de la fem senoidal aplicada, pero iniciándose la variación, no a partir de cero, sino de un valor preestablecido Φ_r , figura 4.4

4.3.3 Corriente transitoria máxima de conexión despreciando la resistencia.

Una vez encontrada la expresión de máximo flujo que debe crear la bobina y encontrándose el circuito magnético en condiciones de sobresaturación, es decir como si fuese núcleo de aire ($\mu_r = 1$), se calcula la permeancia magnética de la bobina con núcleo de aire, de acuerdo con esta permeabilidad y según la estructura geométrica del campo, la fmm máxima necesaria está dada por,

¹Estos fenómenos afectan sobre todo el ajuste de los relevadores de protección para transformadores.

$$NI = \frac{\Phi - \Phi_s}{\Lambda_{eq}}$$

siendo Φ_s el flujo de saturación del circuito magnético, figura 4.2

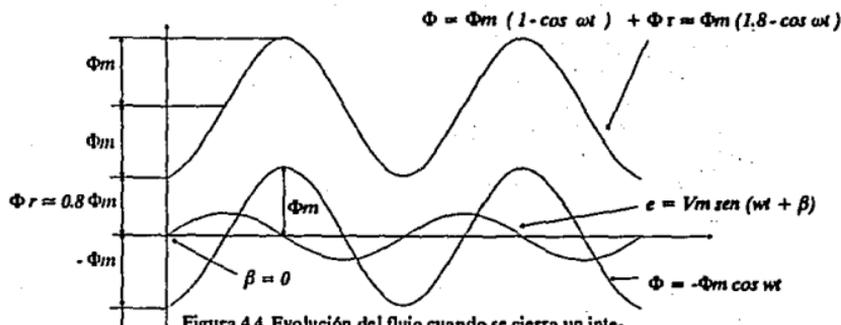


Figura 4.4 Evolución del flujo cuando se cierra un interruptor, para la condición más desfavorable.

con Φ y Φ_s en Wb y Λ_{eq} en Wb/Av, de donde, el valor de la corriente vale:

$$I = \frac{\Phi - \Phi_s}{N \Lambda_{eq}} \quad [A] \quad (4.10)$$

para el cálculo de la permeancia Λ_{eq} tendremos:

$$\Lambda_{eq} = \mu_0 \mu_r \frac{A_{eq}}{l_{eq}} \quad [Wb/Av]$$

donde $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$

$$\mu_r = 1$$

A_{eq} = Sección equivalente para el paso de flujo en m^2

l_{eq} = Longitud equivalente de las líneas de fuerza en m

Cuando la bobina constituye el primario de un transformador, la sección equivalente A_{eq} viene a ser la delimitada por el diámetro interno D_i de dicho arrollamiento extendido por cada lado en $1/3$ del grosor del arrollamiento en cuestión perpendicularmente a la dirección del flujo. En cuanto a la longitud equivalente del circuito es la que separa los extremos del bobinado o a la suma de las dos mitades de él, si se encuentra dividido entre dos columnas, como sucede para el transformador monofásico de columnas con arrollamientos separados, figura 4.5

Así, para una bobina circular, de diámetro interno D_i , y con todas las longitudes en metros,

$$A_{eq} = \frac{\pi \left\{ Di + \frac{2b}{3} \right\}^2}{4} \quad [m^2]$$

sustituyendo la ecuación 4.9 en 4.10 tenemos:

$$I = \frac{\Phi - \Phi_s}{N \Lambda_{eq}} = \frac{(2\Phi_m + \Phi_r) - \Phi_s}{N \Lambda_{eq}} = \frac{\Phi_m}{N \Lambda_{eq}} \left\{ 2 + \frac{\Phi_r}{\Phi_m} - \frac{\Phi_s}{\Phi_m} \right\} \quad (4.11)$$

Si designamos a B como la inducción máxima de servicio en el hierro de sección neta A_{fe} en m^2 ;

$$B = \frac{\Phi_m}{A_{fe}} \quad (4.12)$$

a B_r como la inducción residual que permanecería en el núcleo tras haberse llegado en él al máximo flujo B, es decir, con el flujo remanente Φ_r :

$$B_r = \frac{\Phi_r}{A_{fe}} \quad (4.13)$$

y a B_s como la inducción de saturación de la chapa magnética:

$$B_s = \frac{\Phi_s}{A_{fe}} \quad (4.14)$$

igualando 4.12 con 4.13, se tiene:

$$\frac{\Phi_r}{\Phi_m} = \frac{B_r}{B} \quad (4.15)$$

y 4.12 con 4.14,

$$\frac{\Phi_s}{\Phi_m} = \frac{B_s}{B} \quad (4.16)$$

sustituyendo las ecuaciones 4.15, 4.16 y el valor de Φ_m dado en la ecuación 3.18, en 4.11 obtenemos,

$$I = \frac{V_m}{\omega N^2 \Lambda_{eq}} \left\{ 2 + \frac{B_r}{B} - \frac{B_s}{B} \right\} \quad (4.17)$$

Pero si ahora designamos como L_{eq} a la inductancia propia de la bobina con un circuito magnético lineal, (de aire):

$$L_{eq} = N^2 \Lambda_{eq} = cte. \quad [H] \quad (4.18)$$

con una reactancia constante X_{eq}

$$X_{eq} = \omega L_{eq} \quad [\Omega] \quad (4.19)$$

la expresión 4.17 se transforma en:

$$I = \frac{V_m}{X_{eq}} \left\{ 2 + \frac{B_r}{B} - \frac{B_s}{B} \right\} \quad [A] \quad (4.20)$$

que es la expresión final de la corriente transitoria máxima.

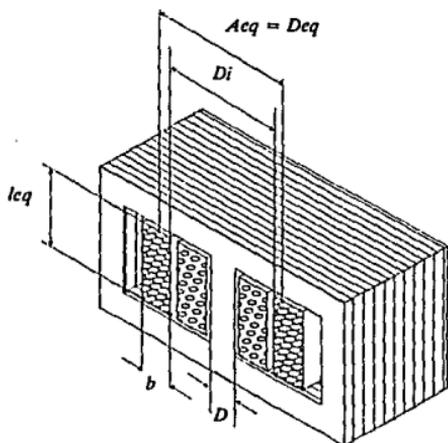


Figura 4.5 Dimensiones equivalentes para el cálculo de la corriente de conexión en los transformadores

Suponiendo a $B_r/B = 0.8$ y $B_s/B \approx 1.2$, como cifras muy normales en los transformadores de chapa orientada, y poniendo además el valor eficaz del voltaje en vez del valor máximo, se tiene:

$$I = \frac{\sqrt{2}V}{X_{eq}} (2 + 0.8 - 1.2) = 2.26 \frac{V}{X_{eq}}$$

$$I = 2.26 \frac{V}{X_{eq}}$$

(4.21)

Los resultados precedentes, no tienen en cuenta la caída de tensión que la corriente máxima puede producir en el sistema de alimentación y por consiguiente son más exactos cuanto mayor sea la potencia de la red con respecto a la de la bobina.

4.3.4 Cálculo del flujo máximo de conexión teniendo en cuenta el amortiguamiento.

En esta sección incluiremos la resistencia en la cual irá implícitamente involucrada la de la línea de alimentación. Partiendo de la ecuación 4.1, a la cual incluiremos los flujos para poder calcular las constantes de integración por el valor supuesto de los mismos en las condiciones iniciales.

Sustituyendo las ecuaciones 4.2 y 4.10 en 4.1, realizando operaciones y simplificando se obtiene:

$$\frac{N^2 \Lambda_{eq}}{R} \frac{d\Phi}{dt} + \Phi = \Phi_s + \frac{N \Lambda_{eq}}{R} V_m \operatorname{sen}(\omega t + \beta) \quad (4.22)$$

El numerador $N^2 \Lambda_{eq}$ constituye la expresión de la inductancia lineal de la bobina (dada en la ecuación 4.18), de tal modo, que el cociente

$$\frac{N^2 \Lambda_{eq}}{R} = \frac{L_{eq}}{R} = \tau_{eq}$$

vendría a ser la constante de tiempo (τ_{eq}) de la bobina con núcleo de hierro, por lo que la ecuación 4.22 puede reescribirse de la siguiente forma:

$$\tau_{eq} \frac{d\Phi}{dt} + \Phi = \Phi_s + \frac{N \Lambda_{eq}}{R} V_m \operatorname{sen}(\omega t + \beta) \quad (4.23)$$

La solución transitoria de ésta ecuación se obtiene igualando a cero el primer miembro,

$$\tau_{eq} \frac{d\Phi}{dt} + \Phi = 0$$

La ecuación anterior tiene como solución,

$$\Phi = K e^{-t/\tau_{eq}}$$

En cuanto a la solución particular asociada al segundo miembro esta dada por el flujo alterno simétrico Φ capaz de inducir una fem igual a la aplicada al circuito, despreciando la pequeña caída en la resistencia frente a la elevada fem de la bobina. Como se discutió

en el párrafo 1.4.3 y 1.4.4, el flujo senoidal permanente Φ se atrasa $\pi/2$ respecto a la tensión aplicada, por tanto se define por una expresión de la forma:

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \beta)$$

por lo que la solución completa de la ecuación 4.23 es:

$$\Phi = K e^{-t/\tau_{eq}} - \Phi_m (\cos \omega t + \beta) \quad (4.24)$$

para obtener el valor de la constante K , suponemos que inicialmente $t = 0$ y $\Phi = \Phi_r$

$$\Phi_r = K - \Phi_m \cos \beta$$

de donde,

$$K = \Phi_r + \Phi_m \cos \beta$$

sustituyendo el valor de la constante K en la ecuación 4.24, se obtiene:

$$\Phi = (\Phi_r + \Phi_m \cos \beta) e^{-t/\tau_{eq}} - \Phi_m \cos(\omega t + \beta)$$

y en las condiciones más desfavorables, o sea, para $\beta = 0$

$$\Phi = \Phi_m (e^{-t/\tau_{eq}} - \cos \omega t) + \Phi_r e^{-t/\tau_{eq}} \quad (4.25)$$

Esta ecuación solo se diferencia de la ecuación 4.8 en que los sumandos referentes tanto al flujo inicial Φ_m como al flujo remanente Φ_r se encuentran afectados por el factor exponencial decreciente consecuencia de haber tomado en cuenta el amortiguamiento, figura 4.6

Esto no altera, el valor de la ecuación 4.9, pero disminuye ligeramente el valor de Φ que se presenta también para un valor de ωt muy próximo a π , además de saber que en la práctica este valor no llega a alcanzar el 80% de la amplitud del flujo normal. Si esto se realiza para $\omega t = \pi$ y $t = T/2$, la ecuación 4.25 se reduce a:

$$\Phi = \Phi_m (1 + 1.8 e^{-T/2\tau_{eq}}) \quad [Wb] \quad (4.26)$$

Pero

$$\frac{T}{2\tau_{eq}} = \frac{\omega T}{2\omega\tau_{eq}} = \frac{2\pi}{2\omega \left(\frac{L}{R}\right)} = \frac{\pi}{\omega \frac{L}{R}} = \frac{\pi}{\tan \varphi_{eq}}$$

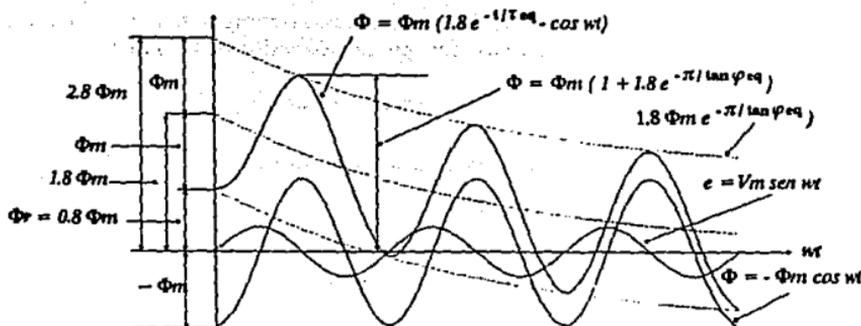


Figura 4.6 Evolución del flujo de conexión en las condiciones más desfavorables, teniendo en cuenta el efecto amortiguador.

donde φ_{eq} es el ángulo propio del circuito magnético, sin núcleo de hierro, por tanto la ecuación 4.26 se convierte en,

$$\Phi = \Phi_m (1 + e^{-\pi/\tan \varphi_{eq}}) + \Phi_r e^{-\pi/\tan \varphi_{eq}} \quad (4.27)$$

$$\Phi = \Phi_m (1 + 1.8 e^{-\pi/\tan \varphi_{eq}}) \quad (4.28)$$

4.3.5 Corriente transitoria máxima de conexión con amortiguamiento.

Para lograr el flujo máximo Φ en la ecuación 4.27, se necesita una fmm y una corriente I en la bobina dada nuevamente por la ecuación 4.10

Si ahora, sustituimos la ecuación 4.27 en 4.10 y simplificando obtenemos:

$$I = \frac{\Phi - \Phi_s}{N \Lambda_{eq}} = \frac{\Phi_m (1 + e^{-\pi/\tan \varphi_{eq}}) + \Phi_r e^{-\pi/\tan \varphi_{eq}} - \Phi_s}{N \Lambda_{eq}}$$

Dividiendo y multiplicando por Φ_m la ecuación anterior resulta,

$$I = \frac{\Phi_m}{N \Lambda_{eq}} \left\{ (1 + e^{-\pi/\tan \varphi_{eq}}) + \frac{\Phi_r}{\Phi_m} e^{-\pi/\tan \varphi_{eq}} - \frac{\Phi_s}{\Phi_m} \right\} \quad [A] \quad (4.29)$$

Si $R = 0$ y $\tan \varphi_{eq} = L_{eq}/R = \infty$, la fórmula anterior se hace igual a la ecuación 4.11

Tomando en cuenta nuevamente las ecuaciones 4.15, 4.16, 4.19 y el valor de Φ_m dado en la ecuación 3.18, la expresión 4.29 se convierte en:

$$I = \frac{V_m}{X_{eq}} \left\{ (1 + e^{-\pi/\tan \varphi_{eq}}) + \frac{B_r}{B} e^{-\pi/\tan \varphi_{eq}} - \frac{B_s}{B} \right\} \quad (4.30)$$

Si admitimos las relaciones normales en la construcción de transformadores con chapas de grano orientado $B_r/B \approx 0.8$, $B_s/B \approx 1.2$ y el valor eficaz del voltaje, se llega a:

$$I = \frac{\sqrt{2}V}{X_{eq}} \left\{ 1 + (1 + 0.8) e^{-\pi/\tan \varphi_{eq}} - 1.2 \right\}$$

$$I = \frac{V}{X_{eq}} \left\{ 2.54 e^{-\pi/\tan \varphi_{eq}} - 0.28 \right\} \quad [A] \quad (4.31)$$

$$I = \frac{V}{X_{eq}} \Gamma_{arr} \quad [A] \quad (4.32)$$

Siendo Γ_{arr} el factor de la corriente de arranque.

4.3.6 Influencia de la inductancia de la línea sin amortiguamiento.

La resistencia de la línea y de la bobina se encuentran reunidas en R , la cual determina el amortiguamiento de los componentes aperiódicos, pero las caídas de tensión por ser muy pequeñas se pueden despreciar.

La reactancia de la línea no influye sobre el amortiguamiento aperiódico, pero cuando su valor es comparable con el de la bobina en estado de saturación, la tensión en los bornes de esta última pueden reducir su magnitud transitoriamente al cerrar el interruptor. La inductancia de la línea se encuentra en serie con la inductancia de la bobina ($L_L + L_{eq}$), con reactancias ($X_L + X_{eq}$) también en serie, mientras persista el estado de saturación.

La tensión en los bornes de la bobina es:

$$V_b = V \frac{L_{eq}}{L_{eq} + L_L} \quad (4.33)$$

La ecuación del circuito en estado de saturación en este caso es:

$$(L_{eq} + L_L) \frac{di}{dt} = V_m \operatorname{sen}(\omega t + \beta)$$

o bien,

$$L_{eq} \frac{di}{dt} = \frac{L_{eq}}{L_{eq} + L_L} V_m \sin(\omega t + \beta)$$

Si seguimos representando por Φ_r y Br el flujo y la inducción remanentes máximos posibles en el núcleo, sus valores vendrán determinados por las condiciones de funcionamiento normal, prácticamente bajo la tensión V , puesto que las caídas de la línea en estado permanente, sin saturación de la bobina, descenderán mucho, así como la corriente absorbida.

Por lo tanto, podemos decir, que a las magnitudes del flujo y de la inducción remanentes no les afecta la impedancia de la línea, manteniéndose en el peor de los casos el mismo valor máximo residual $\Phi_r \approx 0.8 \Phi_m$, producto de aplicar íntegramente la tensión V a los bornes durante la última permanencia en servicio.

Así, la solución de la ecuación 4.8 del flujo instantáneo en el caso más desfavorable de cerrarse el circuito al pasar la tensión por cero ($\beta = 0$), se modificará ahora proporcionalmente en los términos afectados por las caídas, pero no en los afectados por magnetismo remanente, como sigue,

$$\Phi = \frac{L_{eq}}{L_{eq} + L_L} \{ \Phi_m (1 - \cos \omega t) + \Phi_r \}$$

Sin embargo, esta solución no es aplicable a lo largo de un tiempo indefinido sino tan sólo en tanto se mantenga la reducción de la tensión en los bornes en la relación señalada, es decir, solamente en los intervalos de saturación total del hierro, pero válida sin embargo para la zona de máximo flujo y máxima corriente de conexión que es la que interesa, para medio ciclo ($T/2$) y $\cos \omega t = -1$

$$\Phi = \frac{L_{eq}}{L_{eq} + L_L} 2 \Phi_m + \Phi_r$$

$$\Phi = \Phi_m \left\{ 2 \frac{L_{eq}}{L_{eq} + L_L} + 0.8 \right\}$$

[Wb]

Puesto que la tensión V en el punto de alimentación será, en general, distinta de la nominal V_n de la bobina (a la cual corresponde un flujo nominal Φ_n), Φ_m se calcula de la siguiente manera,

$$\Phi_m = \Phi_n \frac{V}{V_n}$$

La corriente máxima I en las condiciones más desfavorables se reduce según la ecuación 4.20, por lo que en éste caso queda como:

$$I = \frac{\sqrt{2} V}{X_{eq}} \left\{ 2 \frac{X_{eq}}{X_{eq} + X_L} + \frac{B_r}{B} - \frac{B_s}{B_n} \frac{V_n}{V} \right\} \quad [A] \quad (4.34)$$

Teniendo en cuenta los valores prácticos de la inducción remanente y de saturación, así como $B_s / B_n = 1.2$, la ecuación 4.34 se convierte en,

$$I = \frac{\sqrt{2} V}{X_{eq}} \left\{ 2 \frac{X_{eq}}{X_{eq} + X_L} + 0.8 - 1.2 \frac{V_n}{V} \right\} \quad [A] \quad (4.35)$$

4.3.7 Estudio del caso general con amortiguamiento y caída de tensión reactiva en la línea.

Todas las soluciones encontradas hasta ahora solo son aplicables mientras el hierro se halle sobresaturado, no es posible extender su validez a cualquier instante, ni, en particular, a las zonas inferiores de la onda de flujo caracterizados por una permeabilidad relativa del hierro variable y, desde luego, muy superior a 1.

La curva de corriente de conexión más desfavorable es siempre, totalmente asimétrica durante los primeros ciclos, descendiendo casi hasta cero en cada semiciclo. Como la tensión en los bornes de la bobina esta dada por la ecuación 4.33 y además la resistencia de la misma es R_b , la ecuación del circuito se convierte en:

$$(L_{eq} + L_L) \frac{di}{dt} + (R_b + R_L) i = V_m \operatorname{sen}(\omega t + \beta)$$

Tomando en cuenta las condiciones de cierre más desfavorables; la solución de esta ecuación se determina como se obtuvo en la sección 4.3.4, obteniendo así la ecuación del flujo máximo en la bobina,

$$\Phi = \Phi_m (1 + e^{-\pi/\omega N \varphi}) + \Phi_r e^{-\pi/\omega N \varphi}$$

donde Φ_m ahora será un flujo ficticio producido por la tensión V_m , es decir,

$$\Phi_m = \frac{V_m}{\omega N}$$

que deberá corregirse para la bobina en la relación en que se reduce la tensión senoidal que llega efectivamente a los bornes del transformador en las condiciones transitorias de linealidad supuestas para todo el circuito, es decir,

$$\frac{L_{eq}}{L_{eq} + L_L}$$

Por lo que definitivamente el flujo transitorio máximo en la bobina está dado por:

$$\Phi = \frac{L_{eq}}{L_{eq} + L_L} \Phi_m (1 + e^{-\pi/\omega\varphi t}) + \Phi_r e^{-\pi/\omega\varphi t}$$

con

$$\tan \varphi_c = \frac{X_{eq} + X_L}{R_b + R_L}$$

Tomando en cuenta la caída de reactancia en la línea, la intensidad transitoria máxima de conexión con amortiguamiento, se desprende de manera semejante a la ecuación 4.30

$$I = \frac{V_m}{X_{cq}} \left\{ \frac{X_{cq}}{X_{cq} + X_l} (1 + e^{-\pi/\omega\varphi t}) + \frac{B_r}{B} e^{-\pi/\omega\varphi t} - \frac{B_s}{B} \right\} \quad [A]$$

con el término,

$$\frac{B_s}{B} = \frac{B_s}{B_n} \frac{B_n}{B} = \frac{B_s}{B_n} \frac{V_n}{V}$$

Si empleamos como para todos los casos chapa laminada en frío la ecuación anterior se reduce de la siguiente manera,

$$I = \frac{\sqrt{2} V}{X_{cq}} \left\{ \frac{X_{cq}}{X_{cq} + X_L} (1 + e^{-\pi/\omega\varphi t}) + 0.8 e^{-\pi/\omega\varphi t} - 1.2 \frac{V_n}{V} \right\} \quad [A] \quad (4.36)$$

4.3.8 Corriente de arranque de un transformador en vacío.

La corriente de arranque I_{arr} es el valor máximo de la corriente transitoria de conexión al primario con el secundario abierto.

Para el caso más general, o sea tomando en cuenta la resistencia y la reactancia de la línea, así como la resistencia del primario. (aunque las caídas por resistencia se desprecian.), la ecuación de la corriente transitoria máxima I con las relaciones normales de remanencia y saturación será semejante a la ecuación 4.36

$$I_{arr} = \frac{\sqrt{2} V}{X_{cq1}} \left\{ \frac{X_{cq1}}{X_{cq1} + X_L} (1 + e^{-\pi/\omega\varphi t_1}) + \frac{B_r}{B} e^{-\pi/\omega\varphi t_1} - \frac{B_s}{B} \frac{V_{n1}}{V} \right\} \quad (4.37)$$

Con,

$$\tan \varphi_{c1} = \frac{X_{eq1} + X_{L1}}{R_1 + R_{L1}}$$

Mientras que la ecuación para la corriente de arranque con caída de reactancia en la línea, pero sin amortiguamiento apreciable es:

$$I_{arr} = \frac{\sqrt{2} V_1}{X_{eq1}} \left\{ 2 \frac{X_{eq1}}{X_{eq1} + X_L} + \frac{B_r}{B} - \frac{B_s V_{n1}}{B V_1} \right\} \quad [A] \quad (4.38)$$

Si ahora la caída por reactancia de la línea es nula, pero con apreciable resistencia de amortiguamiento, la ecuación para la corriente de arranque queda como,

$$I_{arr} = \frac{\sqrt{2} V}{X_{eq1}} \left\{ 1 + e^{-\pi/\omega \varphi_{c1}} + \frac{B_r}{B_n} e^{-\pi/\omega \varphi_{c1}} - \frac{B_s}{B_n} \right\} \quad [A] \quad (4.39)$$

Y despreciando el efecto amortiguador, o sea $R_1 = 0$, $R_{L1} = 0$ y $\tan \varphi_{c1} = \infty$, la corriente de arranque vale:

$$I_{arr} = \frac{\sqrt{2}}{X_{eq1}} \left\{ 2 + \frac{B_r}{B_n} - \frac{B_s}{B_n} \right\} \quad [A] \quad (4.40)$$

Admitiendo de modo uniforme las relaciones normales descritas anteriormente y además $B_r/B_n = 0.8$, las ecuaciones 4.37 a 4.40 se reducen como sigue:

$$I_{arr} = \frac{\sqrt{2} V_1}{X_{eq1}} \left\{ \frac{X_{eq1}}{X_{eq1} + X_L} (1 + e^{-\pi/\omega \varphi_{c1}}) + 0.8 e^{-\pi/\omega \varphi_{c1}} - 1.2 \frac{V_{n1}}{V_1} \right\} [A] \quad (4.41)$$

$$I_{arr} = \frac{\sqrt{2} V_1}{X_{eq1}} \left\{ 2 \frac{X_{eq1}}{X_{eq1} + X_L} + 0.8 - 1.2 \frac{V_{n1}}{V_1} \right\} \quad [A] \quad (4.42)$$

$$I_{arr} = \frac{\sqrt{2} V_1}{X_{eq1}} \left\{ 1 + 1.8 e^{-\pi/\omega \varphi_{c1}} - 1.2 \right\} \quad [A] \quad (4.43)$$

$$I_{arr} = \frac{\sqrt{2} V_1}{X_{eq1}} \cdot 1.6 = 2.25 \frac{V_1}{X_{eq1}} \quad [A] \quad (4.44)$$

En este análisis se supone que la inductancia del devanado es constante, y solo es válido mientras que el circuito magnético se encuentre saturado.

Estas ecuaciones lo único que reflejan con exactitud es el proceso del primer ciclo por encima del estado de saturación, sin embargo, es el más importante, ya que en él se encuentra contenida la corriente de arranque.

4.3.9 Corriente relativa de arranque

Análogamente como se hizo para el estudio del corto-circuito, aquí utilizaremos los parámetros de resistencia, reactivancias y caídas de tensión en pu, por lo que la impedancia de carga nominal referida al primario es:

$$Z_{n1} = \frac{V_{n1}}{I_{n1}}$$

Por lo que ahora la resistencia y reactivancia del primario, así como la resistencia y reactivancia de la línea en pu. serán:

$$R_{1pu} = \frac{R_1}{Z_{n1}}$$

$$X_{eq1pu} = \frac{X_{eq1}}{Z_{n1}}$$

$$R_{L1pu} = \frac{R_{L1}}{Z_{n1}}$$

$$X_{L1pu} = \frac{X_{L1}}{Z_{n1}}$$

La caída de tensión en pu. para la resistencia del primario es

$$V_{R1pu} = \frac{V_{R1}}{V_{n1}} = \frac{R_1 I_{n1}}{V_{n1}} = \frac{R_1 I_{n1}}{Z_{n1} I_{n1}} = \frac{R_1}{Z_{n1}} = R_{1pu}$$

de una manera similar se obtienen las caídas en la reactivancia del primario, resistencia y reactivancia de la línea siendo,

$$V_{X_{eq1pu}} = X_{eq1pu}$$

$$V_{R_{L1pu}} = R_{L1pu}$$

$$V_{X_{L1pu}} = X_{L1pu}$$

La corriente transitoria de arranque durante la puesta en servicio del transformador en vacío, referida a la corriente eficaz nominal, está dada según las circunstancias que convengan a un caso en particular, dado por las ecuaciones 4.41 a 4.44, por ejemplo para la corriente de arranque con amortiguamiento y caída de reactivancia en la línea (ecuación 4.41), tenemos:

$$I_{arrpu} = \frac{\sqrt{2}}{X_{cq1pu}} \frac{V_1}{V_{n1}} \left\{ \frac{X_{cq1pu}}{X_{cq1pu} + X_{L1pu}} (1 + e^{-\pi/\tan\varphi_{c1}}) + 0.8 e^{-\pi/\tan\varphi_{c1}} - 1.2 \frac{V_{n1}}{V_1} \right\} \quad (4.45)$$

Siendo:

$$\tan \varphi_{c1} = \frac{X_{cq1} + X_{L1}}{R_1 + R_{L1}} = \frac{X_{cq1pu} + X_{L1pu}}{R_{1pu} + R_{L1pu}}$$

Con caída reactiva en la línea y sin amortiguamiento:

$$I_{arrpu} = \frac{\sqrt{2}}{X_{cq1pu}} \frac{V_1}{V_{n1}} \left\{ 2 \frac{X_{cq1pu}}{X_{cq1pu} + X_{L1pu}} + 0.8 - 1.2 \frac{V_{n1}}{V_1} \right\} \quad [^{\circ}/i] \quad (4.46)$$

Sin caída de reactancia en la línea, pero con amortiguamiento:

$$I_{arrpu} = \frac{\sqrt{2}}{X_{cq1pu}} \left\{ 1 + 1.8 e^{-\pi/\tan\varphi_{c1}} - 1.2 \right\} \quad [^{\circ}/i] \quad (4.47)$$

con:

$$\tan \varphi_{cq1} = \frac{X_{cq1}}{R_1} = \frac{X_{cq1pu}}{R_{cq1pu}}$$

Sin caída de reactancia en la línea, y sin amortiguamiento:

$$I_{arrpu} = \frac{\sqrt{2}}{X_{cq1pu}} 1.6 = \frac{2.26}{X_{cq1pu}} \quad [^{\circ}/i] \quad (4.48)$$

4.3.10 Potencia magnetizante de arranque.

Otro método para obtener la corriente de arranque, es a partir de la potencia magnetizante Q_g requerida por unidad de masa, por kilogramo, de chapa para alcanzar la inducción máxima de régimen B_n en el núcleo, cifra que solo depende de la calidad del material y del valor de dicha inducción. El producto de la potencia magnetizante Q_g (en vars eficaces / kg) y la masa del núcleo gfe (en kg) da por resultado la potencia magnetizante total Q_{μ} (vars eficaces), por lo tanto, la corriente eficaz de magnetización con respecto a la eficaz primaria a plena carga del transformador se define por

$$I_{\mu pu} = \frac{I_{\mu}}{I_{n1}} = \frac{Q_g gfe}{S_n}$$

Para aplicar este método al caso de la corriente de arranque, empezaremos por deducir la expresión de la potencia máxima reactiva o de magnetización Q_v por unidad de volumen del circuito magnético. (VA / m^3).

Este circuito por comportarse como si fuese diamagnético, la expresión admite una forma analítica, mientras que cuando se trata de la corriente de magnetización para el núcleo de hierro, hay que utilizar la curva empírica de magnetización.

Una vez conocida la potencia máxima instantánea Q_v y el volumen V_{eq1} del circuito magnético, se encuentra la potencia máxima reactiva total de arranque Q_{arr} , la cual coincide en valor relativo con I_{arrpu} de la corriente de arranque referida a la corriente primaria eficaz nominal o a plena carga.

Si tomamos en cuenta la resistencia del circuito y despreciamos la caída reactiva de la línea, la corriente de arranque bajo la tensión nominal V_n es:

$$I_{arr1} = \frac{\sqrt{2}V_{n1}}{X_{eq1}} \left\{ 1 + 1.8 e^{-\pi/\tan\varphi_{t1}} - 1.2 \right\}$$

si definimos a,

$$\Gamma_{arr} = \sqrt{2} (1 + 1.8 e^{-\pi/\tan\varphi_{t1}} - 1.2)$$

la corriente de arranque es;

$$I_{arr} = \frac{V_{n1}}{X_{eq1}} \Gamma_{arr}$$

Esta corriente de arranque implica una potencia reactiva convencional de cresta en el arranque, dada por:

$$Q_{arr} = V_{n1} I_{arr} = V_{n1} \frac{V_{n1}}{X_{eq1}} \Gamma_{arr} = \frac{V_{n1}^2}{X_{eq1}} \Gamma_{arr} \quad (4.49)$$

puesto que la tensión en los bornes del transformador es prácticamente igual a la fem inducida en el primario con un valor eficaz definido por la ecuación 3.22, siendo en este caso,

$$V_{n1} \approx E_{n1} = 4.44 f N_1 \Phi_n \quad (4.50)$$

donde Φ_n es la amplitud del flujo nominal abrazado por el devanado, que a su vez, en condiciones de saturación total, puede ponerse en términos de la inducción máxima de arranque B_{eq1} y de la sección diamagnética equivalente S_{eq} ,

$$\Phi_n = B_{eq1} S_{eq1} \quad (4.51)$$

Por otra parte, la reactancia X_{eq1} con el coeficiente de autoinducción L_{eq1} y la permeancia Λ_{eq1} para el circuito diamagnético con su sección S_{eq1} y longitud equivalente l_{eq1} vale, con $\mu_r = 1$

$$X_{eq1} = \omega L_{eq1} = \omega (N_1^2 \Lambda_{eq1}) = \omega N_1^2 \mu_0 \frac{S_{eq1}}{l_{eq1}} \quad (4.52)$$

Si sustituimos en las ecuaciones 4.50, 4.51 y 4.52 en 4.49, realizando operaciones y reduciendo términos se llega a la siguiente ecuación,

$$Q_{arr} = \frac{\omega}{2\mu_0} B_{eq1}^2 V_{eq1} \Gamma_{arr} \quad [\text{VA}]$$

Siendo $V_{eq1} = (S_{eq1}) (L_{eq1})$, el volumen del circuito diamagnético equivalente por lo que la potencia de cresta en el arranque por unidad de volumen es,

$$Q_v = \frac{Q_{arr}}{V_{eq1}} = \frac{\omega}{2\mu_0} B_{eq1}^2 \Gamma_{arr} \quad [\text{VA/m}^3] \quad (4.53)$$

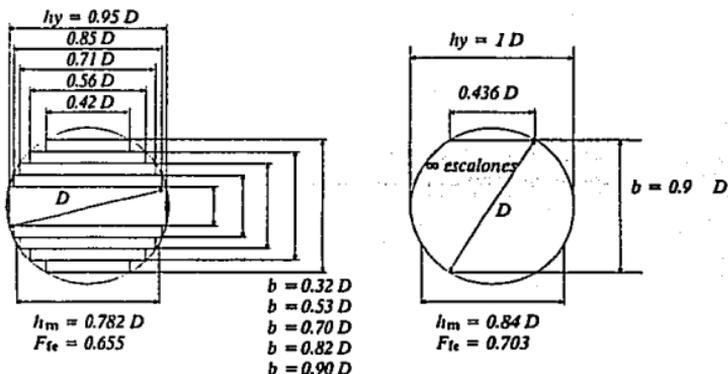


Figura 4.7 Formas normales del núcleo y factor seccional F_{fe} para el cálculo de la sección neta de hierro.

Si ponemos B_{eq1} en función de la inducción máxima normal B_n en el hierro de sección neta S_{fe} ,

$$B_{eq1} = B_n \frac{S_{fe}}{S_{eq1}} = \frac{B_n F_{fe} D^2}{\frac{\pi}{4} (D_{eq1})^2} = B_n \frac{4}{\pi} F_{fe} \left(\frac{D}{D_{eq1}}\right)^2 \quad [T]$$

con

$$D_{eq1} = D_{i1} + \frac{2}{3}b_1$$

y siendo F_{fe} el factor seccional del núcleo que puede tomarse directamente de la figura 4.7, según el número de escalones y D el diámetro circunscrito al núcleo de hierro y D_i el diámetro interior del devanado primario.

finalmente, se tiene:

$$Q_v = 4.04 \times 10^{-6} f F_{fe}^2 \left(\frac{D}{D_{eq1}}\right)^4 B_n^2 \Gamma_{arr} \quad [\text{vars} / \text{m}^3] \quad (4.54)$$

Una vez obtenido el valor de Q_v , podemos obtener la potencia de arranque

$$Q_{arr} = Q_v V_{eq1} \quad [\text{Vars}] \quad (4.55)$$

Y para el valor relativo de la corriente de cresta,

$$I_{arr_{pu}} = \frac{I_{arr}}{I_{n1}} = \frac{Q_{arr}}{S_n} \quad [u/i]$$

para las ecuaciones 4.45, 4.46 y 4.48 basta sustituir Γ_{arr} en la ecuación 4.53 por las expresiones respectivas que multiplican a la fracción

$$\frac{1}{X_{eq1_{pu}}}$$

CAPITULO 5

Pruebas y puesta en servicio

5.1 Introducción

La puesta en servicio de transformadores de potencia de altos y extra altos voltajes (110 KV, hasta 400 KV) es una operación de mucha importancia, ya que de estas condiciones, depende mucho la vida del equipo y la seguridad de que no se tendrán fallas en los aislamientos de transformadores nuevos, como frecuentemente ha venido sucediendo en transformadores de capacidades medias (2 a 10 MVA) y voltajes de 110 KV. Por lo anterior se ha establecido un proceso de puesta en servicio para los transformadores pudiendo utilizarse en transformadores de hasta 400 KV.

5.2 Puesta en servicio de transformadores de potencia.

Dependiendo de capacidad y voltaje las condiciones en que se recibe un transformador son las siguientes.

- a) Transformador sin aceite, lleno de nitrógeno, sin bushings ni accesorios.
- b) Transformador completamente armado, sin aceite y lleno de nitrógeno.
- c) Transformador completamente armado y lleno con su aceite.

El procedimiento que se describirá para la puesta en servicio es aplicable completamente a los transformadores que se reciben en las condiciones indicadas en los incisos a y b, y en casos necesarios para los transformadores mencionados en el inciso c, que por su importancia sea necesario o que debido a pruebas eléctricas dudosas haya necesidad de reacondicionar.

5.3 Procedimiento para puesta en servicio.

5.3.1 Inspección.

Si es posible se efectuará una inspección visual general del equipo para localizar posibles daños, o sea una inspección preliminar antes de bajarlo de su medio de transporte; estas inspecciones incluirán todos los accesorios correspondientes, y en especial, el registrador de impactos, que generalmente se instala sobre el propio transporte.

La comprobación del nitrógeno se verificará checando presión y contenido de oxígeno contra las condiciones al embarcar. En caso de condiciones adversas se procederá a la localización de posibles fugas para su corrección.

5.4 Armado final del transformador, instalación de accesorios.

- En transformadores en que se encuentren indicaciones de impactos anormales se hará necesario efectuar una inspección interna para comprobar que los aislamientos, estructuras y cambiadores de derivaciones no han sufrido daños durante el transporte, en caso de encontrarse éstos, se notificará al fabricante para su reparación. Para esta inspección interna se elimina el nitrógeno expulsando éste y metiendo aire seco comprimido o aire caliente soportable por el personal que efectuará la inspección.
- Antes de iniciar las maniobras para el armado del transformador se procederá a checar fugas en el tanque; para esto se aumentará la presión de nitrógeno hasta $0.5 \text{ Kg} / \text{cm}^2$, localizando fugas aplicando jabonadura en todas las juntas, empaques y soldaduras, las cuáles se corrigen reapretando o cambiando empaques si es necesario.
- Una vez realizado lo anterior se procede a expulsar el nitrógeno hasta tener mínima presión positiva de nitrógeno (menos de $0.1 \text{ Kg} / \text{cm}^2$), el resto de gases se extrae

empleando una bomba de alto vacío hasta alcanzar una presión absoluta de menos de 1 mm de Hg.

- Habiendo alcanzado el vacío mencionado en el párrafo anterior se mantendrá por un par de horas, procediéndose al llenado e impregnación de los aislamientos, (normalmente vienen impregnados de fábrica), este llenado es preliminar a armar el transformador; el aceite empleado será nuevo, previamente deshidratado y desgasificado, este aceite entrará caliente a una temperatura máxima de 50° C.

- Ahora se procede a la instalación y conexión de boquillas así como la adaptación de accesorios; para todas estas maniobras se procurará hacerlas en una sola etapa de trabajo seleccionando las mejores horas del día, es decir las de menor humedad ambiente, haciéndolo lo más rápido posible con el fin de evitar en lo posible la absorción de humedad en el interior descubierto, que será en la mayoría de los casos, las salidas de los devanados así como conexiones

- Al terminar de armar el transformador se procede a sacar todo el aceite metiendo al mismo tiempo nitrógeno, con el transformador vacío de aceite y lleno de nitrógeno se repite la maniobra de expulsar casi todo el nitrógeno y hacer un vacío máximo permisible por el tanque del transformador, se sostiene en estas condiciones de vacío máximo durante 48 horas más 8 horas por cada hora que haya estado expuesto a la atmósfera con el objeto de extraer la posible humedad absorbida durante las maniobras de armado.

- Al término del período de vacío descrito en el párrafo anterior se procede a la comprobación del contenido de humedad de los aislamientos del núcleo.

En caso de considerar el transformador húmedo, se procederá a someterlo a un proceso de secado al alto vacío, independientemente de que las pruebas eléctricas sean satisfactorias.

- Después de comprobar el grado de secado o de haber efectuado este, se procede al llenado definitivo del transformador con aceite previamente deshidratado y desgasificado, durante el llenado, se mantendrá el vacío máximo alcanzado, con un ligero abatimiento por la entrada del aceite pero que en ningún caso será mayor de 1 mm de Hg.

- Si el transformador es del tipo sellado, se pondrá el nitrógeno a la presión especificada según el sistema empleado y el propio diseño del transformador. En caso de transformadores abiertos con tanque conservador, se sellará éste provisionalmente con nitrógeno a una presión máxima de 0.2 Kg / cm².

5.5 Pruebas eléctricas finales de puesta en servicio.

5.5.1 Prueba de resistencia de aislamiento.

- a) Alta tensión contra baja tensión a tierra.
- b) Baja tensión contra alta tensión a tierra.
- c) Alta tensión más baja tensión a tierra.

5.5.2 Prueba de factor de potencia.

- a) Alta tensión contra baja tensión a tierra.
- b) Alta tensión contra tierra, baja tensión a guarda.
- c) Baja tensión contra alta tensión a tierra.
- d) Baja tensión contra tierra, alta tensión a guarda.
- e) Alta tensión contra baja tensión, tierra a guarda.
- f) Factor de potencia de cada una de las boquillas.
- g) Prueba de collar caliente a cada una de las boquillas.

5.5.3 Prueba de relación de transformación.

NOTA: esta prueba es necesario hacerla al terminar de armar el transformador.

5.5.4 Prueba de resistencia ohmica de todos los devanados.

5.5.5 Pruebas eléctricas del aceite.

- a) Rigidez dieléctrica.
- b) Resistividad eléctrica.
- c) Factor de potencia.

5.5.6 Pruebas de operación de alarmas y disparos.

5.6 tratamiento del aceite.

Es muy importante que el aceite que se meta al transformador esté completamente deshidratado y desgasificado, ya que los aislamientos de papel que se encuentran secos tenderán a absorber el agua contenida en el aceite.

5.6.1 Condiciones requeridas para el aceite

Las condiciones que se exigen para un aceite deshidratado y desgasificado son las siguientes:

- » Contenido de agua: menos de 30 p.p.m. para transformadores de 11 KV y menos de 10 p.p.m. para transformadores de más de 110 KV y hasta 400 KV.
- » Contenido de gases: menos de 2% para transformadores de 11 KV y menos 0.2 % para transformadores de más de 110 KV y hasta 400 KV.
- » Rigidez dieléctrica de 35 KV para transformadores de 110 KV y menos de 40 KV para transformadores de más de 110 KV y hasta 400 KV.
- » Resistividad eléctrica mayor de 50×10^7 óhms-cm. para transformadores de hasta 110 KV. y mayor de 200×10^7 óhms-cm para transformadores de más de 110 KV y hasta 400 KV.

5.7 Pruebas.

Actualmente conocemos los perjuicios que ocasiona cualquier interrupción de la energía eléctrica, tanto en la industria como en los servicios públicos o en el uso doméstico. Para reducir al mínimo las fallas en el suministro de energía eléctrica, es necesario entre otras cosas, una alta confiabilidad en el equipo que integra el sistema, desde la generación hasta la distribución y aprovechamiento.

Por lo tanto, el control de calidad en la manufactura o en la reparación de equipos resulta de gran importancia para poder contar con una garantía adecuada. Esta se efectúa por medio de una serie de pruebas que permiten estimar si el equipo puede funcionar en las especificaciones para las cuales se ha diseñado, con un riesgo mínimo de falla. De aquí que las pruebas se clasifiquen en:

Pruebas prototipo. Son las efectuadas a un transformador que es representativo de toda una línea de producción, para demostrar que todas las unidades de la línea cumplen los

requisitos especificados no cubiertos en las pruebas de rutina. Sin embargo, el prototipo debe pasar también las pruebas de rutina para su aceptación.

Pruebas de rutina. Son las que se deben aplicar a todas y cada una de las unidades de producción.

Pruebas opcionales. Son pruebas que se efectuarán sólo a petición del comprador con el objeto de verificar características específicas del equipo.

La lista anterior muestra la totalidad de pruebas especificadas en las normas, sin embargo, el comprador puede contratar con el fabricante cuáles son las que desea que se efectúen, por lo cual tenemos otros dos grupos en la clasificación:

Pruebas de aceptación. Son las que demuestran la satisfacción del comprador, de que el transformador cumple con las especificaciones requeridas.

Pruebas especiales. Son pruebas distintas a las de rutina y prototipo, acordadas entre el fabricante y el comprador, aplicables únicamente a uno o más transformadores de un contrato particular. Este caso puede presentarse principalmente en productos de exportación, en que el comprador solicite las pruebas según normas en su país.

Para fijar los criterios y procedimientos con que se han de efectuar estas pruebas, se han establecido las normas correspondientes, de aplicación nacional o internacional, según reconocimiento de los distintos organismos de normalización.

Las pruebas presentadas en esta tesis fueron realizadas con la ayuda del personal encargado y equipo perteneciente al Laboratorio de Pruebas de Equipos y Materiales de México (LAPEM), perteneciente a la Comisión Federal de Electricidad. (CFE). Ubicado en la ciudad de Irapuato Gto., México.

El Laboratorio de alta potencia baja tensión fue el que se encargó de realizar las **pruebas de prototipo a un transformador de distribución**, por lo cual presentamos a continuación el desarrollo de estas.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

CONTENIDO

1.- Características asignadas por el fabricante.

2.- Finalidad de las pruebas.

3.- Normas aplicadas.

4.- Pruebas requeridas.

5.- Resultado de las pruebas.

6.- Conclusiones.

7.- Oscilogramas.

8.- fotografías.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

1.- Características asignadas por el fabricante.

Características nominales del transformador	
Potencia nominal.	150 KVA
Frecuencia nominal.	60 Hz
Nº de fases.	3
Tensión nominal primaria.	13 200 V Δ / Y
Tensión nominal secundaria.	220 / 127 V
Corriente nominal primaria.	6.56 Amp.
Corriente nominal secundaria.	393.6 / 681.9 Amp.
Clase.	15
Nivel básico de impulso.	95 KV (AT) 30 KV (BT)
Elevación de temperatura.	65° C
% de impedancia a 85° C.	2.74
Clase de enfriamiento	OA
Capacidad de aceite.	275 Lts.
Peso total.	847 Kg.
Cambiador de derivaciones.	95, 97.5 100, 102.5, 105 % de V_n
Material de los devanados.	AT- Cu, BT-Al

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

2.- Finalidad de las pruebas.

El proposito de estas pruebas es demostrar la capacidad de soporte mecánico al corto-circuito del transformador.

3.- Normas aplicadas.

Las pruebas se realizaron de acuerdo a las siguientes normas:

ANSI / IEEE C57.12.00-1987

ANSI / IEEE C57.12.90-1987

Porcedimiento: K3221 - 1A01, K3221 - 1A09

4.- Pruebas requeridas.

4.1 Pruebas de rutina.¹

a) Relación de transformación.

Para medir la relación de transformación de los transformadores de potencia y de distribución, generalmente se emplea el TTR (Transformer Turn-Ratio). Su función, es verificar la relación de transformación real de acuerdo con la relación de transformación nominal.

Este equipo consta de:

¹Pruebas realizadas antes de corto-circuito.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

- Un generador de corriente alterna accionado manualmente, para excitar los devanados de baja tensión.
- Voltímetro y amperímetro para medir los valores de excitación.
- Un selector para cambiar el número de espiras en el devanado de alta tensión del transformador patrón, con objeto de igualar su relación con la del transformador en prueba. Este selector indica la relación del transformador patrón.
- Un amperímetro que opera como detector de corriente nula en el momento que se han igualado las relaciones de transformación.

importante !

Al conectar el TTR al transformador en prueba es importante observar las polaridades pues en caso de una conexión equivocada, el instrumento no dará lectura.

La medición se realiza de acuerdo al siguiente procedimiento:

- 1.- Identificar el diagrama de conexiones del transformador.
- 2.- De acuerdo al diagrama vectorial, identificar los pares de terminales que corresponden a una misma fase.
- 3- Conectar el TTR como se muestra en los diagramas de la figura 5.1, es importante recordar que para transformadores trifásicos, esta prueba se efectúa para cada fase.
- 4.- Excitar el TTR mientras se operan los selectores, comenzando por el de mayor relación; cuando se obtenga la corriente nula, se deja de accionar la excitación, y se anota la relación de transformación indicada por el TTR.
- 5.- Repetir los puntos 3 y 4 para las fases restantes.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

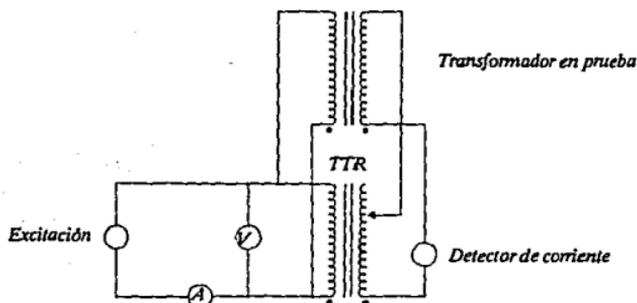


Figura 5.1 Circuito de conexiones para medir la relación de transformación con TTR

b) Resistencia óhmica.

Esta prueba se hace para medir la resistencia óhmica de cada devanado y de esta forma verificar el cálculo de las pérdidas por efecto de Joule, así como la componente de caída de voltaje por resistencia y la elevación de temperatura bajo carga. Esta medición se realiza con el puente Kelvin de la siguiente manera:

- 1.- Identificar las terminales de alta y baja tensión del transformador.
- 2.- Conectar el puente Kelvin a dos de las terminales de alta tensión, de acuerdo a la figura 5.2a.

Importante!

Seguir la siguiente secuencia en la medición.

- a) Cerrar el interruptor de corriente y esperar el tiempo necesario de estabilización.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

b) Cerrar el interruptor del galvanómetro y seleccionar el multiplicador, ajustar la lectura.

c) Abrir el interruptor del galvanómetro.

d) Abrir el interruptor de corriente.

3.- Tomar lecturas y anotarlas en la tabla indicada en el reporte de pruebas.

4.- Repetir la medición para los demás pares de terminales de alta tensión.

5.- Cambiar las conexiones a las terminales de baja tensión de acuerdo a la figura 5.2b.

6.- Tomar lecturas y anotarlas en la tabla correspondiente en el reporte de pruebas.

7.- Repetir la medición para los demás pares de terminales de baja tensión.

8.- Anotar la temperatura ambiente.

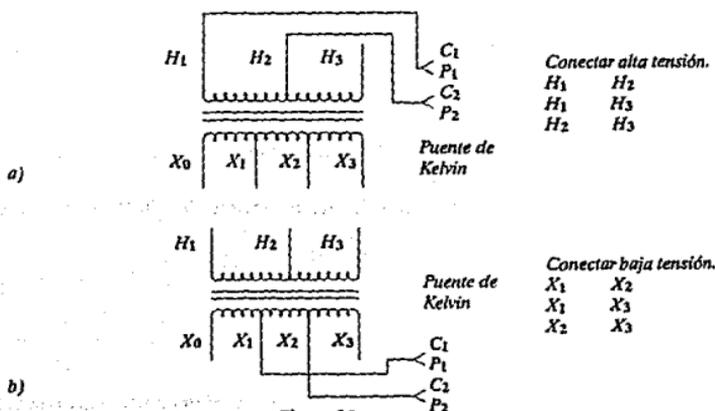


Figura 5.2
Medición de resistencia Ohmica

Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

9.- Calcular la resistencia de cada fase a anotarla en la tabla indicada en el reporte de pruebas.

c) **Pérdidas y corriente de excitación.**

Para realizar esta prueba se efectúan los siguientes pasos.

1.- Seleccionar los instrumentos de medición, de acuerdo a los rangos de las cantidades por medir. Incluir a los termómetros para medir la temperatura.

2.- Armar el circuito de acuerdo a la figura 5.3

3.- Energizar la fuente de alimentación y ajustar el voltaje al valor nominal.

4.- En esta prueba se anotan los valores de voltaje, corriente y potencia registrados en los instrumentos de medición, así como las constantes de los T_p 's, T_c 's y wáttmetros. Estas constantes se multiplican entre si y posteriormente se multiplica la constante resultante por la suma de los watts, obteniendo así los watts totales.

La corriente de excitación o mejor dicho el por ciento de corriente de excitación se obtiene de la siguiente manera:

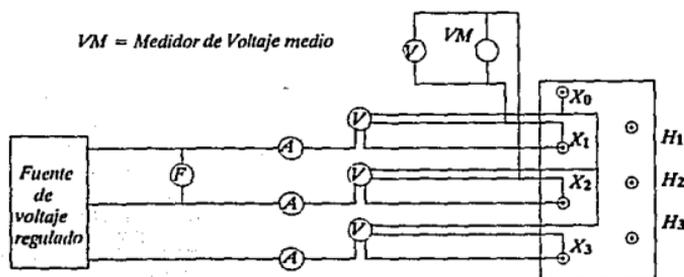


Figura 5.3 Circuito para medir las pérdidas y corriente de excitación por el método de los tres wáttmetros.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

$$I_{cxc} = \frac{\text{Corriente promedio} \times K \text{ amperímetro} \times 100}{\text{corriente nominal de baja tensión}}$$

d) Impedancia y pérdidas de carga en posición nominal.

1.- Seleccionar los instrumentos de medición, de acuerdo a los rangos de las cantidades por medir. Incluir a los termómetros para medir la temperatura.

2.- Armar el circuito como se muestra en la figura 5.4

3.- Energizar la fuente de alimentación y aumentar gradualmente el voltaje hasta obtener la corriente nominal de alta tensión. Tomar las lecturas de los instrumentos de medición y anotarlas en el reporte de pruebas correspondiente.

4.- Anotar las constantes de los Tc's, Tp's y de los wáttmetros.

5.- Estas constantes se multiplican entre si y posteriormente se multiplica la constante resultante por la suma de los watts, obteniendo así los watts totales.

6.- Para obtener el porciento de impedancia se utiliza la siguiente fórmula:

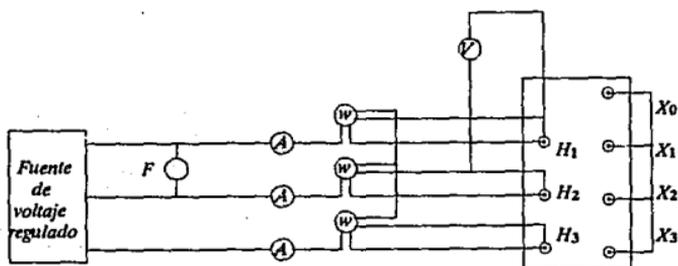


Figura 5.4 Circuito para medir las pérdidas eléctricas e impedancia.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

$$Z = \frac{\text{Voltaje de corto-circuito} \times K \times T_p}{\text{Voltaje nominal de alta tensión}} \times 100$$

Nota !

Esta prueba se realizará a la misma temperatura que la prueba de resistencia óhmica.

4.2 Corto-circuito.

Pruebas requeridas.

Cada devanado del transformador a probarse debe someterse a un total de seis pruebas que satisfagan los requerimientos de la norma para corriente simétrica. Dos de estas pruebas también deberán satisfacer la corriente asimétrica requerida. La duración del corto-circuito debe ser de 0.25 seg. (15 ciclos) en todas las pruebas, excepto una que debe durar un tiempo mayor (1 seg), conforme a la norma ANSI / IEEE C57.12.00-1987 Sección 7.

Circuito de prueba.

Para poder efectuar esta prueba se simuló en el laboratorio de alta potencia baja tensión un corto-circuito. La figura 5.5 muestra el diagrama de éste circuito de prueba. El transformador bajo prueba se conecta al lado de baja tensión del transformador de corto-circuito, en el lado de alta tensión se añade un reactor para regular la corriente y proteger el circuito. El corto-circuito es provocado por el cierre del dispositivo de cierre sincronizado, y con la apertura del interruptor de maniobra se obtiene el tiempo durante el cual fluye la corriente.

A continuación se muestra el nombre de los principales elementos que conforman el circuito de prueba.

- (1) Cuchilla seccionadora.
- (2) Interruptor de maniobra.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

- (3) Reactores limitadores.
- (4) Transformador de corto-circuito.
- (5) Shunt de medición de corrientes.
- (6) Dispositivos de cierre sincronizado.
- (7) Transformador de potencial.
- (8) Objeto bajo prueba.

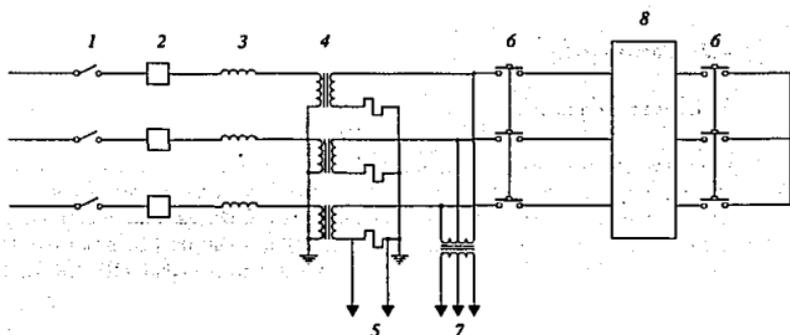


Figura 5.5 Circuito de prueba para corto-circuito

4.3 Pruebas de rutina.²

Estas pruebas son las mismas que se realizaron en el punto 4.1

4.4 Pruebas dieléctricas².

²Pruebas realizadas después de corto-circuito.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

a) Prueba de impulso de voltaje.

Esta prueba se hace para verificar que el aislamiento del transformador sea capaz de soportar las ondas de voltaje debidas a impulsos por rayo (descargas atmosféricas). Esta prueba incluye la verificación del aislamiento a tierra, entre espiras y entre devanados, así como el flameo en las boquillas asociadas a cada devanado.

La descarga se aplica mediante un generador de impulsos, que consiste en un conjunto de capacitores conectados en serie y en paralelo a través de resistencias, los cuales se cargan por medio de una fuente de C.D., como se puede ver en la figura 5.6

Cuando el potencial de carga ha llegado al valor de apertura del primer par de esferas, inmediatamente rompen todos los demás pares de esferas, formando un circuito serie que finalmente descarga en el equipo en prueba.

La descarga que produce el generador de impulsos debe de corresponder a un modelo de onda con las siguientes características:

Valor de cresta. Este valor va de acuerdo a la clase de aislamiento del devanado en prueba, y está establecido en las normas correspondientes. El tiempo para alcanzar este valor es del orden de 1.2 microsegundos.

Frente de onda. Es la región ascendente de la onda hasta alcanzar el 100% del valor de cresta.

Cola de la onda. Es la región descendente de la onda hasta alcanzar el 50% del valor de cresta. El tiempo para descender a este valor es del orden de 50 microsegundos.

La onda normalizada de prueba alcanza su valor de cresta en 1.2 microsegundos y se reduce al 50% de su valor en 50 microsegundos. El valor del voltaje aplicado en cada caso se obtiene de las normas correspondientes. Esta onda normalizada, en función de sus tiempos de frente y de cola se identifica como onda normalizada de $1.2 \times 50 \mu s$, ver figura 5.7

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

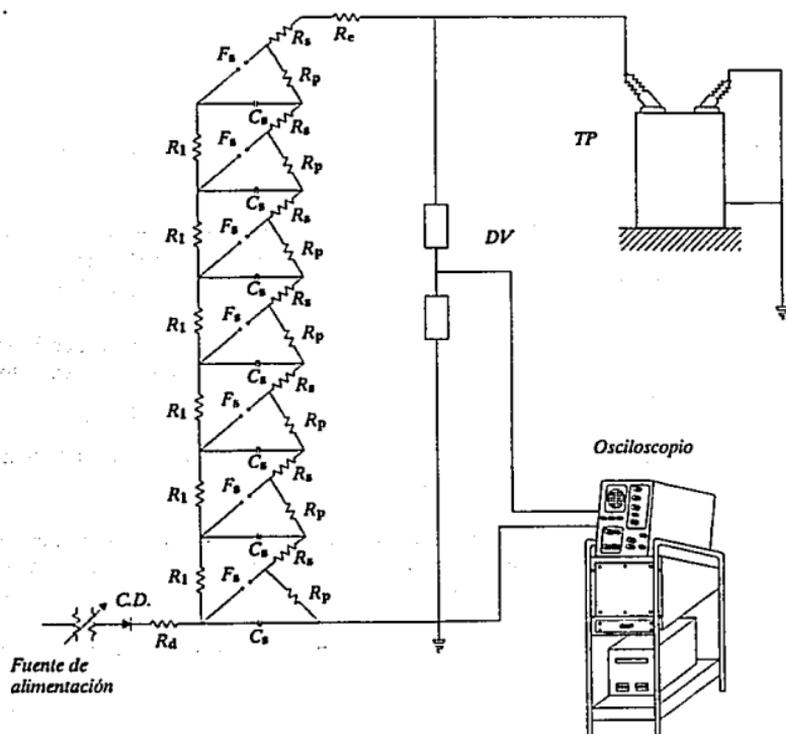


Figura 5.6 Generador de impulsos

R_1 = Resistencia de carga.
 R_p = Resistencia de cola.
 R_s = Resistencia de frente.
 R_c = Resistencia de frente externo.
 R_d = Resistencia de descarga.

C_s = Capacitores de impulso (carga y descarga).
 F_s = Esferas de acoplamiento ajustables.
 DV = Divisor de tensión.
 TP = Transformador bajo prueba.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

Para lograr la forma de onda, así como los tiempos requeridos, se conecta el generador de impulso con valores de capacitancias y resistencias adecuadas.

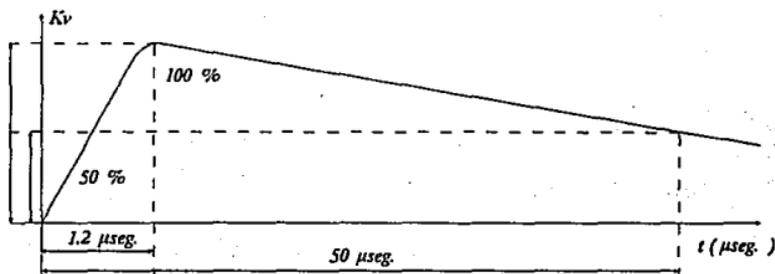


Figura 5.7 Forma de onda de impulso normalizada.

La prueba de impulso abarca varios aspectos.

- Aplicación de una onda reducida, cuyo valor de cresta es una fracción del valor correspondiente a la onda completa.
- Aplicación de frentes de onda y ondas cortadas, lo que se logra interrumpiendo las ondas con gaps calibrados.
- Aplicación de una onda completa, con todas sus características.

Como se especifica una prueba de impulso en las terminales del transformador, se debe aplicar primeramente una onda a tensión reducida, después dos ondas cortadas y por último una onda completa.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

Conexiones.

1.- Cada una de las terminales del transformador se debe probar por separado. Las terminales del devanado bajo prueba que no estén en prueba, deben conectarse directamente a tierra, o a través de una resistencia de bajo valor cuando se requiera medir la corriente.

2.- Las terminales de los demás devanados deben conectarse a tierra en la misma forma para limitar las tensiones inducidas.

Detección de fallas.

Se pueden observar fallas durante el desarrollo de la prueba, así como en el resultado de los oscilogramas.

En el primer caso tenemos:

- Burbujas de humo.
- Ruidos perceptibles dentro del transformador.
- Ausencia de arco en el explosor.

En el segundo caso tenemos:

- Diferencia entre el oscilograma a tensión reducida y el de onda completa.
- Diferencia entre los oscilogramas de ondas cortadas, principalmente en el rizo final.
- Diferencia entre los oscilogramas a tensión reducida o de onda completa, y el oscilograma de corriente a tierra, cuando se toma este último.

b) Prueba de potencial aplicado

Esta prueba se hace para verificar la resistencia dieléctrica del aislamiento entre devanados que operan a distintos voltajes y entre cada uno de estos devanados y tierra del transformador. Y consiste en aplicar una tensión elevada a uno de los devanados, con todos los demás devanados, el núcleo y el tanque conectados a tierra.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

El valor de la tensión aplicada depende de la clase de aislamiento (en función de su voltaje nominal de operación) y lo fijan las normas correspondientes.

Conexiones:

- 1.- El devanado que se va a probar se pone en corto-circuito y se conecta a la terminal de alta tensión del transformador en cascada que sirve para alimentar al transformador bajo prueba.
- 2.- Todas las demas terminales y partes conductoras, incluyendo núcleo y tanque, deben conectarse entre sí, a tierra y a el circuito de retorno del transformador elevador (o arreglo de transformadores dispuesto en cascada).

Procedimiento:

- 1.- La prueba debe iniciarse a un valor máximo del 25% de la tensión de prueba, y se incrementa hasta su valor total aproximadamente en 15 segundos.
- 2.- La tensión de prueba se mantiene durante un minuto.
- 3.- Después de un minuto, se reduce la tensión a un valor igual o menor que el de iniciación en un máximo de 5 segundos y se desenergiza el circuito.

c) Prueba de potencial inducido.

Esta prueba tiene por objeto verificar el aislamiento entre espiras, entre capas, entre bobinas y entre fases del transformador. Se efectúa haciendo trabajar a uno de los devanados durante un tiempo determinado al 200% de su tensión nominal. Por lo que en los demás devanados se inducirán tensiones en la misma proporción, siempre y cuando el núcleo no se sature, poniendo a todos éstos bajo las condiciones de prueba.

Sin embargo, se recomienda que en ninguno de los devanados aparezca un valor de potencial inducido superior a su correspondiente valor de potencial aplicado.

Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

De la fórmula obtenida en la ecuación 3.22 observamos que el flujo en el núcleo es directamente proporcional al voltaje suministrado, e inversamente proporcional a la frecuencia, de manera que si se va a suministrar un voltaje mayor al de diseño, es necesario aumentar también la frecuencia para evitar la saturación del núcleo.

Las normas marcan como frecuencia mínima de prueba:

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

pudiendo utilizarse, desde luego, frecuencias mayores. Mientras mayor sea la frecuencia, la prueba es más severa, de manera que se recomienda que su duración sea aproximadamente de 7 200 ciclos.

El voltaje de prueba se proporciona por medio de una fuente que consiste de un grupo motor-generador con una tensión nominal de 440 Volts a una frecuencia de 400 Hz.

Conexiones:

1.- Se debe elegir uno de los devanados del transformador que sea posible alimentar al 200% de su voltaje nominal (normalmente es el de baja tensión), el cual se conecta al generador, mientras que los demás embobinados deben de permanecer en circuito abierto.

Procedimiento:

1.- La prueba se debe iniciar con un valor igual o menor que el 25% de la tensión completa y se aumenta gradualmente hasta alcanzar el valor de prueba en aproximadamente 15 segundos. Se mantiene la tensión plena durante el tiempo de prueba (18 seg), mientras se observa si no aparece anomalía, como:

- Ruidos extraños.
- Burbujas de humo (las burbujas de aire no necesariamente son anormales, y si aparecen

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

sería aconsejable repetir la prueba).

- Inestabilidad en la corriente de excitación.

Al concluir el tiempo de prueba, se reduce el voltaje a un valor igual o menor que el de iniciación, en aproximadamente 5 segundos y se abre el circuito.

4.5 Inspección visual.

La inspección visual determinará el estado físico del transformador, y ésta inspección se realiza de la siguiente forma:

- 1.- Observar si no hay alguna anomalía en la parte exterior del transformador.
- 2.- Desarmar completamente el transformador.
- 3.- Sacar el núcleo del tanque y observar si no hay anomalías en alguno de los elementos que lo componen; es decir núcleo, devanados, aislamientos, soportes mecánicos etc.
- 4.- Comparar las dimensiones del núcleo, devanados y estructura, con las proporcionadas por el fabricante.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

5.- Resultados de las pruebas:

Pruebas de rutina antes del corto-circuito.

Relación de transformación.						
Método utilizado: Método del transformador patrón (TTR)						
Posición	H3 X0	H1 X1	H1 X0	H2 X2	H2 X0	H3 X3
1	109.072		109.082		109.147	
2	106.492		106.490		106.472	
3	103.909		103.914		103.881	
4	101.324		101.334		101.31	
5	98.745		98.732		98.722	
Temperatura 19° C						

Resistencia óhmica					
Método utilizado: Método del puente Kelvin.					
Alta tensión			Baja tensión		
H1	H2	8 860	X1	X2	0.2290
H1	H3	8 860	X1	X3	0.2320
H2	H3	8 870	X2	X3	0.2260
Suma		26 590	suma		0.6870
Promedio		8 863.3	Promedio		0.2290
K		0.001	K		0.0100
Resistencia		8.863	Resistencia		0.0023
Temperatura 19° C					

Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Pérdidas y corriente de excitación.				
Método utilizado: Método de los tres wáttmetros.				
Fase nº	Voltaie medio.	Voltaie eficaz.	Corriente.	Potencia real.
1	220	221.7	1.86	68
2	220	220	1.25	54
3	220	223.4	1.95	104
suma	660	665.7	5.06	226
Prom.	220	221.7	1.686	Total 226
K	1	1	1	2
	220 Volts	221.7	1.686 Amp.	452 Watts
Temperatura 19° C				

$$\% I_{exc} = 0.428$$

Corrección por onda senoidal

$$W_c = \frac{W_m}{0.5k + 0.5}$$

$$k = \left(\frac{V}{V_m}\right)^2$$

$$W_c = 448.5 \text{ Watts}$$

Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Impedancia y pérdidas de carga en posición nominal.			
Método utilizado: Método de los tres wáttmetros.			
Fase nº	Voltaje	Corriente	Potencia
1	181	3.28	107.2
2	187.9	3.28	108
3	193.9	3.28	103.5
suma	562.8	9.84	318.7
Prom	187.6	3.28	318.7
K	2	2	4
Total	375.2 Volts	6.56 Amp.	1 274.8 Watts
Temperatura 19°C			

Pérdidas			
	Watts	I^2R	Indeterminadas
19° C	1 274.8	1 125.0	149.8
85° C	1 551.7	1 434.3	117.4

% de impedancia.				
	% Z	% Z^2	% R^2	% X^2
19° C	2.842	8.079	0.722	7.357
85° C	2.902	8.427	1.070	7.357

Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Corto-circuito.

Los resultados de las pruebas de corto-circuito son mostrados en la siguiente tabla. En tanto que los oscilogramas se muestran al final de este capítulo.

Prueba N°	oscilograma N°	Tap N°	Tensión de Prueba (Volts)	Corriente rmc (Amp.)	Corriente Pico (Amp.)	Duración en Ciclos
1	1	3	227	13 450	32 500	16
2	2	3	227	13 590	32 500	16
3	3	1	227	14 000	39 000	16
4	4	1	227	13 985	39 000	16
5	5	5	227	13 970	28 500	16
6	6	5	227	13 970	31 000	60

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

Pruebas de rutina después del corto-circuito.

Relación de transformación.						
Método utilizado: Método del transformador patrón (TTR)						
Posición	H ₃	H ₁	H ₁	H ₂	H ₂	H ₃
	X ₀	X ₁	X ₀	X ₂	X ₀	X ₃
1	109,064		109,088		109,035	
2	106,483		106,499		106,456	
3	103,902		103,915		103,876	
4	101,315		101,333		101,296	
5	98,736		98,749		98,710	
Temperatura 18° C						

Resistencia óhmica						
Método utilizado: Método del puente Kelvin						
Alta tensión			Baja tensión			
H ₁	H ₂	8 954	X ₁	X ₂	0.2215	
H ₁	H ₃	8 955	X ₁	X ₃	0.2233	
H ₂	H ₃	8 967	X ₂	X ₃	0.2204	
Suma		26 876	suma		0.6652	
Promedio		8 863.3	Promedio		0.2217	
K		0.001	K		0.01	
Resistencia		8.9586	Resistencia		0.0022	
Temperatura 18° C						

Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Pérdidas y corriente de excitación.				
Método utilizado: Método de los tres wáttmetros.				
Fase n°	Voltaje medio.	Voltaje eficaz.	Corriente.	Potencia real.
1	220	221.7	1.84	82
2	220	221.35	1.28	55
3	220	222.74	1.66	91
suma	660	665.79	4.78	228
Prom	220	221.93	1.593	Total 228
K	1	1	1	2
	220 Volts	221.93	1.593 Amp.	456 Watts
Temperatura 18° C				

$$\% I_{exc} = 0.4048$$

Corrección por onda senoidal

$$W_c = \frac{W_m}{0.5k + 0.5}$$

$$k = \left(\frac{V}{V_m}\right)^2$$

$$W_c = 452 \text{ Watts}$$

Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Impedancia v pérdidas de carga en posición nominal.			
Método utilizado: Método de los tres wáttmetros.			
Fase nº	Voltaje	Corriente	Potencia
1	197.1	3.28	105.6
2	203.34	3.28	105.6
3	195.72	3.28	103.8
suma	596.16	9.84	315
Prom	198.72	3.28	315
K	2	2	4
Total	397.44 Volts	6.56 Amp.	1 260.00 Watts
Temperatura 18° C			

Pérdidas			
	Watts	I^2R	Indeterminadas
18° C	1 260.00	1 093.68	166.42
85° C	1 520.37	1 389.39	130.98

% de impedancia.				
	% Z	% Z ²	% R ²	% X ²
18° C	3.0109	9.0656	0.7056	8.3595
85° c	3.0638	9.3868	1.0273	8.3595

Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Pruebas dieléctricas.**a) Prueba de impulso de voltaje**

Tensión de prueba: 95 / 30 KV

Clase de aislamiento: 15 / 12 KV

Procedimiento / o normas: DTGA2-1302, NOM-J-116-1989, J-169-1987

Los oscilogramas obtenidos de ésta prueba se muestran al final del capítulo.

Terminal	Oscilograma nº	KV por cm.	Tensión de impulso aplicado en KV	Polaridad	Forma de onda 1.5 x 49 µs			Tiempo de corte en µseg.
					Onda reducida	Onda cortada	Onda completa	
H ₁	1	93.9	58.0	(-)	----			
H ₁	1	93.9	108.0	(-)		----		3.1
H ₁	2	93.9	108.6	(-)		----		2.9
H ₁	2	93.9	92.5	(-)			----	
H ₂	3	93.9	58.6	(-)	----			
H ₂	3	93.9	112.0	(-)		----		4.0
H ₂	4	93.9	109.7	(-)		----		3.7
H ₂	4	93.9	92.4	(-)			----	
H ₃	5	93.9	58.4	(-)	----			
H ₃	5	93.9	110.4	(-)		----		3.5
H ₃	6	93.9	110.3	(-)		----		3.7
H ₃	6	93.9	93.4	(-)			----	
Bt	7	93.9	20.9	(-)	----			
Bt	7	93.9	37.0	(-)		----		2.5
Bt	7	93.9	36.0	(-)		----		3.5
Bt	7	93.9	30.5	(-)			----	

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

b) Prueba de potencial aplicado.

Potencial aplicado durante 1 minuto, 60 Hz

Baja tensión 10 kV, Alta tensión 34 kV

Resultado Satisfactorio.

c) Prueba de potencial inducido.

Potencial inducido a 400 ciclos / seg. durante 18 segundos.

Valor norma: 200 % de tensión nominal, 7 200 ciclos.

Valor prueba: 440 volts.

Resultado Satisfactorio.

Inspección visual.

La inspección visual mostró que todos los elementos del transformador se encontraron en correcto estado físico.

Inspección visual.	
Bobinas.	Bién
Núcleo.	Bién
Cambiador de derivaciones.	Bién
Aislamiento.	Bién
Soportes mecánicos.	Bién
Tanque.	Bién
Aceite	Bién
Otros.	Bién

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

Resúmen de pruebas de rutina y dieléctricas.

Prueba	Antes de Corto-circuito	Después de Corto-circuito	% de variación obtenido	% de variación máximo permitido por norma
% de impedancia a 85° C	2.902	3.063	5.547	7.99
Corriente de excitación (A)	1.686	1.593	-5.516	25
Dieléctricas	-----	Satisfactorias	N.A.	N.A.

6.- Conclusiones:

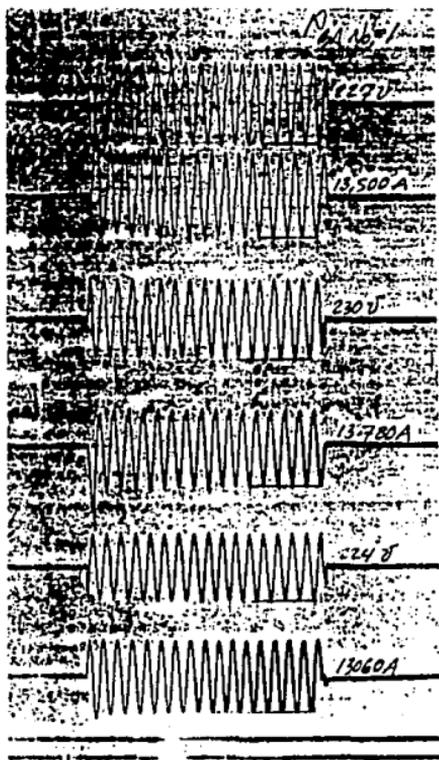
Prueba	Resultado
4.1 Pruebas de rutina antes de corto-circuito.	Satisfactorio.
4.2 Corto circuito.	Satisfactorio.
4.3 Pruebas de rutina después de corto-circuito.	Satisfactorio.
4.4 Pruebas dieléctricas después de corto-circuito.	Satisfactorio.
4.5 Inspección visual.	Satisfactorio.

Por lo tanto, podemos concluir que el transformador bajo prueba **SI** cumple con los requerimientos de las normas.

Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

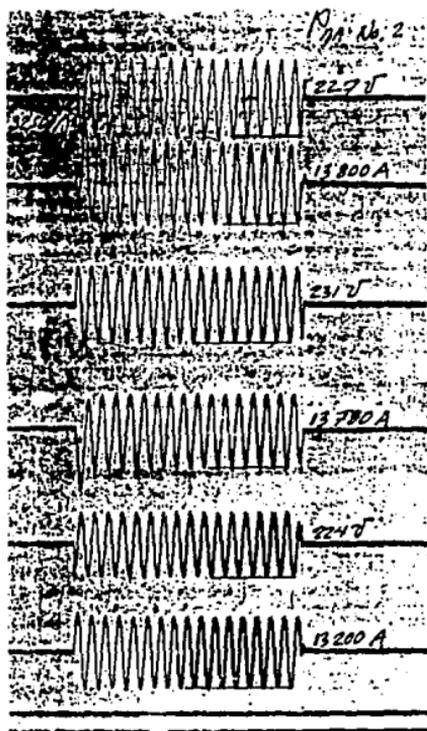
7.- Oscilogramas de corto-circuito.

Oscilograma N° 1



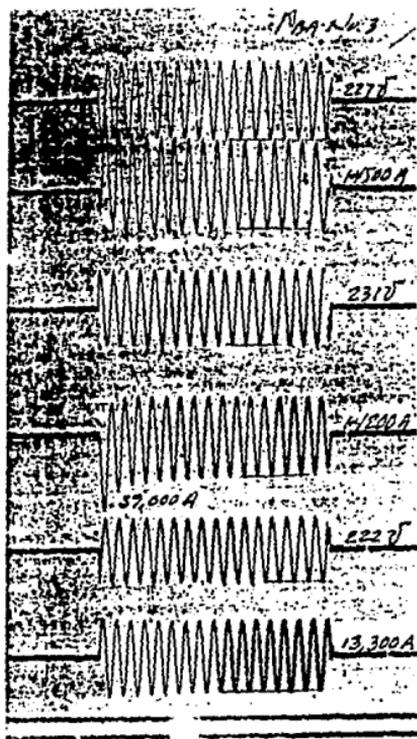
Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Oscilograma N° 2



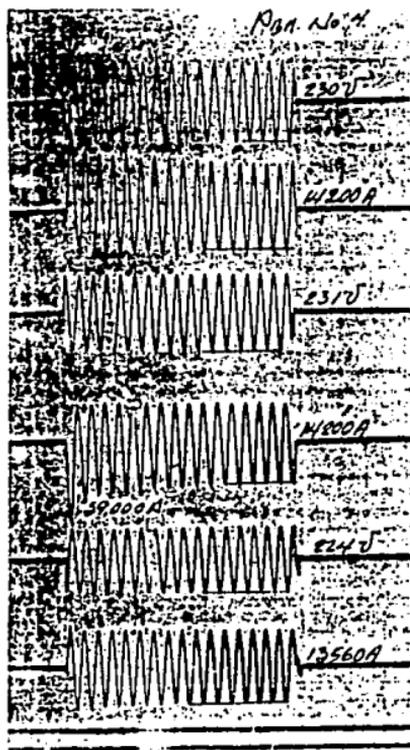
Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Oscilograma N° 3



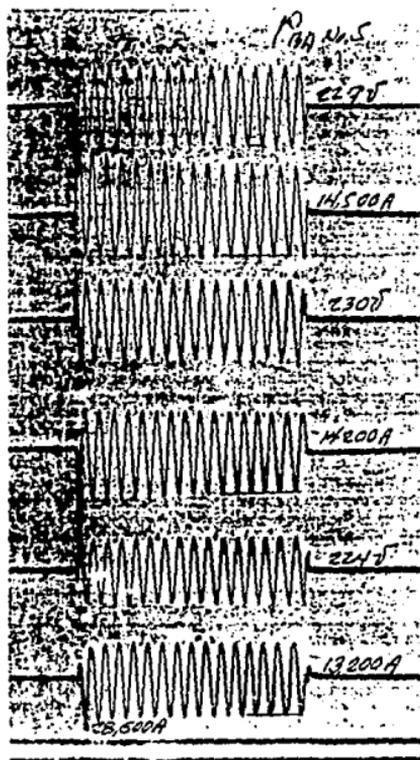
Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Oscilograma N° 4



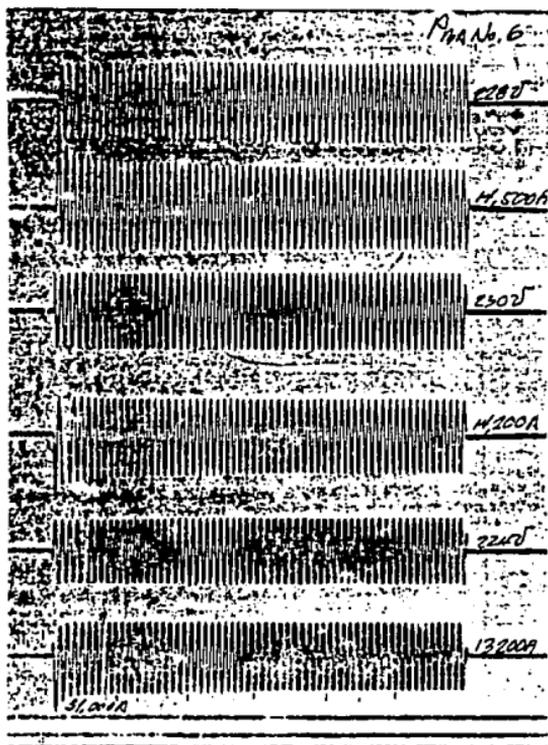
Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Oscilograma N° 5



Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

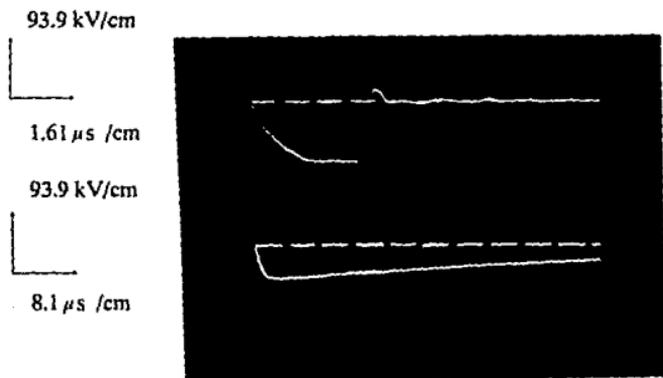
Oscilograma N° 6



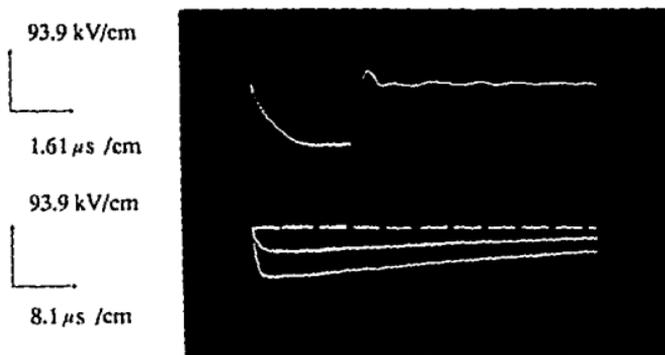
Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Oscilogramas de prueba de impulso de voltaje.

Oscilograma N° 1

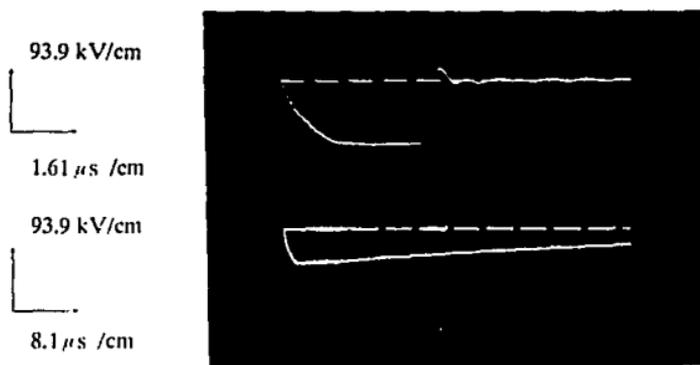


Oscilograma N° 2

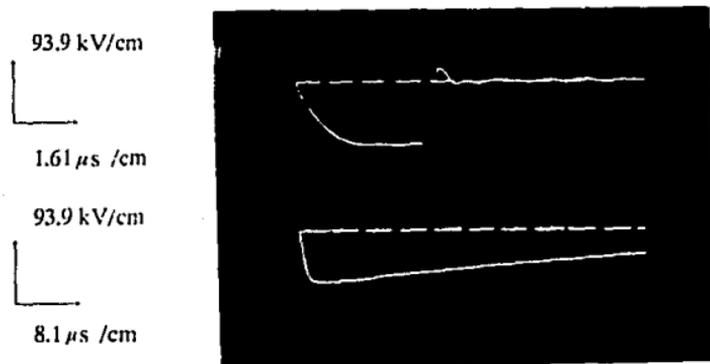


Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Oscilograma N° 3



Oscilograma N° 4



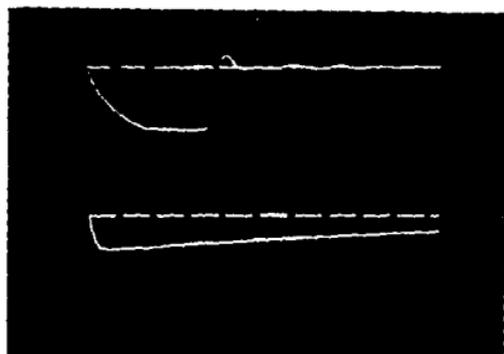
Laboratorio de Pruebas y Ensayos de Mé:
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.

Oscilograma N° 5

93.9 kV/cm

1.61 μ s /cm

93.9 kV/cm

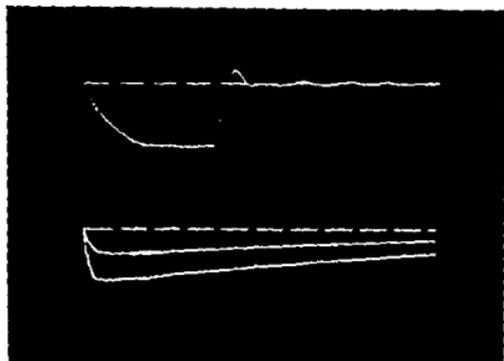
8.1 μ s /cm

Oscilograma N° 6

93.9 kV/cm

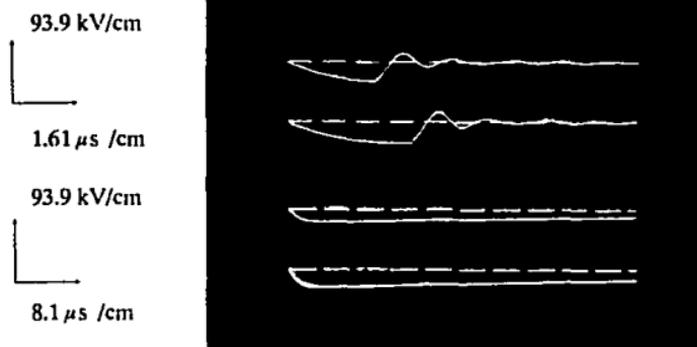
1.61 μ s /cm

93.9 kV/cm

8.1 μ s /cm

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**

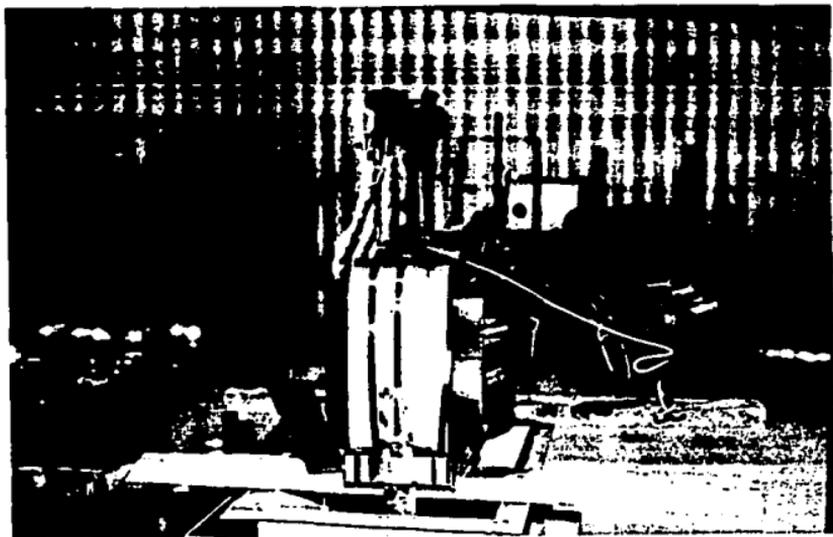
Oscilograma N° 7



8.- Fotografías.

A continuación se muestran las fotografías de un transformador que terminó las pruebas satisfactoriamente, así como otro que no las soporto.

**Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México.
Departamento de Alta Potencia.
Reporte de pruebas.**





CAPITULO 6

Análisis técnico-económico.

6.1 Introducción.

En las redes eléctricas se presentan por diversas causas disturbios que acarrear consecuencias graves, las cuales se reflejan en el propio sistema, en la industria, el comercio y los servicios domésticos.

Estos disturbios traen su origen en diversos tipos de fenómenos de origen interno o externo a la red eléctrica (capítulo 4), y someten a los equipos a esfuerzos electrodinámicos que no siempre son capaces de soportar y entonces se presenta la falla.

Los equipos instalados en las redes eléctricas deben ser capaces de soportar todos los fenómenos asociados a los disturbios que se le presentan durante su operación, ésto significa, que el diseño de los mismos debe ser el apropiado a la red eléctrica en que estará instalado.

De acuerdo a lo expuesto anteriormente; la selección de un equipo, conociendo su funcionamiento, específicamente de un transformador, se realizará de la siguiente forma:

Una vez definido el voltaje de operación y la capacidad del transformador, la fase siguiente consiste en seleccionar el tipo de transformador de acuerdo a la clasificación del capítulo 1, según:

- a) La disposición del circuito magnético.
- b) La disposición de los devanados.
- c) Su sistema de enfriamiento.
- d) Sus conexiones, etc.
- e) El lugar de instalación.
- f) El número de fases.
- g) Parámetros de prueba.

Como por ejemplo, el transformador utilizado en las pruebas presentadas fue diseñado bajo las siguientes características:

Transformador de distribución trifásico. (prototipo)	
Potencia nominal.	150 KVA
Frecuencia nominal.	60 Hz
Nº de fases	3
Tensión nominal primaria.	13 200 Δ / Y
Tensión nominal secundaria.	220 / 127
Corriente nominal primaria.	6.56 Amp.
Corriente nominal secundaria.	393.6 / 681.9
Clase.	15
Nivel básico de impulso.	95 KV (AT), 30 KV (BT)
Elevación de temperatura.	65° C
% impedancia a 85° C	2.74
Clase de enfriamiento.	OA
Capacidad (aceite aislante)	275 Lts.
Peso total.	847 Kg.
Cambiador de derivaciones.	95, 97.5, 100, 102.5, 105 % de V_n
Material de los devanados.	AT- Cobre, BT - Aluminio

6.2 Parámetros técnicos de diseño de los transformadores.

De acuerdo a la disposición constructiva descrita en el capítulo 3, podemos decir en resumen que el transformador tipo acorazado es la disposición constructiva más usual.

Generalmente los núcleos de los transformadores acorazados están contruidos de lámina de acero al silicio rodada en frío, de grano orientado HIPERSIL[®]. Su grano orientado y la alta permeabilidad magnética de este acero nos proporcionan un aumento en la transmisión del flujo magnético de un 33% más por unidad de área que los aceros eléctricos ordinarios.

La utilización del aislamiento interlaminar no degradable reduce el volumen del núcleo en 9% y permite obtener núcleos más compactos. Lo anterior reduce la longitud del conductor en el devanado, lo cual a su vez da por resultado pérdidas, pesos y tamaños menores, manteniéndose el comportamiento eléctrico y dieléctrico del transformador.

El usuario se beneficia con niveles reducidos de ruido, pérdidas menores en el núcleo y corrientes de excitación pequeñas, lo que disminuye los costos totales de operación.

Los devanados de alta tensión están contruidos de conductores de cobre y los de baja tensión de lámina de aluminio. Bajo ciertas circunstancias, las bobinas de baja tensión pueden ser de solera de cobre.

La ventaja de utilizar hojas de aluminio cuyo ancho abarca la altura total de la bobina, es la de obtener una sección transversal continua del conductor que permite un fácil autoalineamiento de los centros eléctricos de los devanados de alta y baja tensión y por consiguiente propicia la eliminación de la componente vertical del esfuerzo de corto-circuito.

Cada vuelta de los devanados de alta y baja tensión se aísla con papel tratado, el cual estabiliza el aislamiento contra la oxidación, deshidratación y la hidrólisis y hace posible alcanzar temperaturas de operación más altas sin sacrificar la vida útil esperada del transformador.

Este mismo aislamiento se aplica entre los devanados de alta y baja tensión. En este proceso el papel se compacta a los conductores entre capas, creando una masa sólida similar a la de un encapsulado total.

El ensamble se realiza con un marco estructural que sujeta el núcleo y las bobinas y además sirve para soportar los esfuerzos mecánicos que producen las corrientes de corto-circuito impidiendo los desplazamientos entre núcleo y bobinas.

Las conexiones entre guías se realizan bajo un estricto control para evitar falsos contactos, calentamientos o aumentos de resistencia y pérdidas eléctricas.

Las guías se sujetan firmemente para evitar que las corrientes nominales y eventualmente, las de corto-circuito, las desplacen y provoquen fallas internas en el transformador.

Los cambiadores de derivaciones se montan directamente sobre la parte superior del marco estructural en una posición accesible al registro de la cubierta del tanque, para facilitar su operación.

Los principales accesorios de un transformador son los que se mencionaron en la sección 1.3, pero es importante hacer notar que estos accesorios así como su localización pueden variar de acuerdo al tamaño, tipo y marca del transformador.

6.3 Evaluación económica del diseño y puesta en marcha de un transformador.

Los mecanismos de los fenómenos electromecánicos a los cuales se ven sometidos los transformadores en las redes eléctricas (efectos transitorios) se pueden estudiar desde el punto de vista teórico (como se realizó en el capítulo 2 y 4) haciéndose necesario una gran cantidad de trabajo de cálculo en la física y la matemática, pero la experiencia nos enseña que en la mayoría de los casos no es suficiente la utilización del cálculo para llegar a resultados de orden práctico, requiriéndose de la experimentación que solo se puede llevar a cabo en las instalaciones de un laboratorio.

Siempre que se hace referencia a un laboratorio se entiende la aplicación de tecnología encaminada a confirmar o verificar algo que se supone conocido o para descubrir y entender algo que se desea conocer; ésto implica la determinación experimental del comportamiento de algunos fenómenos.

La experiencia de muchos países del mundo muestra que, el contar con laboratorios de prueba propios, permite realizar con oportunidad y ahorros de tiempo y dinero una gran cantidad de diversos tipos de ensayos con los cuales se ha podido mejorar considerablemente la confiabilidad de los equipos.

Cuando no se tiene un laboratorio propio resulta muy difícil hacer los ensayos que permitan visualizar el comportamiento de los equipos, esta dificultad es porque: no se conoce bien las técnicas y la tecnología de este campo (ingeniería propia); el desconocimiento inhibe la inventativa para ensayar nuevos métodos o nuevos materiales; no es fácil contratar una serie de ensayos en el extranjero porque no se sabe que se quiere

y el laboratorio en el extranjero se ve imposibilitado en cotizar con exactitud; los laboratorios en el extranjero normalmente no están disponibles de inmediato y dan fechas de prueba mayores de 2 meses; al costo de las pruebas hay que agregar los costos de los técnicos (viajes y viáticos) que deben presenciar los ensayos; los ensayos pueden durar un día o una semana o más y los resultados pueden ser buenos o malos y dependiendo de los resultados se requieren en la mayoría de los casos más de dos viajes.

Afortunadamente, en México se cuenta con el laboratorio de Pruebas a Equipos y Materiales de la Comisión Federal de Electricidad, en este laboratorio, se pueden simular todos los fenómenos que se le pueden presentar a los equipos cuando están en operación, Las especificaciones y normas existentes definen los parámetros que hay que estudiar así como los métodos de prueba y los criterios de evaluación de los ensayos.

Cuando una fabrica de transformadores produce una línea de un número grande de unidades iguales, el control de calidad del producto debe establecer las pruebas que se llevarán acabo, en base a la clasificación que establecen las normas y mediante un acuerdo con el comprador.

Algunos aspectos por verificar podrían limitarse a una sola unidad, la cual se considera representativa del conjunto, y que se denomina prototipo. Otros, en cambio será necesario verificarlos en todas y cada una de las unidades de producción y por último, algunas pruebas se harán sólo a petición del cliente. De aquí que las pruebas realizadas fueron de prototipo y rutina.

En el proceso de pruebas de desarrollo y de prototipo, muchísimos equipos fallan en el laboratorio, solo cuando han superado los diferentes requisitos de las pruebas se puede tener cierta confianza de que en operación tendrán un comportamiento satisfactorio.

En el capítulo 5 mencionamos las pruebas realizadas en este laboratorio a un transformador prototipo. Cada una de las pruebas señaladas se cotizan en base al tipo, a su duración y a las características particulares del transformador. (datos de placa). Por tanto la cotización por realizar determinadas pruebas a un equipo es muy variable.

Es importante saber, que, no tenemos una cantidad exacta del costo total de las pruebas, pero si sabemos que ese costo por pruebas eleva considerablemente el valor total del equipo.

Una vez determinado el costo de fabricación y el costo de las pruebas del transformador prototipo, hacen que el valor de éste sea demasiado alto como para que alguien lo adquiera. Sin embargo, el costo adicional de estas pruebas, se debe prorratar entre el número total de unidades que se pretenda producir, obteniendo así, el costo total por unidad. Esto a largo plazo trae grandes beneficios, ya que cada una de las personas que adquieran un equipo, va a tener la seguridad de que éste va a presentar un mínimo de

fallas y por lo tanto asegura la confiabilidad del mismo, siempre y cuando tenga un manejo y mantenimiento adecuado.

A continuación, presentamos la cotización de las pruebas de prototipo y rutina realizadas en el laboratorio al transformador en cuestión.

Cotización.

PRUEBA	COSTO ¹
Verificación de características físicas	N\$ 360.00
Rutina antes de corto-circuito	N\$ 960.00
Corto-circuito	N\$ 3,750.00
Rutina después de corto-circuito	N\$ 960.00
Dieléctricas	N\$ 1,200.00
Inspección visual interna	N\$ 2,250.00
SUBTOTAL	N\$ 9,480.00
I.V.A 10%	N\$ 948.00
TOTAL²	N\$ 10,428.00

A continuación se presentan los costos de algunas otras pruebas requeridas para la certificación de transformadores.

Resistencia de aislamiento	N\$ 360.00
Elevación de temperatura	N\$ 3,456.00
Rigidez dieléctrica y factor de potencia de aceite	N\$ 360.00

¹Los costos indicados son unitarios y causan el I.V.A correspondiente; N\$ 1993-1994

²Hay que agregar los costos de los técnicos (viajes y viáticos)

La cifra total obtenida corresponde a las pruebas realizadas al transformador prototipo.

A continuación indicamos el costo total al público, este costo unitario³ varía dependiendo de la marca y tipo, por lo cual se encuentran:

Desde NS 9,326.00
Hasta NS13,890.00

6.4 Consideración adicional.

De lo anterior, se ve que el análisis técnico-económico puede resultar muy sencillo o muy complicado dependiendo de los requerimientos técnicos, de confiabilidad y seguridad y del presupuesto disponible; sin embargo, cada vez se podrá realizar una mejor selección tomando en cuenta que los fabricantes están desarrollando y produciendo equipos de mejor calidad y a precios competitivos dentro de un mercado en el que existe una oferta relativamente amplia.

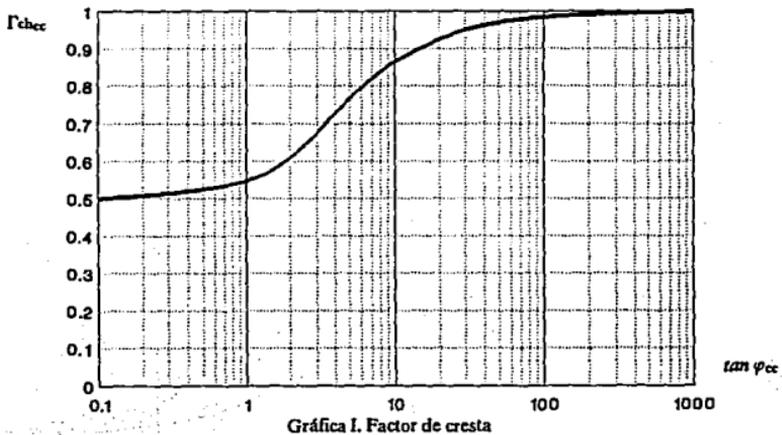
³ Los costos indicados son unitarios y causan el I.V.A correspondiente; NS 1993-1994

Conclusiones.

Como una conclusión general de esta tesis podemos decir, que el estudio y análisis de los fenómenos transitorios en los transformadores de potencia, tiene la finalidad de predecir el comportamiento, principalmente del núcleo, devanados y dieléctricos así como de corrientes, tensiones, flujo magnético y potencia, antes y después de que ocurra una falla. El análisis de los fenómenos y efectos transitorios descrito en los capítulos 2 y 4 respectivamente, se pueden resumir en una serie de gráficas, de las cuales se podrán leer fácil y rápidamente los valores requeridos para resolver teóricamente nuestro problema en particular.

Factor de cresta.

El factor de cresta definido en la sección 2.6 por la ecuación 2.17 se puede leer directamente de la gráfica I, con $\theta_{cc} = \varphi_{cc} - \beta = \pi / 2$ y diferentes valores de $\tan \varphi_{cc}$.



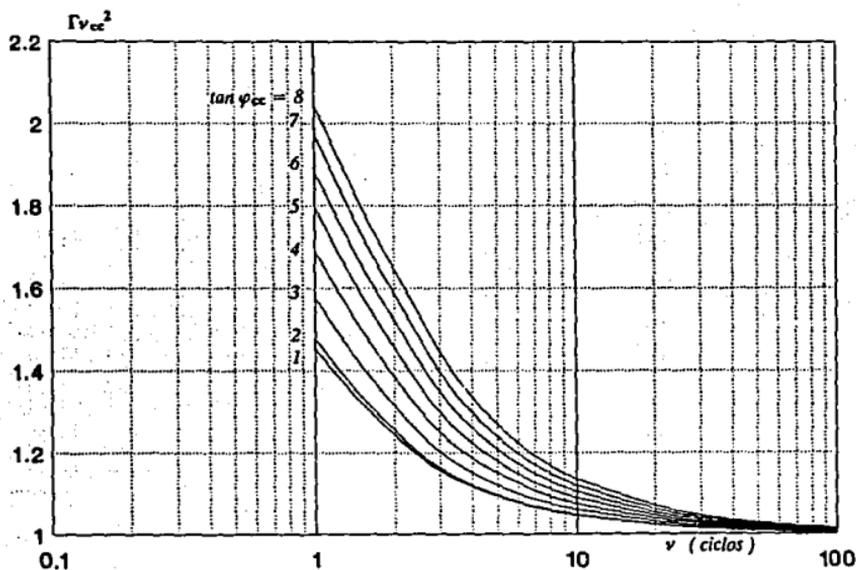
Algunas normas basan sus recomendaciones en un factor de cresta invariable que fijan en 0.9. Sin embargo, para un transformador, por ejemplo cuya reactancia X_{cc} sea el quíntuplo de la resistencia del mismo género R_{cc} , $\tan \varphi_{cc} = X_{cc}/R_{cc} = 5$, el factor de la corriente de cresta en caso de corto-circuito no sería más que:

$$\Gamma_{ch_{cc}} = \frac{1 + 2.72^{-\pi/5}}{2} = 0.77$$

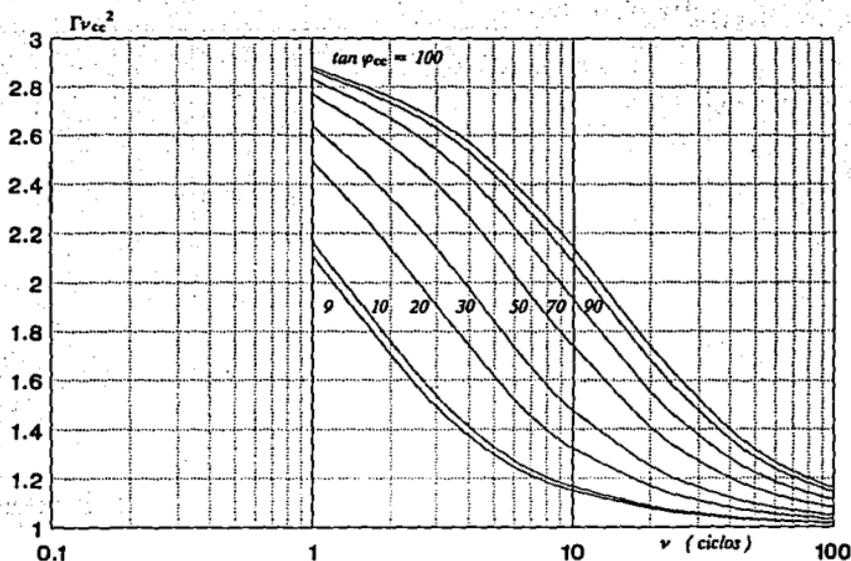
El valor normalizado de 0.9 vendría a corresponder a un transformador, cuya reactancia fuese unas 14 veces superior a la resistencia, lo que sólo se da en unidades de muy altas tensiones.

Corriente eficaz cuadrática durante los primeros ν ciclos.

El factor $\Gamma_{\nu_{cc}^2}$ involucrado en la ecuación 2.29 se puede leer fácilmente en función del número de ciclos ν a la frecuencia de 60 Hz (tiempo, $\nu T = 0.01667\nu$) para distintos valores de $\tan \varphi_{cc} = X_{cc}/R_{cc}$, de la grafica IIa) y IIb).



Gráfica II a) Coeficiente de intensidad media cuadrática.



Gráfica II b) Coeficiente de intensidad media cuadrática.

También podemos obtener el factor $\Gamma_{\nu(3)cc2}$ en función de $\tan \varphi_{cc}$ y $\alpha \nu T$, el cual puede verse en la gráfica IIIa) y IIIb).

Pulsaciones cuadráticas.

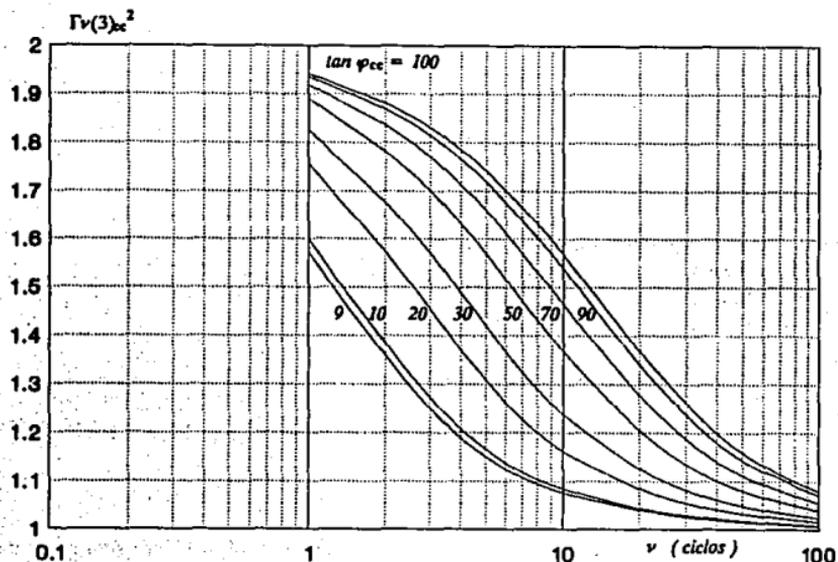
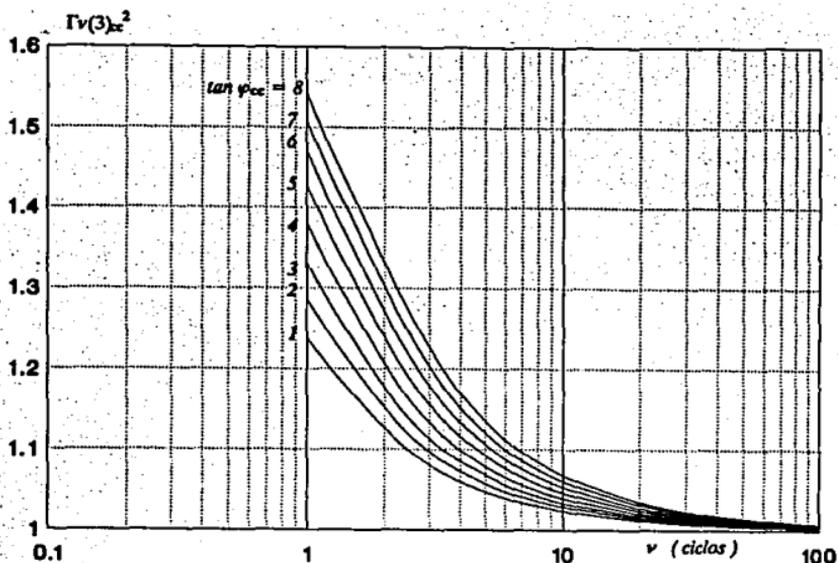
Para encontrar rápidamente la potencia trifásica, a continuación se muestran las gráficas IV y V de los factores dados en las ecuaciones 2.61 y 2.63 respectivamente, lo cual facilita los cálculos.

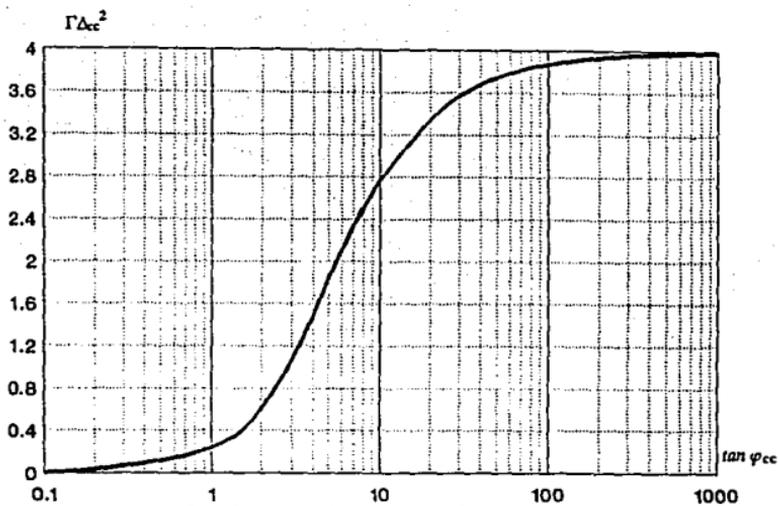
Corriente relativa de arranque.

Si en la ecuación 4.47 definimos un factor $\Gamma_{arr} = \sqrt{2} (1 - 1.2 + 1.8 e^{-\pi / \tan \varphi_{cc}})$

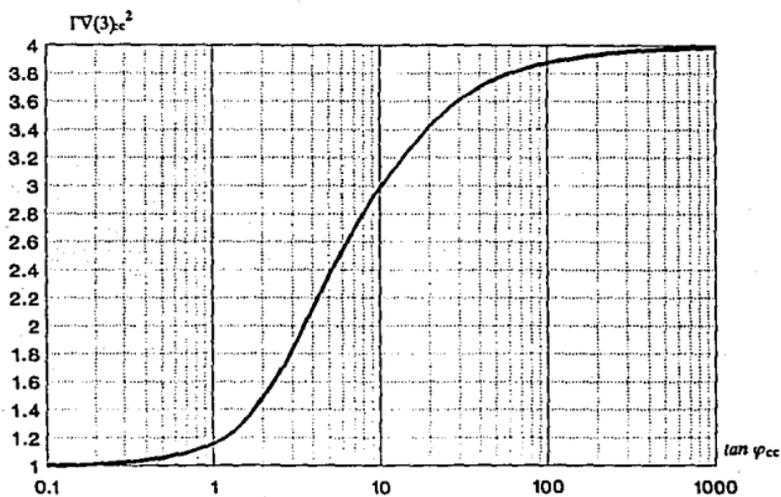
$$\Gamma_{arr} = 2.55 e^{-\pi / \tan \varphi_{cc}} - 0.28$$

y lo graficamos como se muestra en la gráfica VI, se podrán leer directamente de la gráfica los valores de este factor.

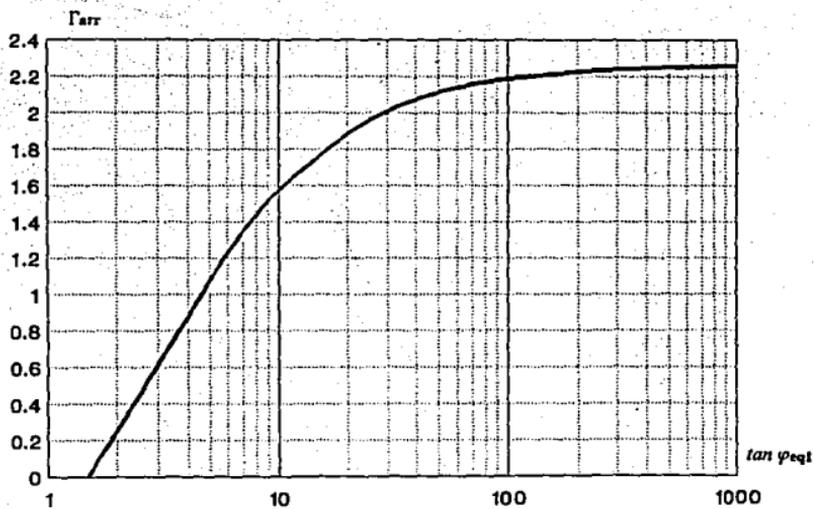




Gráfica IV Factor cuadrático de oscilación máxima de la potencia activa.



Gráfica V Factor cuadrático de la potencia activa trifásica máxima de cc



Gráfica VI Factor de la corriente de conexión para un transformador

MANEJO

En las maniobras de embarque, almacenaje e instalación de un transformador, deben usarse los ganchos provisos para el levantamiento. Nunca se apoye, sujete, levante o arrastre el transformador mediante las boquillas, radiadores o partes no previstas para estas maniobras. En el transporte se debe tener la precaución de instalar los registradores de impacto.

INSTALACION

A la recepción del transformador y antes de energizarlo, se recomienda revisar lo siguiente:

- 1.- Que el tanque no presente abolladuras o fugas de aceite. En caso de encontrar alguno de estos defectos se recomienda que el transformador sea inspeccionado en el taller.
- 2.- Que la cubierta, boquillas, ganchos, soportes, tuercas y demás partes exteriores, estén solidamente fijadas y que las conexiones interiores de cada una de las boquillas estén perfectamente apretadas.
- 3.- Que el aceite se encuentre al nivel que se marca en la pared interior del tanque o en el indicador tipo carátula, en los casos que lo lleve el transformador (el nivel correcto de aceite corresponde a una temperatura de 25° C).
- 4.- En el caso de transformadores con devanado de baja tensión múltiple, verifique que las conexiones internas correspondan a la tensión del circuito por alimentar (Placa de datos).
- 5.- Verifíquese que el "cambiador de derivaciones" (si es que lo trae), esté en la posición adecuada a la tensión de alimentación del transformador. En los casos que se requiera hacer un cambio, consulte en la placa de datos del transformador y compruebe que los contactos del cambiador queden correctamente cerrados (al cerrarse los contactos correctamente se produce un ligero ruido de enganche).
- 6.- Que las conexiones en las boquillas estén hechas apropiadamente, para evitar calen-

tamiento por falso contacto y que el peso de los conductores no esté soportado directamente por las boquillas.

7.- Que el tanque se haya conectado "efectivamente" a tierra mediante el conector previsto para esto.

8.- Que el transformador quede instalado en posición vertical. Asegurándose que la entrada superior a los tubos de enfriamiento, queden cubiertos por el aceite.

9.- En los casos que dos o más transformadores se requieran conectar en paralelo, consulte la sección 1.8, la cual se refiere al acoplamiento en paralelo de transformadores.

Una vez comprobado todo lo anterior se procede a fijar o anclar el transformador en el lugar de su operación, conectándolo con los conductores de alimentación y carga de sección adecuada y con el aislamiento correspondiente. Posteriormente se realizan las pruebas de puesta en servicio previas a la energización.

OPERACION

Ya comprobado lo anterior el transformador puede ser energizado. En la maniobra de cambios de posición del "cambiador de derivaciones" desenergice totalmente el transformador.

En el inicio de la operación, también es necesario efectuar las pruebas de puesta en servicio, incluyendo la calibración de las protecciones y la verificación de su funcionamiento.

Posteriormente se tendrá bajo observación durante su operación; determinando de ser posible el nivel de ruido audible, en el caso de una instalación de potencia.

En caso de necesidad de remover la cubierta del transformador, debe evitarse que el aceite se contamine por humedad, suciedad de manos y / o ambiente y cuidar que por ningún motivo caigan cuerpos extraños en el interior del tanque.

MANTENIMIENTO.

Recomendamos que antes de realizar cualquier maniobra de mantenimiento se desenergice totalmente el transformador.

Compruebe periódicamente los sellos y empaques, cerciorándose que no han sufrido daños y no existen fugas de aceite.

Compruebe periódicamente la limpieza y calidad del aceite verificando sus características aislantes en la "copa estandar americana" y asegurándose que al obtener las muestras del aceite no se contamine por falta de cuidado en el muestreo. Se debe de reacondicionar todo aceite que "rompa" a 22 KV o menos.

Se recomienda tener partes de repuesto, por lo menos una boquilla de alta tensión, una boquilla de baja tensión y un juego de empaques.

También se recomienda efectuar registros de ruido audible.

Para información adicional sobre partes de repuesto o servicio, dirigirse a su distribuidor correspondiente más cercano.

Símbolo	Magnitud	unidad
A	área	m ²
α	ángulo de pérdidas	grados
β	ángulo de cierre	grados
B	densidad de flujo	Wb/m ²
Bs	Inducción de saturación.	Wb/m ²
Br	densidad de flujo remanente	Wb/m ²
C	capacidad	faradio
c	velocidad de la luz	m / seg
C _D	Capacidad derivación	faradios
C _s	Capacidad serie	faradios
C _{eff}	capacitancia efectiva	faradios
d	distancia	m
D _i	diámetro interior	m
χ	densidad de flujo intrínseco	Wb/m ²
E	intensidad de campo eléctrico.	V / m
e, ϵ	fuerza electromotriz	Volts
e	carga del electrón	coul
F	fuerza	new
f	frecuencia	Hz
H	intensidad magnética	new / Wb o A / m
H _c	fuerza coercitiva	new / Wb o A / m
I, i	intensidad	amp
i _o	corriente de vacío	amp
I _{mcc}	corriente máxima de corto-circuito	amp
I _m	corriente de magnetización	amp
I	corriente eficaz	amp
I _{fe}	corriente de pérdidas en el fierro	amp
I _n	corriente nominal	amp
L	inductancia	henrios
L _m	inductancia de magnetización	henrios
L _d	inductancia de dispersión	henrios
l	longitud	m
l _m	longitud media	m

Simbolo	Magnitud	Unidad
f_m	fuerza magnetomotriz	A-vuelta
μ	permeabilidad	Wb / A-m
μ_0	permeabilidad del vacío	Wb / A-m
μ_r	permeabilidad relativa	Wb / A-m
P	potencia	watts
φ	ángulo de defasamiento	grados
Φ	flujo magnético	Weber
Φ_s	flujo de saturación	Weber
Φ_m	flujo máximo	Weber
Φ_r	flujo remanente	Weber
Q, q	carga eléctrica	coul
Ph	pérdidas por histéresis	watts
Pc	pérdidas por corrientes parásitas	watts
pu	valores en por unidad	%
R	resistencia	Ω
ρ	resistividad eléctrica	ohmio-m
S	potencia aparente	Volt-Amper
T	período	seg
t	tiempo	seg
τ	constante de tiempo	seg
θ_{cc}	ángulo de corto-circuito	grados
V	Voltaje	volts
V_m	voltaje máximo	volts
V_n	voltaje nominal	volts
V	volumen	m^3
ω	velocidad angular	rad / seg
X_L	reactancia inductiva	Ω
X_C	reactancia capacitiva	Ω
X_d	reactancia de dispersión	Ω
Z	impedancia	Ω
Z_n	impedancia nominal	Ω
\mathcal{R}	reluctancia del circuito	A-vuelta / m

$$\pi \approx 3.1416$$

$$e = 2.7183$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$$

$$c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/seg.}$$

material	Coefficiente de Steinmetz (η)
Acero fundido duro	0.025
Acero forjado	0.020
Acero fundido	0.012
Lámina de hierro	0.004
Lámina de acero al silicio	0.001
Lámina de acero con alta proporción de silicio	0.00046
Permalloy (hierro-níquel)	0.00010

ALFABETO GRIEGO

A	α	Alfa
B	β	beta
Γ	γ	Gamma
Δ	δ	Delta
E	ϵ	epsilon
X	χ	Chi
Φ	ϕ	Fi
H	η	Eta
I	ι	Iota
ϑ	φ	phi
K	κ	Kappa
Λ	λ	Lambda
M	μ	mu
N	ν	nu
O	\omicron	Omicron
Π	π	Pi
Θ	θ	Theta
P	ρ	Rho
Σ	σ	Sigma
T	τ	Tau
Y	υ	Upsilon
Ω	ω	Omega
Ξ	ξ	Xi
Ψ	ψ	Psi
Z	ζ	Zeta

Relaciones trigonométricas.

$$1 + \tan^2 \varphi = \frac{1}{\cos^2 \varphi}$$

$$\operatorname{sen}^2 \alpha + \cos^2 \alpha = 1$$

$$\tan \alpha \cdot \cot \alpha = 1$$

$$1 + \cot^2 \alpha = \frac{1}{\operatorname{sen}^2 \alpha}$$

Funciones de sumas y diferencias de ángulos.

$$\operatorname{sen}(\alpha \pm \beta) = \operatorname{sen} \alpha \cos \beta \pm \cos \alpha \operatorname{sen} \beta$$

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cos \beta \pm \operatorname{sen} \alpha \operatorname{sen} \beta$$

Relaciones equivalentes.

$$\cos \phi \cos \theta + \operatorname{sen} \phi \operatorname{sen} \theta = \cos(\phi - \theta) = \cos(\theta - \phi)$$

$$\operatorname{sen} \phi \cos \theta - \cos \phi \operatorname{sen} \theta = \operatorname{sen}(\phi - \theta) = -\operatorname{sen}(\theta - \phi)$$

$$\operatorname{sen} \omega t \cos(\theta - \phi) + \cos \omega t \operatorname{sen}(\theta - \phi) = \operatorname{sen}(\omega t + \theta - \phi)$$

$$-(\operatorname{sen} \theta \cos \phi - \cos \theta \operatorname{sen} \phi) = -\operatorname{sen}(\theta - \phi)$$

Transformada de algunas funciones básicas.

	$f(t)$	$L\{f(t)\} = F(s)$
1	1	$\frac{1}{s}$
2	$t^n \quad n = 1, 2, 3, \dots$	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
3	e^{at}	$\frac{1}{s-a}$
4	$\text{sen } \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
5	$\text{cos } \omega t$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
6	$\text{sen } h \omega t$	$\frac{\omega}{s^2 - \omega^2}$
7	$\text{cos } h \omega t$	$\frac{s}{s^2 - \omega^2}$
8	$\text{sen } (\omega t \pm \theta)$	$\frac{\omega \cos \theta \pm s \text{sen } \theta}{s^2 + \omega^2}$
9	$\text{cos } (\omega t \pm \theta)$	$\frac{s \cos \theta \pm \omega \text{sen } \theta}{s^2 + \omega^2}$

Transformadas de derivadas

1	$f^n(t)$	$s^n F(s) - s^{n-1}f(0) - s^{n-2}f'(0) - \dots - f^{n-1}(0)$
2	$v = Ri$	$v(s) = RI(s)$

Transformada inversa de algunas funciones básicas.

	$F(s)$	$f(t)$
1	$\frac{1}{s}$	$1(t)$
2	$\frac{1}{s+a}$	e^{-at}
3	$\frac{1}{s(s+a)}$	$\frac{1}{a}(1-e^{-at})$
4	$\frac{s+a}{s(s+b)}$	$\frac{a}{b} + \frac{b-a}{b}e^{-at}$
5	$\frac{\omega}{s^2+\omega^2}$	$\text{sen } \omega t$
6	$\frac{s}{s^2+\omega^2}$	$\text{cos } \omega t$
7	$\frac{\omega \cos \theta \pm s \text{sen } \theta}{s^2+\omega^2}$	$\text{sen } (\omega t \pm \theta)$
8	$\frac{s \cos \theta \pm \omega \text{sen } \theta}{s^2+\omega^2}$	$\text{cos } (\omega t \pm \theta)$
9	$\frac{1}{s(s^2+\omega^2)}$	$\frac{1}{\omega^2}(1-\text{cos } \omega t)$
10	$\frac{s}{(s^2+\omega^2)(s^2+a^2)}$	$\frac{\omega}{a^2-\omega^2}(\text{cos } \omega t - \text{cos } at)$
11	$\frac{\omega}{(s^2+\omega^2)(s+a)}$	$\frac{\omega}{a^2+\omega^2}e^{-at} + \frac{1}{(a^2+\omega^2)\sqrt{2}}\text{sen } (\omega t - \tan^{-1} \frac{\omega}{a})$
12	$\frac{s}{(s^2+\omega^2)(s+a)}$	$-\frac{a}{a^2+\omega^2}e^{-at} + \frac{1}{(a^2+\omega^2)\sqrt{2}}\text{sen } (\omega t - \tan^{-1} \frac{a}{\omega})$

A. E. Fitzgerald, Sc. D, Fundamentos de Ingeniería Eléctrica, 4ª edición, Editorial McGraw Hill, México 1978.

A. K. Sawhney, A Course In Electrical Machine Design, Editorial Dhanpat Rai

Allan Greenwood, Electrical Transients in Power Systems, Segunda edición, Editorial Wiley interscience, EUA 1971

Anthony S. Pansini, Basic Electrical Power Transformer, Editorial Hayden.

Chapman, Maquinas eléctricas, Editorial McGraw Hill.

Chester L. Dawes, Tratado de Electricidad Tomo I y II, Sexta impresión, Editorial Gustavo Gili, S. A, Barcelona España, 1974.

Comisión Federal de Electricidad, Transformadores (diseño)

Connelly, F. C., Magnetic circuits and transformers.

Corrales Martín Juan, Introducción a los fenómenos transitorios, Primera edición, Editorial Marcombo Boixareu Editores, Barcelona España, 1983.

Dennis G. Zill, Ecuaciones diferenciales con aplicaciones, 2ª edición, Grupo editorial Iberoamérica, S. A. de C. V., México, 1982

Enciclopedia CEAC de la electricidad, Transformadores y convertidores, 6ª edición, ediciones CEAC, Barcelona España 1990.

Enciclopedia CEAC de la electricidad, Materiales electrotécnicos, 6ª edición, ediciones CEAC, Barcelona España 1990.

Enciclopedia CEAC de la electricidad, Maquinas de ca., 6ª edición, ediciones CEAC, Barcelona España 1990.

Enrique Ras, Transformadores de potencia, de medida y de protección, 4ª edición, Editorial marcombo.

E. Santo Potess, Centrales eléctricas, editorial Gustavo Gili, S. A, Barcelona España, 1979

Francis W. Sears, Fundamentos de Física Parte II, sexta edición, editorial Aguilar, Madrid España, 1980.

George J. Thaler, Maquinas eléctricas, Primera edición, Editorial Limusa, México 1979.

G. N. petrov., Editorial Mir Moscu, Electrical Machines, part I.

Inving L. Kosow, PH, D, Maquinas eléctricas y transformadores, Editorial Reverte, Barcelona España, 1980

M. G. Van Valkenburg, Análisis de redes, Tercera edición, Editorial Limusa, México 1983.

Pacheco Valancia Hector M., Transformadores, Editora de libros técnicos.

P. R. Bardell, B. Sc., M. I. E. E., F inst. P., Los materiales magnéticos en la industria eléctrica, 2ª edición, ediciones URMO, Bilbao España 1970.

René Laurent, Materiales electrotécnicos modernos, editorial Gustavo Gili, S. A., Barcelona España 1970.

T. Wildi, Editorial Jhon Wiley, Electrical Power Technology.

Vembu Gourishankar, Conversión de energía electromecánica, Primera edición, Editorial Representaciones y servicios de ingeniería S. A., México 1975

Viqueira Landa Jacinto, Redes eléctricas parte II, Tercera edición, Editorial Representaciones y servicios de ingeniería, S. A., México 1986.

V. Vénikov, Procesos transitorios electromecánicos en los sistemas eléctricos de potencia, Editorial Mir Moscú, 1988.

William H. Hayt, Jr., Análisis de circuitos eléctricos en ingeniería, Cuarta edición, Editorial McGraw Hill, México 1991.