

**Departamento de Eléctrica
Facultad: Metalurgia Electromecánica.**

***Trabajo de diploma en opción del
título de Ingeniero Eléctrico.***

**Título: Diseño y construcción de un banco de pruebas de
transformadores eléctricos con fines docentes.**

Autor: Raimundo Rodríguez Martínez.

Tutor: Ms. C. Yetsy Silva Cala

**Moa 2018
“Año 60 de la Revolución”**



Declaración de autoridad

En decisión conjunta, el autor Raimundo Rafael Rodríguez Martínez y el tutor Ms. C. Yetsy Silva Cala, certificamos nuestra propiedad intelectual sobre este Trabajo de Diploma con título: “Diseño y construcción de un banco de pruebas de transformadores eléctricos con fines docentes”. Somos los únicos autores de este Trabajo de Diploma, y autorizamos al Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, a hacer uso del mismo para fines docentes y educativos

Autor

Raimundo Rafael Rodríguez Martínez

Tutor

Ms. C. Yetsy Silva Cala



Agradecimientos

Agradezco:

A la revolución por haberme permitido formarme como ingeniero eléctrico.

A mis padres Moisés Rodríguez Frómeta y Lourdes Martínez Tamayo por haberme dado la vida, educado con tanto amor y cariño, y, por haber forjado a la persona que soy hoy.

A mis familiares y amigos por su apoyo incondicional.

A mi tutor Yetsy Silva Cala, por guiarme y por apoyarme.

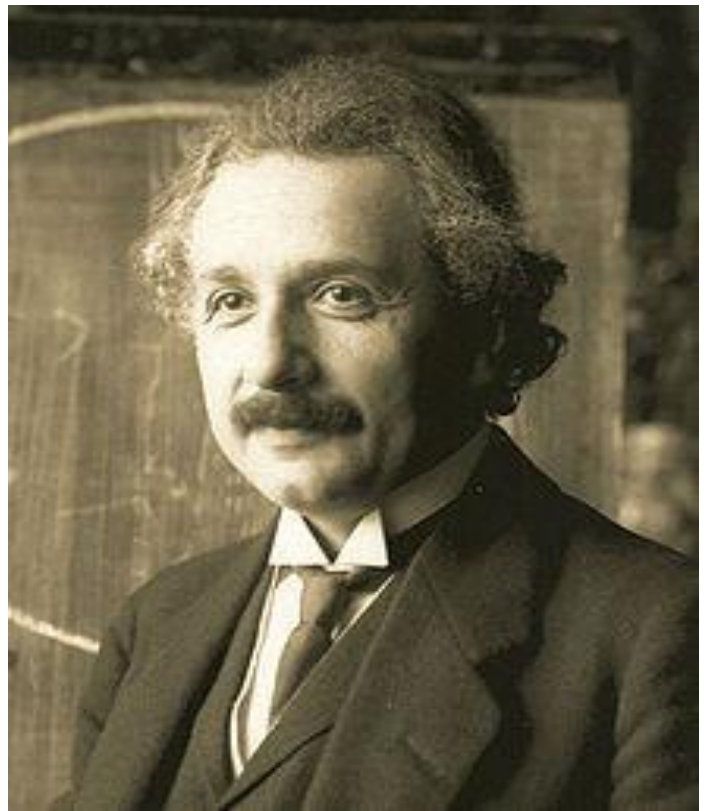
Al claustro de profesores del Departamento de ingeniería Eléctrica que de una forma u otra ayudaron a mi formación profesional.

A todos muchas gracias.



Pensamiento

Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.



Albert Einstein

*No te sientas mal por no poder hacer lo que quieras
piensa que es más útil querer lo que haces*

Anónimo



Resumen

En el presente trabajo se diseña, y construye un banco de pruebas para el trabajo de laboratorio con transformadores eléctricos. Formando parte de los puestos de trabajo del Laboratorio de Maquinas Eléctricas del departamento de Eléctrica del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM), se implementa un banco de transformadores trifásico formado por tres transformadores monofásicos que permitirá a los estudiantes realizar experimentos apoyándose en los conocimientos adquiridos en el plan de estudio de la asignatura de transformadores para realizar los diferentes tipos de ensayos a los que son sometidas estas máquinas una vez construidas.

Además de incluir los demás agregados en la circuitería que se necesita para el montaje, se valida la investigación mediante una búsqueda bibliográfica del tema, se realizan específicamente los ensayos de vacío y cortocircuito, diferentes tipos de conexiones de transformador en diferentes regímenes de funcionamiento. En el análisis técnico económico realizado se muestra la validez de la aplicación mostrada, por su importancia para la docencia.



Abstract

In the present paper, a test bench for laboratory work with electrical transformers is designed and builded. As part of the work placements of the Electrical Machines Laboratory of the Electrical Department of the Higher Metallurgical Mining Institute of Moa, a three-phase transformer bank consists of three single-phase transformers that will allow students to carry out experiments based on knowledge. Acquired in the curriculum of the subject of transformers to perform the different types of tests to which these machines are subjected once built.

In addition to including the other aggregates in the circuitry that it's needed for the assembly, the research is validated by a bibliographic search of the subject; specifically, the vacuum and short circuit tests are carried out, different types of transformer connections in different operating regimes. In the technical economic analysis carried out, the validity of the application shown it's shown, due to its importance for teaching.



Índice

Introducción.....	1
Situación Problemática.....	1
Problema.....	1
Hipótesis.....	2
Objetivo general	2
Objetivos específicos	2
Tareas.	2
Objeto de estudio	2
Campo de Acción	2
Capítulo 1: Marco teórico	3
1.1. Introducción.....	3
1.2. Tendencias y tecnologías actuales	3
1.3. El transformador eléctrico, su historia	6
1.3.1. Transformador ideal.....	7
1.3.2. Transformador real	8
1.3.3. Circuitos equivalentes aproximados de un transformador	9
1.3.4. Componentes de un transformador	9
1.4. Ensayos de cortocircuito y vacío	14
1.4.1. Ensayos de vacío	14
1.4.2. Ensayos de cortocircuito.....	16
1.5. Tipos de conexión en bancos trifásicos.....	18
1.5.1. Conexión estrella delta	18
1.5.2. Conexión delta-estrella	20
1.5.3. Conexión estrella-estrella.	21
1.5.4. Conexión delta-delta.....	23
1.6. Tipos de Conexión con dos transformadores.....	24
1.6.1. Conexión Δ abierta (o V-V)	24
1.6.2. Conexión Y abierta- Δ abierta.....	25
1.6.3. La conexión Scott-T	26
1.6.4. La conexión T trifásica.....	27
1.7. Transformadores en paralelo	28



1.7.1. Condiciones para la puesta en paralelo.....	29
1.8. Conclusiones Parciales	30
Capítulo 2 Materiales y Métodos	31
2.1 Introducción	31
2.2 Diagrama en bloque del circuito realizado	31
2.2.1 Bloque A	31
2.2.3 Bloque B	31
2.2.4 Bloque C	32
2.3 Materiales y métodos utilizados	32
2.3.1 Habilidades a adquirir por los estudiantes:	32
2.3.2 Procedimientos	32
2.3.3 Recursos con que se cuenta para la construcción del banco de transformadores.....	33
2.3.4 Normas de seguridad.....	33
2.3.5 Tensiones de trabajo de los transformadores	33
2.4.1 Ensayo 1 Conexiones de transformadores	34
2.4.2 Ensayo 2.- Pruebas en vacío	36
2.4.4 Ensayo 4.- Transformador trifásico con carga	38
2.4.5 Ensayo 6.- Ensayo de calentamiento.....	39
2.5 Conclusiones.....	39
Capítulo 3. Resultados y valoración técnica-ecológica-social	40
3.1 Introducción	40
3.2 Análisis de los resultados obtenidos	40
3.3 Análisis técnico de funcionamiento del sistema	41
3.4 Aplicación docente del medio de enseñanza.....	42
3.5 Valoración ecológica y social.	42
3.6 Instrucciones de operación y de mantenimiento	42
3.6.1 Instrucciones operación	42
3.6.2 Instrucciones de mantenimiento	43
3.7. Conclusiones.....	43
Conclusiones Generales.	44
Recomendaciones.....	45
Bibliografías.....	46



Anexos.....



Introducción

Desde el surgimiento del primer transformador eléctrico en 1831 construido por Michael Faraday y más de 50 años después, en 1884 patentado por los ingenieros húngaros Zipernowsky, Bláthy y Deri, trabajadores todos de la compañía los cuales además descubrieron la fórmula matemática de los transformadores y que posterior mente tendría una especial relevancia en la denominada guerra de las corrientes se ha hecho necesario el estudio y la preparación de por parte de los profesionales de la rama de la eléctrica en la disciplina de transformadores eléctricos lo cual ha permitido y permitirá el desarrollo y modernización de estos, por este motivo en las universidades en las cuales se imparte la carrera de Ingeniería Eléctrica existen puestos de trabajo para todo tipo de actividades de laboratorio, pero en el Instituto Minero Metalúrgico de Moa (ISMMM) existen deficiencias en este ámbito especialmente en la categoría de las maquinas eléctricas esencialmente para el caso de los transformadores, no existen puestos de trabajo dedicados para estos fines, por lo que la propuesta de este trabajo es la construcción de un banco de transformadores para el trabajo de laboratorio con transformadores eléctricos, siendo el objetivo del trabajo diseñar y construir un puesto de trabajo para la realización de las prácticas de laboratorio de Transformadores.

Situación Problemática

El deterioro paulatino del laboratorio de máquinas de la carrera de Ingeniería Eléctrica en el ISMMM, ha provocado que los estudiantes no cuenten con los medios suficientes para realizar algunos ensayos que permiten desarrollar habilidades aplicando los conocimientos de las asignaturas de la disciplina de Máquinas Eléctricas.

Problema

Necesidad de un puesto de laboratorio físico para la determinación de parámetros del circuito equivalente de transformadores mediante los ensayos de vacío y cortocircuito.



Hipótesis

Si se diseña y construye un puesto de trabajo en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas para el desarrollo de ensayos de laboratorio con transformadores eléctricos, entonces los estudiantes podrán determinar los parámetros del circuito equivalente mediante ensayos de cortocircuito y vacío, así como otros parámetros y realizar los distintos tipos de conexiones de un banco trifásico.

Objetivo general

Diseñar y construir un banco de pruebas para prácticas de laboratorio de transformadores eléctricos.

Objetivos específicos

1. Establecer las bases teóricas para la construcción del banco de trabajo.
2. Crear una metodología para el uso por parte de los estudiantes del banco de trabajo
3. Evaluar el impacto social del trabajo.

Tareas.

1. Selección de los transformadores.
2. Realización de los cálculos de cortocircuito y vacío para cada transformador.
3. Montaje de los transformadores y los equipos de medición en el puesto de trabajo.

Objeto de estudio

Banco de pruebas para el trabajo de laboratorio con transformadores eléctricos.

Campo de Acción

Determinación de parámetros de circuito equivalente y conexionado de transformadores.



Capítulo 1: Marco teórico

1.1. Introducción

En el presente capítulo se realiza una búsqueda bibliográfica sobre las temáticas relacionadas con el objeto de estudio, para poder crear las pautas necesarias para la realización del puesto de laboratorio planteado en la metodología de estudio de la carrera de Ingeniería Eléctrica.

1.2. Tendencias y tecnologías actuales

El desarrollo de las máquinas eléctricas por su constante desarrollo constituye una rama relativamente nueva en el conocimiento humano. Desde su surgimiento y desarrollo han sido el convertidor fundamental de energía, encontrando extensa aplicación como generador, motor o compensador de energía eléctrica en centrales eléctricas, plantas industriales y agrícolas, en la mayoría de los efectos electrodomésticos y en sistemas de mando y regulación.

Dentro de estas, el transformador es uno de los dispositivos eléctricos más usados, fundamentalmente en la relación con la transmisión y distribución de la energía eléctrica. Uno de los factores que favorecen el amplio uso de los voltajes alternos, si se les compara con los directos, radica precisamente en que posibilitan la utilización de los transformadores, por medio de los cuales se logra transformar la tensión de energía eléctrica en las plantas generadoras al voltaje más económico para su transmisión, posterior distribución y consumo.

Esta es precisamente, la importantísima función que realizan los transformadores en las redes eléctricas. Estos equipos poseen una elevada eficiencia, característica esta de gran importancia hoy en día. Además, son de una extraordinaria simplicidad y su mantenimiento y reparación se realiza con facilidad según el nivel de tensión de los mismos. Su posibilidad de falla es menor en comparación con el resto de las máquinas rotatorias.[1]

Durante el desarrollo de la carrera de Ingeniería Eléctrica se les da gran importancia a los transformadores, dedicándose una asignatura al estudio de los mismos. Por tal motivo y en función de lograr en los estudiantes la obtención y dominio de estos conocimientos se hace necesaria la presencia en el plan de estudio de una fuerte componente práctica.



Como parte fundamental de las actividades a desarrollar por los estudiantes en los cursos de Transformadores, se encuentran los laboratorios que permiten la adquisición de las habilidades declaradas en el programa analítico de la asignatura.[1-11]

Por tal motivo, en cualquier institución que se dedique a la formación de Ingenieros Electricistas debe existir un laboratorio con estos fines. En el caso del (ISMM), no se cuenta con el Laboratorio de Ensayos para transformadores, donde se impartan las prácticas de esta asignatura[12].

En general son pocos los esfuerzos realizados por revertir esta situación en los últimos años, dado que no existen trabajos de diploma recientes que corroboren lo contrario se hizo necesaria la búsqueda de la información en otros lugares con el objetivo de investigar cómo se ha tratado esta temática en otras universidades, ya sean del país o no.

En el (ISMM) Está el trabajo de diploma en opción del título de ingeniero eléctrico de Lorenzo. En este trabajo se lleva a cabo la construcción de un puesto de trabajo para ensayos a transformadores en El Laboratorio de Maquinas Eléctricas del (ISMM), en general este trabajo es bastante completo, pero solo se limitaba a los ensayos y los conexiones se hacían de forma interna ósea los estudiantes solo lo veían de forma esquemática y en este los estudiantes lo pueden ver de forma física y real además de que este puesto de trabajo está actualmente en un estado de deterioro extremo.[13]

El trabajo de diploma en opción del título de ingeniero eléctrico de Jeferson Daniel Pazmiño Bustamante que se titula “Diseño de un banco de pruebas para transformadores de distribución”. En este trabajo se propone una metodología de construcción de bancos de pruebas para transformadores, pero no se lleva a cabo la construcción de ninguno. [12]

También está el caso del artículo publicado por los profesores MsC José E Montejo Sivilla, MsC Elías de la Rosa Masdueño, Ing. Alfredo Hernández Rosales, Ing. Pablo Reyes Fernández y el MsC Alfredo Carbonell Mendoza de la universidad de Camagüey donde se propone la construcción de un sistema de puestos de trabajos para la realización de estos ensayos y pruebas anteriormente descritos, en este trabajo es bastante completo solo tiene la dificultad de que no es un solo puesto de trabajo sino un sistema de estos lo



que no es posible llevar a cabo en el (ISMM) porque no se cuenta con los recursos ni el local con suficiente espacio para esto, además este no detalla el funcionamiento ni la metodología para cada ensayo o práctica. [14]

Por otra parte, se encuentra el proyecto de fin de curso de la carrera Ingeniería Técnica Industrial, Electricidad de Alejandro González Vergara de la Universidad Carlos III de Madrid en Mayo de 2009 donde se pone en funcionamiento un puesto de trabajo para realizar ensayos de cortocircuito y vacío a un transformador 110/12V de 25VA este trabajo detalla estas pruebas en su totalidad pero se limita a estas y no se realiza más ningún ensayo. [15]

También el artículo publicado por los profesores J. M. Díaz Chacón, C. Amaro Hernández, V. Mata Brauer y A. Navarro Valle en Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa el cual tiene por título: Uso de un módulo didáctico de transformadores eléctricos en la enseñanza de la asignatura de Máquinas de Inducción en este artículo se propone un módulo didáctico con dos transformadores pequeños para realizarles ensayos de cortocircuito y vacío este también es un trabajo bastante completo en estos dos ensayos pero como el anterior no se propone más ningún ensayo. [16]

Según estudios realizados, los principales problemas para un desarrollo exitoso de estas prácticas estaban dados por:

1. Deterioro del equipamiento de ensayo.
2. Escasez de instrumentos de medición.
3. Escasez de puestos de trabajos para estos fines.
4. Gran cantidad de alumnos por puestos de trabajo.
5. Elevado costo del equipamiento de laboratorio en el mercado internacional.

De esta forma se plantea como problemática la situación de cómo desarrollar habilidades experimentales en los estudiantes de Ing. Eléctrica en la asignatura Transformadores, a través de la construcción de un sistema de puestos de trabajo para prácticas de laboratorio.

1.3. El transformador eléctrico, su historia

Desde el surgimiento del primer transformador eléctrico en 1831 construido por Michael Faraday cuando se disponía a llevar a cabo los experimentos en los que posteriormente descubriría la inducción electromagnética.

Los elementos que usó fueron dos bobinas enrolladas una sobre la otra. Al variar la corriente que pasaba por una de ellas, cerrando o abriendo el interruptor, el flujo magnético, a través de la segunda bobina variaba y se inducía una corriente eléctrica. Esto es, precisamente un transformador eléctrico. Pero como suele pasar en estos casos, su descubridor, Michael Faraday, no prestó mayor atención a este hecho ya que eran otras cuestiones las que le interesaban.

Con el pasar de los años, varios fueron los científicos que llevaron a cabo experimentos con distintas versiones de este primer transformador inventado por Faraday.

Más de 50 años después, en 1884 los ingenieros húngaros Zipernowsky, Bláthy y Deri, trabajadores todos de la compañía Ganz crearon en Budapest el modelo “ZBD” de transformador de corriente alterna además de descubrir la fórmula matemática para la relación de transformación de los transformadores:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p} \quad (1.1)$$

Dónde: (V_s) es la tensión en el secundario y (N_s) es el número de espiras en el secundario, (V_p) y (N_p) se corresponden al primario. Su solicitud de patente hizo el primer uso de la palabra transformador, que había sido acuñada por Ottó Titusz Bláthy. El que tuvo especial relevancia en la guerra de las corrientes

El funcionamiento de los transformadores se basa en el fenómeno de la inducción electromagnética, cuya explicación matemática se resume en las ecuaciones de Maxwell[6, 10, 11, 17-22]

Al aplicar una fuerza electromotriz en el devanado primario o inductor, producida esta por la corriente eléctrica que lo atraviesa, se produce la inducción de un flujo magnético en el núcleo de hierro. Según la ley de Faraday, si dicho flujo magnético es variable, aparece una fuerza electromotriz en el devanado secundario o inducido. De este modo, el circuito eléctrico primario y el circuito eléctrico secundario quedan acoplados mediante un campo magnético.

La tensión inducida en el devanado secundario depende directamente de la relación entre el número de espiras del devanado primario y secundario y de la tensión del devanado primario. Dicha relación se denomina relación de transformación.

1.3.1. Transformador ideal

Se considera un transformador ideal aquel en el que no hay pérdidas de ningún tipo. En la práctica no es realizable, pero es útil para comprender el funcionamiento de los transformadores reales.[1, 3, 5, 9, 11, 18-20, 23]

En un transformador ideal, debido a la inducción electromagnética, las tensiones en los devanados son proporcionales a la variación del flujo magnético que las atraviesa y al número de espiras del devanado. Puesto que el acoplamiento magnético de los devanados se considera perfecto, se deduce que la relación entre las tensiones es inversamente proporcional a la relación entre el número de espiras de los devanados.

Los transformadores reales se diferencian de los ideales en los siguientes aspectos [24]:

- Los arrollamientos o devanados tienen resistencia eléctrica y capacidades parásitas.
- En el interior del núcleo hay corrientes parásitas o corrientes de Foucault.
- El ciclo de magnetización y desmagnetización del núcleo consume energía debido a la histéresis magnética.
- El acoplamiento magnético de los devanados no es perfecto, que se traduce en una inductancia o flujo de dispersión.



- La permeabilidad magnética del núcleo depende de la frecuencia.
- La saturación magnética del núcleo provoca que la inductividad de los devanados no sea constante.
- El núcleo varía ligeramente su geometría debido a la magnetostricción.

1.3.2. Transformador real

- La resistencia de los devanados, la histéresis del núcleo y las corrientes parásitas producen pérdidas de energía. Las pérdidas de energía debidas a la resistencia eléctrica de los arrollamientos se denominan pérdidas en el cobre. Las pérdidas por el efecto de la histéresis y por las corrientes parásitas se denominan pérdidas en el hierro.
- Las pérdidas en el cobre dependen cuadráticamente de la corriente de carga del transformador, es decir, del cuadrado de la intensidad de cada arrollamiento. Las pérdidas en el hierro son prácticamente independientes del nivel de carga del transformador, pero proporcionales al cuadrado de la densidad de flujo magnético del núcleo. Así mismo, las pérdidas por histéresis son proporcionales a la frecuencia eléctrica, mientras que las corrientes parásitas son proporcionales al cuadrado de la frecuencia.
- El flujo magnético de dispersión provoca que la tensión en el secundario sea algo menor que en un transformador ideal.
- La saturación magnética limita la frecuencia mínima de funcionamiento o, dicho de otro modo, dada una frecuencia y un número de espiras, limita la tensión máxima posible del primario. Si se sobrepasan dichos límites y se satura el núcleo, aparecen grandes corrientes en el primario con poco o ningún efecto en la tensión del secundario. La saturación magnética se puede evitar incrementando el número de espiras en el primario (y por consiguiente también en el secundario) a cambio de un mayor volumen físico y mayores pérdidas en el cobre. La saturación magnética juega también un papel importante en la corriente de inserción; debido a corrientes en el primario varias veces la nominal, la saturación evita una sobrecarga en el secundario.

1.3.3. Circuitos equivalentes aproximados de un transformador

Los modelos de transformadores que se han descrito hasta ahora son más complejos de lo que se requiere en la práctica de la ingeniería para obtener buenos resultados. Una de las quejas principales sobre ellos es que la rama de excitación del modelo añade otro nodo al circuito que se analiza, lo que hace que la solución de éste sea más compleja de lo necesario. La rama de excitación tiene una corriente muy pequeña comparada con la corriente de carga de los transformadores. De hecho, la corriente de excitación es sólo aproximadamente de 2 a 3% de la corriente de carga total de los típicos transformadores de potencia. Por esta causa, se puede producir un circuito equivalente simplificado que funciona casi tan bien como el modelo original. Simplemente se mueve al frente del transformador la rama de excitación y las impedancias primarias y secundarias se dejan conectadas en serie. Se añaden estas impedancias dando como resultado el circuito equivalente aproximado que se muestra en la figura 1a) y b).

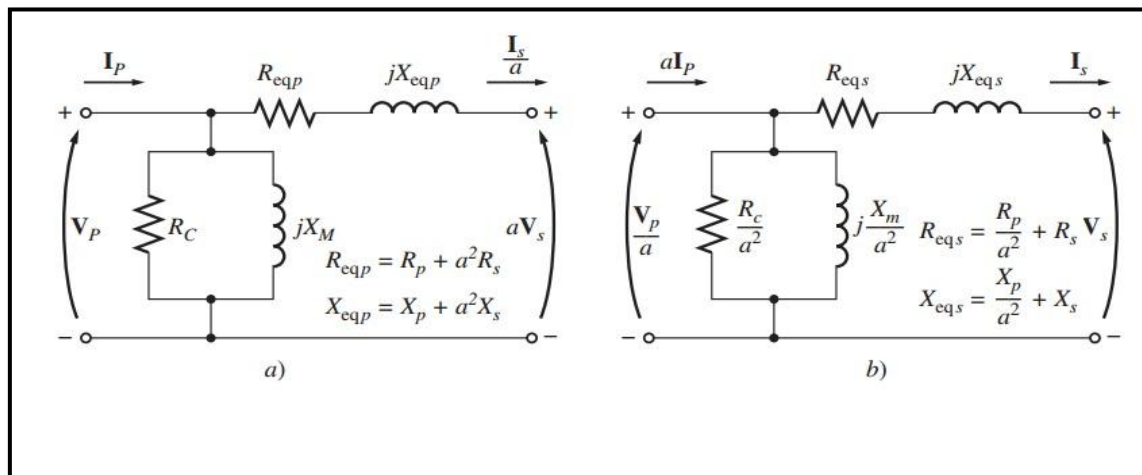


Figura 1.1 a) Modelo del transformador referido a su nivel de voltaje primario. b) El modelo del transformador referido a su nivel de voltaje secundario.

1.3.4. Componentes de un transformador

Núcleo

El núcleo de un transformador es la zona por la que circula el campo magnético entre los devanados primario y secundario. Dependiendo de la finalidad del



transformador, puede tener varias formas y estar constituido por diferentes materiales.

El núcleo está formado habitualmente por varias chapas u hojas de metal (generalmente material ferromagnético) que están apiladas una junto a la otra, sin soldar, similar a las hojas de un libro. La función del núcleo es mantener el flujo magnético confinado dentro de él y evitar que este fluya por el aire favoreciendo las pérdidas en el núcleo y reduciendo la eficiencia. La configuración por láminas del núcleo laminado se realiza para reducir las corrientes de Foucault y, consiguientemente, reducir las pérdidas de energía en el núcleo.[12]

Algunos transformadores no tienen núcleo y se les denomina transformadores sin núcleo o con núcleo de aire. Un núcleo de aire es esencialmente un núcleo sin pérdidas por histéresis o corrientes de Foucault. Sin embargo, la inductancia de dispersión es muy alta, siendo inapropiados para la transmisión de potencia. Por el contrario, tienen un ancho de banda muy alto y se emplean frecuentemente en aplicaciones de radiocomunicación. Dentro del concepto de transformadores de núcleo de aire entran también los sistemas de carga inalámbrica y las bobinas de Tesla.

Devanados o Bobinas

Son generalmente de cobre enrollado en el núcleo. Según el número de espiras (vueltas) alrededor de una pierna inducirá un voltaje mayor. Se juega entonces con el número de vueltas en el primario versus las del secundario. En un transformador trifásico el número de vueltas del primario y secundario debería ser igual para todas las fases.

Disposición

El devanado primario y secundario se suelen arrollar uno dentro del otro. La razón es reducir al máximo la inductancia de dispersión y aprovechar al máximo el núcleo magnético disponible. Entre los arrollamientos es necesario una capa aislante, puesto que ambos funcionan a tensiones diferentes. Para evitar tener espesores de capa aislante demasiado gruesos, lo más habitual es



encontrar el devanado de baja tensión arrollado sobre el núcleo y el devanado de alta tensión arrollado sobre el devanado de baja tensión.

Aislamiento

Debido a que las diferentes partes eléctricas de un transformador se encuentran a distintas tensiones, es necesario aislarlas entre sí para evitar la aparición de arcos eléctricos y consecuente degradación de los componentes. Existen varios tipos de aislamiento en un mismo transformador.

- Aislamiento entre arrollamiento y núcleo - En transformadores de alta tensión suele ser una lámina de papel impregnada en aceite mineral.
- Aislamiento entre distintos arrollamientos - En transformadores de alta tensión suele ser una lámina de papel impregnada en aceite mineral.
- Aislamiento entre espiras no consecutivas de un mismo arrollamiento - Dos espiras diferentes de un transformador tienen distintos niveles de tensión y deben ser aisladas. En transformadores de alta tensión puede ser una lámina de papel impregnada en aceite mineral o una capa de laca sobre el cobre.
- Aislamiento entre espiras consecutivas de un mismo arrollamiento - Incluso dos espiras consecutivas tienen distintos niveles de tensión y deben ser aisladas entre sí. Una fina capa de laca sobre el cobre suele hacer esta función.

Corriente Inrush

La corriente Inrush o corriente de inserción o corriente transitoria de magnetización es una corriente transitoria que se produce en el momento de conectar el transformador a la red. Su magnitud puede ser de 10 veces la corriente nominal hasta 100 veces en casos raros.

Boquillas terminales o Bushing

Son aisladores pasantes ubicados en la carcasa o Cuba de los transformadores (ver figura 1.2)

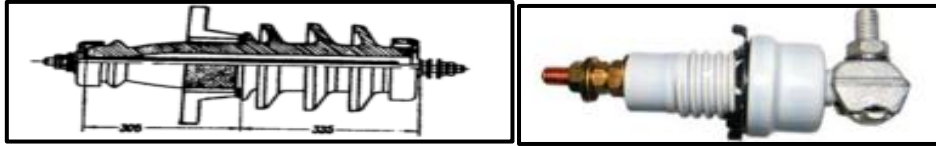


Figura 1.2 Bushing o aislador pasante de porcelana

Las boquillas terminales o bushing se utilizan para pasar un conductor de alta tensión a través de una superficie aterrada como es el caso del tanque de un transformador o de un reactor. Los bushing deben ser capaces de transportar las corrientes de los equipos en régimen nominal y de sobrecarga, de mantener el aislamiento tanto para tensión nominal como para sobretensiones y de resistir también esfuerzos mecánicos.

Las boquillas de acuerdo a las funciones desempeñan se pueden clasificar en:

- 1) Boquillas de terminales de línea
- 2) Boquillas de terminales en neutro
- 3) Boquillas de terminales terciario

Las boquillas para transformadores y reactores son del tipo exterior inmersa, es decir una extremidad está destinada a la exposición a la intemperie y la otra inmersa en aceite aislante.

Las boquillas de terminales de línea son en general de papel impregnado con aceite con distribución capacitiva provista de derivaciones para prueba y eventualmente de derivaciones de tensión.

Las boquillas e terciario y neutro pueden ser de papel impregnado en aceite o con resina, con o sin distribución capacitiva.

Los transformadores trifásicos deben estar provistos con tres bornes en el lado primario (M.T) y cuatro en el lado secundario (B.T), incluyendo el neutro accesible. Los bornes del primario estarán instalados sobre el tanque mientras que los bornes del secundario estarán instalados en el frontal de la cuba. Los terminales de M.T y de B.T deben estar designados mediante una marca o simbología fácilmente visible (ver figura 1.3).

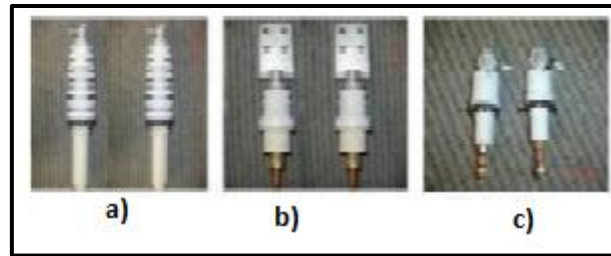


Figura 1.3 a) 15 y 25 kV Sujeción interna tuerca tipo araña
b) Boquilla con conector tipo espada c) Sujeción interna tuerca tipo araña.

Tanque o Cuba

De acuerdo a su diseño hay tanques lisos, con aletas, con ondulaciones y con radiadores, dependen del tipo de aceite y medio de refrigeración para su selección (ver figura 1.4).

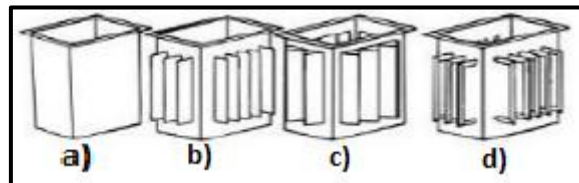


Figura 1.4 algunas formas contractivas de tanques
a) Tanque liso b) tanque con aletas c) tanque con ondulaciones d) tanque con radiadores

En general, consiste en una caja rectangular o cilíndrica. Para eliminar sobrepresiones el tanque deberá estar equipado con válvula de alivio de presión. El tanque ha de estar bien sellado, de manera que pueda soportar las presiones estáticas y dinámicas debidas a fallas. En el interior del tanque existirá una marca que indique el nivel de aceite máximo y mínimo de aceite nominal a 25°C. Se dispondrán dos tornillos para la conexión de puesta a tierra, uno del mismo tanque, y otro para conectar el borne secundario del neutro del tanque.

Se fabrica generalmente con planchas de fierro con espesores y refuerzos adecuado para las exigencias de servicio, manipulación y transporte. La tapa se fija al tanque mediante pernos y empaquetadura. La parte activa se suspende de la tapa y mediante orejas de izamiento, sobre la tapa, puede ser retirada del tanque. El diseño del tanque es de ejecución robusta, con hermeticidad comprobada, sometida a procesos de arenado y aplicación de



dos capas de pintura anticorrosiva y dos capas de pintura de acabado tipo epóxica.

1.4. Ensayos de cortocircuito y vacío

Es posible determinar experimentalmente los valores de las impedancias y resistencias en el modelo del transformador. Se puede obtener una aproximación adecuada de estos valores con únicamente dos pruebas: la prueba de circuito abierto y la prueba de cortocircuito.

1.4.1. Ensayos de vacío

En la prueba de circuito abierto se deja abierto el circuito del devanado secundario del transformador y su devanado primario se conecta a una línea de voltaje pleno. Obsérvese el circuito equivalente en la figura 1.1. En las condiciones descritas toda la corriente de entrada debe fluir a través de la rama de excitación hacia el transformador. Los elementos en serie R_P (resistencia del devanado primario) y X_P (inductancia del devanado primario) son demasiado pequeños en comparación con R_N (Resistencia de magnetización) y X_M (Inductancia de magnetización) como para causar una caída significativa de tensión, por lo que esencialmente toda la tensión de entrada cae a través de la rama de excitación. Las conexiones de la prueba de circuito abierto se muestran en la figura 1.3. Se aplica una línea de voltaje pleno al primario del transformador y se miden el voltaje de entrada, la corriente de entrada y la potencia de entrada al transformador. (Esta medición se hace normalmente en el lado de bajo voltaje del transformador, ya que los voltajes más bajos son más fáciles de trabajar.) Con esta información se puede determinar el factor de potencia de la corriente de entrada y, por lo tanto, la magnitud y el ángulo de la impedancia de excitación.[8]

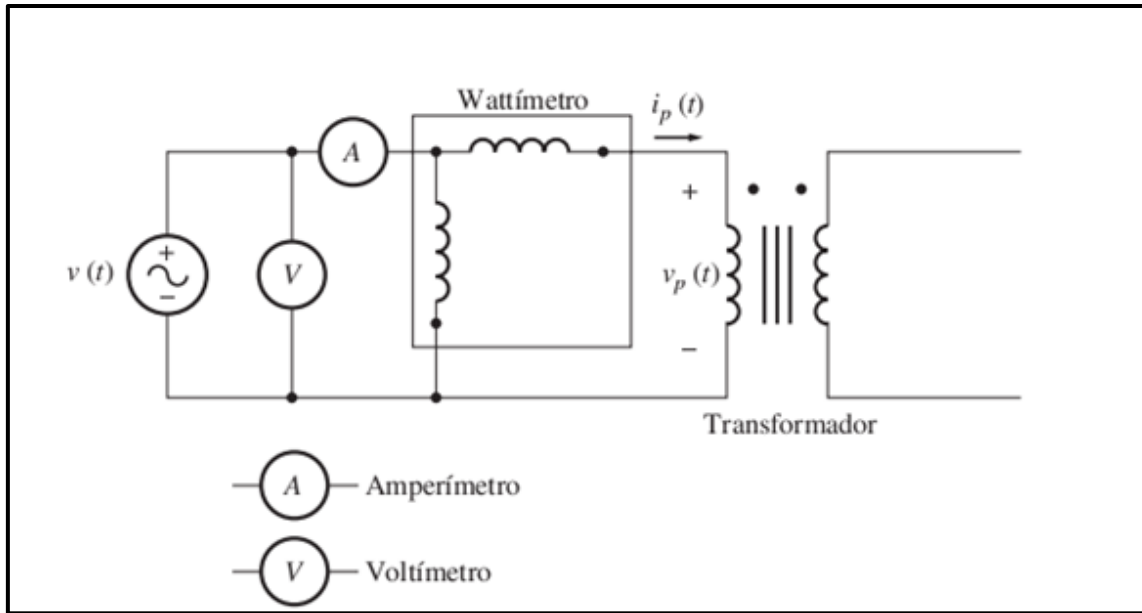


Figura 1.3 Conexión para la prueba de vacío del transformador.

La manera más fácil de calcular los valores de R_N y de X_M consiste en estimar primero la admitancia de la rama de excitación. La conductancia del resistor de pérdidas en el núcleo está dada por

$$G_N = \frac{1}{R_N} \quad (1.2)$$

Mientras que la susceptancia del inductor de magnetización está dada por

$$B_M = \frac{1}{X_M} \quad (1.3)$$

Puesto que los dos elementos están en paralelo, se suman sus admitancias y la admitancia de excitación total es

$$Y_E = G_N - jB_M \quad (1.4)$$

$$Y_E = \frac{1}{R_N} - j \frac{1}{X_M} \quad (1.5)$$

La magnitud de la admitancia de excitación (referida al lado del transformador usado para la medición) puede calcularse con base en el voltaje y corriente de la prueba de circuito abierto:

$$|Y_E| = \frac{I_{CAb}}{V_{CAb}} \quad (1.6)$$



El ángulo de admitancia se puede calcular con base en el factor de potencia del circuito. El factor de potencia (FP) del circuito abierto está dado por

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{CAb}}{V_{CAb} I_{CAb}} \quad (1.7)$$

y el ángulo θ del factor de potencia está dado por

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{CAb}}{V_{CAb} I_{CAb}} \quad (1.8)$$

El factor de potencia siempre está en retraso en un transformador real, por lo que el ángulo de la corriente siempre está en retraso con respecto al ángulo de tensión en θ grados. Por lo tanto, la admitancia Y_E es

$$Y_E = \frac{I_{CAb}}{V_{CAb}} \angle -\theta \quad (1.9)$$

$$Y_E = \frac{I_{CAb}}{V_{CAb}} \angle -\cos^{-1} FP \quad (1.10)$$

Comparando las ecuaciones (1-9) y (1-10) es posible determinar los valores de R_N y X_M directamente de los datos de la prueba de circuito abierto.

1.4.2. Ensayos de cortocircuito

En la prueba de cortocircuito se hace un cortocircuito en las terminales de bajo voltaje de un transformador y las terminales de alto voltaje se conectan a una fuente de voltaje variable, como se muestra en la figura 1.4. (Esta medición se realiza normalmente en el lado de alto voltaje del transformador, ya que las corrientes serán más bajas en aquel lado y las corrientes más bajas son más fáciles para trabajar.) Se ajusta el voltaje de entrada hasta que la corriente en los devanados en cortocircuito sea igual a su valor nominal. (Es necesario asegurarse de mantener el voltaje primario en un nivel seguro, pues no es una buena idea quemar los devanados del transformador en la prueba.) De nuevo se miden el voltaje, la corriente y la potencia de entrada.

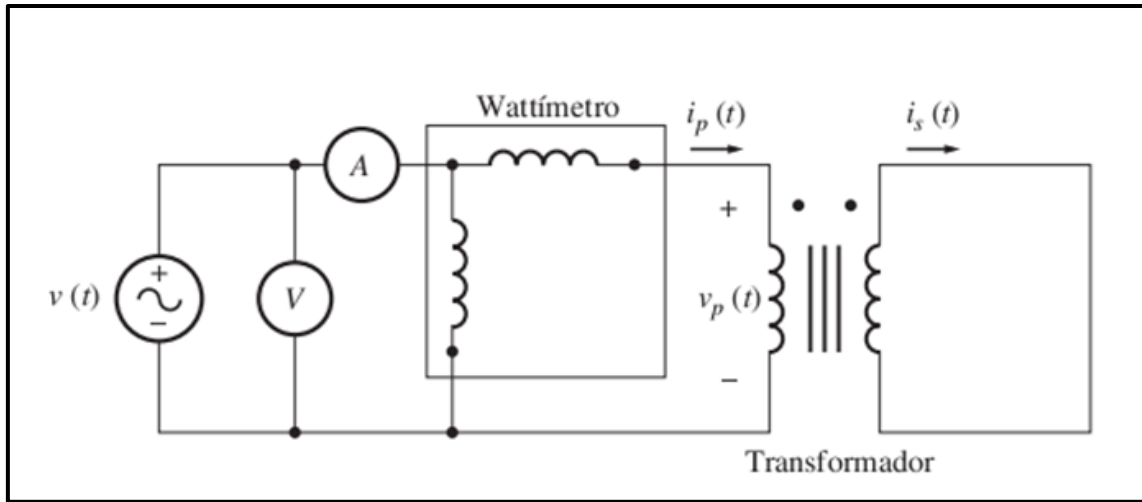


Figura 1.4 Conexión para la prueba de cortocircuito del transformador

Debido a que el voltaje de entrada es tan bajo durante la prueba de cortocircuito, la corriente que fluye por la rama de excitación es despreciable. Si se ignora la corriente de excitación, entonces toda la caída de voltaje en el transformador se puede atribuir a los elementos en serie en el circuito.

La magnitud de las impedancias en serie referidas al lado primario del transformador es

$$|Z_{SE}| = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (1.11)$$

El factor de potencia de la corriente está dado por

$$FP = \cos \theta = \frac{P_{CC}}{V_{CC} I_{CC}} \quad (1.12)$$

y está en retraso. Por lo tanto, el ángulo de corriente es negativo y el ángulo de impedancia total θ es positivo:

$$\theta = \cos^{-1} \frac{P_{CC}}{V_{CC} I_{CC}} \quad (1.13)$$

Por lo tanto,



$$Z_{SE} = \frac{V_{CC} \angle 0^\circ}{I_{CC} \angle -\theta^\circ} = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \angle \theta^\circ \quad (1.14)$$

La impedancia en serie Z_{SE} es igual a

$$Z_{SE} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (1.15)$$

$$Z_{SE} = (R_{eqp} + a^2 R_{eqs}) + j(X_{eqp} + a^2 X_{eqs}) \quad (1.16)$$

Donde R_{eqp} y R_{eqs} son las resistencias del primario y del secundario respectivamente y X_{eqp} y X_{eqs} son las impedancias del primario y el secundario respectivamente.

Se puede determinar la impedancia en serie total referida al lado de alto voltaje por medio de esta técnica, pero no hay una forma fácil de dividir la impedancia en serie en sus componentes primario y secundario. Por fortuna, no se requiere de esta separación para resolver los problemas normales.

Observe que la prueba de circuito abierto normalmente se realiza en el lado de bajo voltaje del transformador, y la prueba de cortocircuito por lo común se realiza en el lado de alto voltaje, de modo que R_N y X_M por lo general se encuentran referidos al lado de bajo voltaje y R_{eq} y X_{eq} por lo común se refieren al lado de alto voltaje. Todos los elementos se deben referir al mismo lado (ya sea alto o bajo) para crear el circuito equivalente final.

1.5. Tipos de conexión en bancos trifásicos

Un transformador trifásico consta de tres transformadores, ya sea separados o combinados sobre un solo núcleo. Los primarios y secundarios de cualquier transformador trifásico se pueden conectar independientemente en estrella (Y) o en delta (Δ). Esto nos da un total de cuatro conexiones posibles en el banco de un transformador trifásico:

1.5.1. Conexión estrella delta

En esta conexión ver figura 1.5, la tensión de línea del primario está relacionado con la tensión de fase del primario por la ecuación 1.17 mientras que la tensión de línea del secundario es igual a la tensión de fase del secundario como se expresa en la ecuación 1.18. La relación de tensión de



cada fase está dada por la división de ambas tensiones como se muestra en la ecuación (1.19)

$$V_{LP} = \sqrt{3}V_{\phi P} \quad (1.17)$$

$$V_{LS} = V_{\phi S} \quad (1.18)$$

$$\frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a \quad (1.19)$$

Por lo que la relación general entre la tensión de línea en el lado primario del banco y la tensión de línea en el lado secundario del banco es

$$\frac{V_{LP}}{V_{LP}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{V_{\phi S}} \quad (1.20)$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LP}} = \sqrt{3} \quad \mathbf{Y-\Delta} \quad (1.21)$$

La conexión Y- Δ no presenta problemas con los componentes en sus tensiones de la tercera armónica, puesto que se consumen en una corriente circulante en el lado Δ . Esta conexión también es más estable con respecto a las cargas desequilibradas, debido a que redistribuye parcialmente cualquier desequilibrio que se presente. Sin embargo, este arreglo presenta un problema. Debido a la conexión, la tensión del secundario se desplaza 30° con respecto a la tensión del primario del transformador. El hecho de que se desplace una fase puede causar problemas en la puesta en paralelo de los secundarios de dos bancos de transformadores. Los ángulos de fase de los transformadores secundarios deben ser iguales si se desea ponerlos en paralelo, lo que quiere decir que se tiene que poner atención a la dirección del desplazamiento de fase de 30° en cada banco del transformador para ponerlos en paralelo.

Por ejemplo en Estados Unidos se acostumbra que la tensión del secundario esté 30° en retraso con respecto a la tensión del primario. Aunque ésta es la norma no siempre se cumple y las instalaciones más viejas se deben revisar

cuidadosamente antes de poner un nuevo transformador en paralelo con ellas para asegurarse de que sus ángulos de fase concuerden.

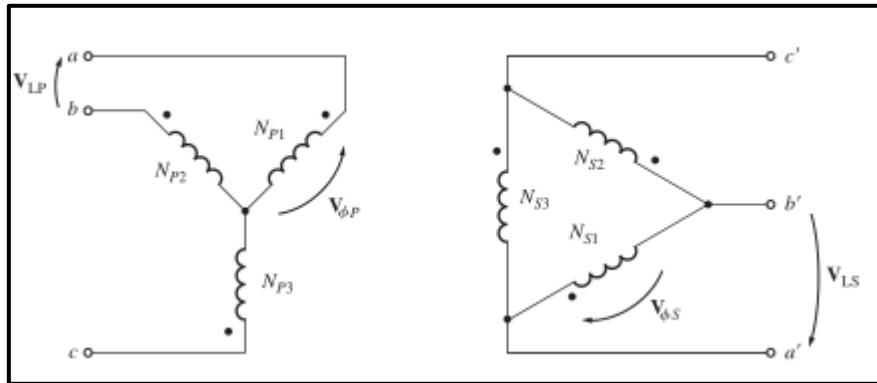


Figura 1.5 esquema de conexión Y-Δ de los transformadores trifásicos

1.5.2. Conexión delta-estrella

En la conexión Δ-Y ver figura 1.6 de un transformador trifásico, la tensión de línea del primario es igual a la tensión de fase del primario como se muestra en la ecuación 1.22, mientras que los voltajes secundarios están relacionados por la ecuación 1.23. Por lo tanto, la relación de voltaje de línea a línea en esta conexión está dada por la ecuación 1.24 y 1.25

$$V_{LP} = V_{\phi P} \quad (1.22)$$

$$V_{LS} = \sqrt{3} V_{\phi S} \quad (1.23)$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3} V_{\phi S}} \quad (1.24)$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (1.25)$$

Esta conexión tiene las mismas ventajas y el mismo desplazamiento de fase que el transformador Y-Δ. lo que ocasiona que la tensión del secundario esté, como anteriormente, en retraso de 30° con respecto a la tensión del primario.

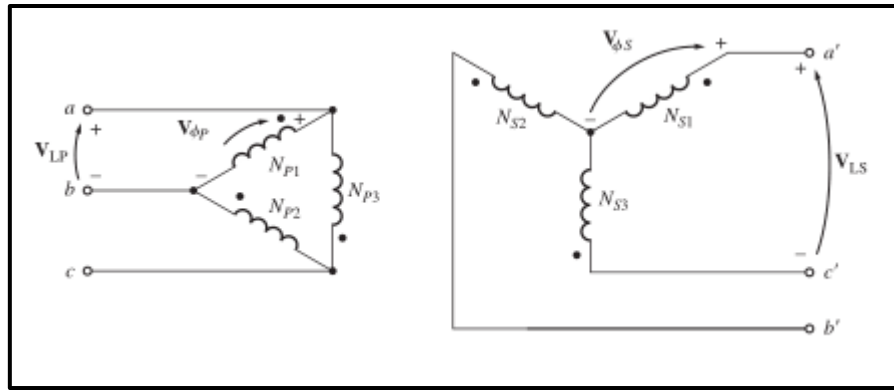


Figura 1.6 esquema de conexión Δ-Y de un transformador trifásico

1.5.3. Conexión estrella-estrella.

En una conexión Y-Y ver figura 1.7, la tensión del primario en cada fase del transformador está dado por la ecuación 1.26 La tensión de fase del primario se relaciona con la tensión de fase del secundario por medio de la relación de vueltas del transformador. La tensión de fase en el secundario está relacionada con la tensión de línea en el secundario por la ecuación 1.27. Por lo tanto, la relación de voltaje general en el transformador está dada por la ecuación 1.28

$$V_{\phi P} = \frac{V_{LP}}{\sqrt{3}} \quad (1.26)$$

$$V_{LS} = \sqrt{3}V_{\phi S} \quad (1.27)$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}} \quad \text{Y-Y} \quad (1.28)$$

La conexión Y-Y tiene dos problemas graves:

1. Si las cargas en el circuito del transformador no están equilibradas, entonces las tensiones en las fases del transformador pueden llegar a desequilibrarse severamente.
2. Las tensiones de terceras armónicas pueden ser grandes. Si se aplica un grupo trifásico de tensiones a un transformador Y-Y, las tensiones en cualquier fase estarán separadas por 120° de las tensiones en cualquier otra fase. Sin embargo, los componentes de la tercera armónica de cada una de las tres



fases estarán en fase entre sí, debido a que hay tres ciclos en la tercera armónica para cada ciclo de la frecuencia fundamental. Invariablemente habrá componentes de la tercera armónica en el transformador, debido a la no linealidad del núcleo. Estos componentes siempre se adicionan. El resultado es un componente de tensión de la tercera armónica muy grande, además de la tensión fundamental de 50 o 60 Hz. Esta tensión de la tercera armónica puede ser mayor que la tensión fundamental misma. Tanto el problema de desequilibrio de tensiones como el de la tercera armónica se pueden resolver utilizando una de las dos técnicas siguientes:

1. Conectando sólidamente a tierra los neutros de los transformadores, en especial el neutro del devanado primario. Esta conexión permite que los componentes aditivos de la tercera armónica causen un flujo de corriente en el neutro en lugar de acumular grandes tensiones. El neutro también suministra un camino de regreso para cualquier desequilibrio de corriente en la carga.

2. Añadir un tercer devanado (terciario) conectado en delta (Δ) al banco de transformadores. Si se añade al transformador un tercer devanado conectado en Δ , entonces los componentes de tensión de la tercera armónica en delta se sumarán y causarán un flujo de corriente circulante dentro del devanado. Esto suprime los componentes de tensión de la tercera armónica de la misma manera que hacer tierra con los neutros de los transformadores.

Los devanados terciarios conectados en Δ no necesitan ni siquiera sacarse de la caja del transformador, pero se usan con frecuencia para suministrar iluminación y potencia auxiliar dentro de la subestación donde está ubicado el transformador. Los devanados terciarios deben ser suficientemente grandes para manejar las corrientes circulantes, de modo que por lo regular se hacen para alrededor de un tercio de la potencia nominal de los dos devanados principales. Se debe utilizar una de las dos técnicas de corrección siempre que se instale un transformador

Y-Y. En la práctica se utilizan muy pocos transformadores Y-Y debido a que alguno de los otros tipos de transformadores trifásicos puede realizar las mismas funciones

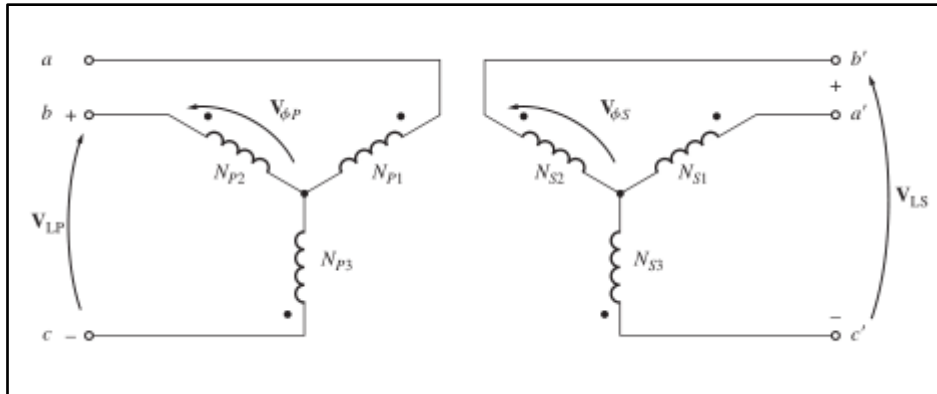


Figura 1-7 esquema de conexión Y-Y de transformadores trifásicos

1.5.4. Conexión delta-delta

En una conexión Δ - Δ , la tensión de línea es igual a la tensión de fase en cualquiera de los lados como se muestra en la ecuación 1.29 y 1.30, por lo que la relación entre los voltajes de línea primario y secundario está dada por la ecuación 1.31

$$V_{LS} = V_{\phi S} \quad (1.29)$$

$$V_{LP} = V_{\phi P} \quad (1.30)$$

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} \quad (1.31)$$

Este transformador no tiene un desplazamiento de fase asociado y no tiene problemas con cargas desequilibradas o armónicos.

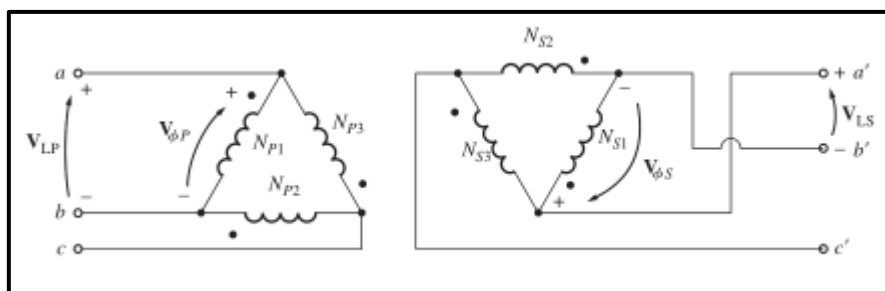


Figura 1.8 esquema de conexión Δ - Δ , de transformadores trifásicos



1.6. Tipos de Conexión con dos transformadores

Además de las conexiones trifásicas estándar, existen modos de llevar a cabo la transformación trifásica con sólo dos transformadores. Estas técnicas se emplean algunas veces para crear potencia trifásica en ubicaciones en las que no están disponibles las tres líneas de potencia. Por ejemplo, en áreas rurales, una compañía eléctrica a menudo tiende una o dos de las tres fases en una línea de distribución, debido a que las necesidades de potencia en el área no justifican el costo de tender los tres cables. Si hay un usuario aislado de potencia trifásica a lo largo de una ruta atendida por una línea de distribución con dos de las tres fases, se puede usar esta técnica para crear potencia trifásica para ese usuario en particular. Todas las técnicas que crean potencia trifásica con sólo dos transformadores involucran una reducción de la capacidad de manejo de potencia de los transformadores, pero se justifican en ciertas situaciones económicas.

Algunas de las conexiones más importantes con dos transformadores son:

1.6.1. Conexión Δ abierta (o V-V)

En ciertas situaciones no puede utilizarse un banco de transformadores completo para realizar una transformación trifásica. Por ejemplo, supóngase que un banco de transformadores Δ - Δ que consta de transformadores separados tiene una fase dañada que se debe retirar para su reparación ver figura 1.7. Si las dos tensiones secundarias que permanecen son la fase (A) y la fase (B) $V_A = V \angle 0^\circ$ y $V_B = V \angle -120^\circ$, entonces la tensión que pasa a través de la abertura que dejó el tercer transformador está dada por la siguiente expresión

$$\begin{aligned} V_C &= -V_A - V_B \\ &= -V \angle 0^\circ - V \angle -120^\circ \\ &= -V - (-0.5V - j0.866V) \\ &= -0.5V + j0.866V \\ &= V \angle 120^\circ \end{aligned}$$

Esta es la misma tensión que estaría presente si el tercer transformador siguiera ahí. A menudo, a la fase C se le llama fase fantasma. Entonces, la conexión delta abierta posibilita que un banco de transformadores siga

funcionando con sólo dos de sus transformadores, lo que permite que fluya cierta potencia aun cuando se haya removido una fase dañada.

¿Cuánta potencia aparente puede suministrar el banco si se retira uno de sus tres transformadores? En un principio, parece que podría suministrar tan sólo dos tercios de su potencia aparente nominal, debido a que sólo dos tercios de los transformadores están presentes. Sin embargo, no es tan sencillo. Es importante hacer notar los ángulos en los voltajes y corrientes en el banco de este transformador. Debido a que falta una de las fases del transformador, la corriente de línea de transmisión es igual a la corriente de fase en cada transformador y las corrientes y tensiones en el banco del transformador tienen un ángulo que difiere en 30° . Ya que los ángulos de la corriente y la tensión difieren en cada uno de los dos transformadores, es necesario examinar cada uno individualmente para determinar la potencia máxima que puede suministrar. La tensión del transformador 1 tiene un ángulo de 150° y la corriente tiene un ángulo de 120° .

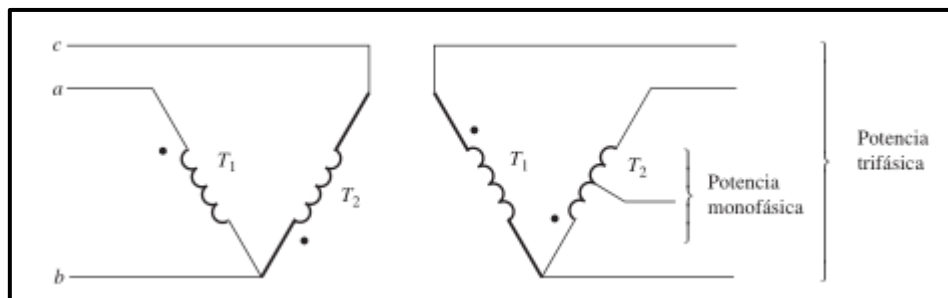


Figura 1.9 esquema de conexión Δ abierta.

1.6.2. Conexión Y abierta- Δ abierta.

La conexión Y abierta - Δ abierta es muy parecida a la conexión delta abierta excepto en que las tensiones primarias se derivan de dos fases y el neutro. Se utiliza para dar servicio a pequeños clientes comerciales que necesitan servicio trifásico en áreas rurales donde no están disponibles las tres fases. Con esta conexión un cliente puede obtener el servicio trifásico provisional hasta que la demanda haga necesaria la instalación de la tercera fase.

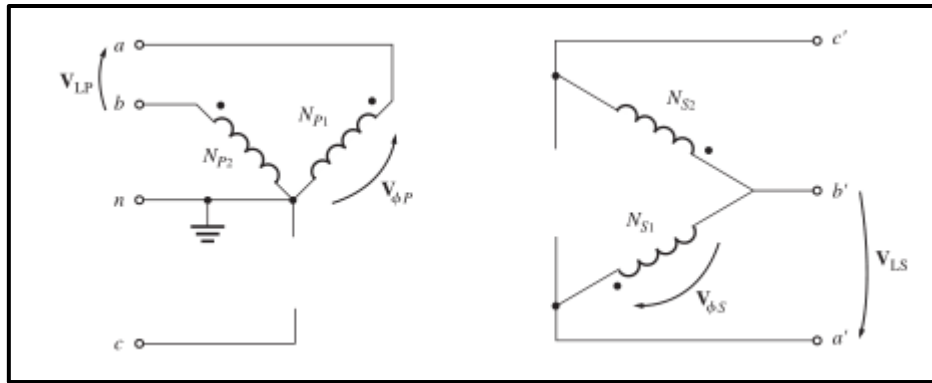


Figura 1.10 esquema de conexión Y abierta Δabierta

1.6.3. La conexión Scott-T

La conexión Scott-T es una manera de obtener dos fases separadas 90° a partir de un suministro de potencia trifásica. En los comienzos de la transmisión de potencia de CA los sistemas de potencia bifásicos y trifásicos eran muy comunes. En aquellos días era necesariamente rutinario conectar entre sí sistemas de potencia bifásicos y trifásicos. Con este propósito se desarrolló la conexión de transformador Scott-T. Hoy en día, la potencia bifásica está básicamente limitada a ciertas aplicaciones de control, pero aún se usa La Scott-T para producir la potencia necesaria para operarla. La conexión Scott-T consta de dos transformadores monofásicos con idéntica capacidad. Uno tiene una toma en su devanado primario a 86.6% de su tensión a plena carga. La toma de 86.6% del transformador T2 está conectada a la toma central del transformador T1. Debido a que estas tensiones se encuentran desfasadas 90° , ocasionan una salida bifásica. Esta conexión también permite convertir la potencia bifásica en potencia trifásica, pero debido a que hay muy pocos generadores bifásicos en uso, por lo común no se hace (ver figura 1.11).

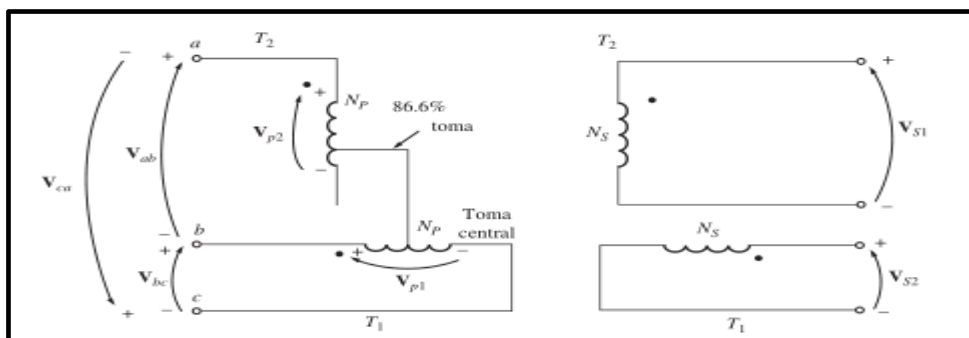


Figura 1.11 esquema de conexión Scott-T

1.6.4. La conexión T trifásica

La conexión Scott-T utiliza dos transformadores para convertir potencia trifásica en potencia bifásica con un nivel diferente de tensión. Mediante una sencilla modificación de esta conexión, los mismos dos transformadores pueden convertir potencia trifásica en potencia trifásica con otro nivel de tensión. En este caso, tanto el devanado primario como secundario del transformador T2 tienen una toma al 86.6% y las tomas están conectadas a las tomas centrales de los devanados correspondientes del transformador T1. En esta conexión, a T1 se le llama transformador principal y a T2 transformador de conexión en T (teaser transformer). Al igual que en la Scott-T, la tensión de entrada trifásica produce dos tensiones desfasadas 90° en los devanados primarios de los transformadores. Estas tensiones primarios producen tensiones secundarias que también están desfasadas 90° . A diferencia de la Scott-T, las tensiones secundarias se vuelven a combinar en una salida trifásica. Una de las mayores ventajas de la conexión T trifásica sobre las otras conexiones trifásicas de dos transformadores (la delta abierta y la estrella abierta-delta abierta) es que se puede conectar un neutro tanto al lado primario como al lado secundario del banco de transformadores. Esta conexión se utiliza en transformadores de distribución trifásicos autónomos, puesto que sus costos de producción son menores que los de un banco de transformadores trifásico completo. Debido a que las partes más bajas de los devanados del transformador de conexión en T no se usan ni en el lado primario ni en el lado secundario, se pueden omitir sin alterar el comportamiento de la conexión. De hecho, esto se hace con los transformadores de distribución.

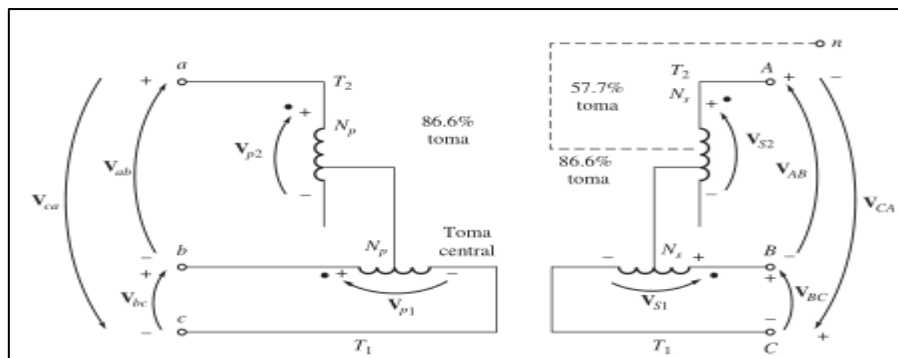


Figura 1.12 esquema de conexión T trifásica

1.7. Transformadores en paralelo

Exposición

Los transformadores se pueden conectar en paralelo (ver figura 1.13) para proporcionar corrientes de cargas mayores que la corriente nominal de cada transformador, cuando los transformadores se conectan en paralelo es necesario tener en cuenta las siguientes reglas:

1. Los derivadores que van a conectarse en paralelo deben tener el mismo valor nominal de tensión de salida.
2. Los devanados que se van a conectar en paralelo deben tener polaridades idénticas.

Si no se siguen estas reglas se pueden producir corrientes de cortocircuito excesivamente grandes. En efecto, los transformadores, los interruptores y los circuitos asociados pueden sufrir graves daños e incluso explotar, si las corrientes de cortocircuito alcanzan cierto nivel.

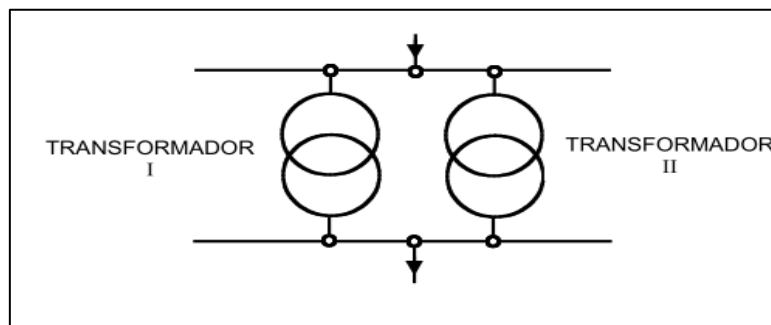


Figura 1.13 Esquema de conexión de dos transformadores en paralelo

De acuerdo a las definiciones usuales dos transformadores están en paralelo cuando están conectados a la misma red y alimentan la misma carga esta situación se muestra esquemáticamente en la figura 1.11.

La razón más común por la que se conectan transformadores en paralelo es el crecimiento de la carga, cuando esta supera la potencia del transformador instalado se suele optar por colocar otra unidad en paralelo con la existente.

Las combinaciones primario-secundario reunidas bajo el mismo grupo dan un ángulo igual entre la línea de uno y otro lado respectivamente, y pueden



acoplarse en paralelo sin más que unir entre si las terminales designadas con la misma inicial.

La conexión de transformadores en paralelo se hace necesaria debido a los incrementos de la demanda que superan la capacidad existente o cuando los requerimientos de confiabilidad y continuidad de operación lo exigen, este es el caso, que si un transformador falla, el otro continuará alimentando la carga sin interrupción.

Cuando la demanda de energía se reduce temporalmente, resulta más económico operar un transformador pequeño cerca de su límite de capacidad a plena carga que un transformador mayor a capacidad reducida. Por lo que, cuando la demanda energética es muy fluctuante resulta más provechoso la instalación de dos o más transformadores en paralelo que utilizar un transformador de gran capacidad. En estas condiciones el sistema es más flexible por que tiene la posibilidad de agregar una parte de los transformadores paralelo cuando sea necesario.

1.7.1. Condiciones para la puesta en paralelo

Para la conexión en paralelo de dos transformadores según el esquema de la figura 1-10, se debe cumplir condicione, que, en orden de importancias son:

1. Las tensiones secundarias deben estar en fase
2. Las relaciones de transformaciones deben ser iguales.
3. Las tensiones de cortocircuito deben ser iguales.
4. Las impedancias de cortocircuito deben tener el mismo ángulo de fase.

La primera de las condiciones enunciadas si no se cumple, no se puede hacer el paralelo, porque se produciría un cortocircuito; las demás admiten diferencias; la segunda muy pequeña y la cuarta es muy poco importante.

La primera condición tiene que ver con la forma en que se deben conectar los transformadores, mientras que las restantes determinan el comportamiento de los transformadores ya conectados en paralelo.

Si bien no es una condición necesaria, las potencias de los transformadores deben ser próximas entre sí; 2 ó 3 a 1 como máximo, si hay mucha diferencia



entre las potencias, salvo en algún caso en especial, seguramente no resultara económico hacer el paralelo especialmente se hay diferencias, aunque leves, entre las tenciones de cortocircuito

La eficiencia de cualquier maquina o dispositivo eléctrico se determina, usando la relación de la potencia de salida a la potencia de entrada. (La potencia reactiva y la potencia aparente no se utilizan para calcular la eficiencia de los transformadores). La ecuación de la eficiencia en por ciento es:

$$\%de\ eficiencia = \frac{Potencia\ real\ de\ salida}{Potencia\ real\ de\ entrada} \cdot 100$$

1.8. Conclusiones Parciales

1. Se realizó una búsqueda bibliográfica sobre las temáticas relacionadas con el tema.
2. Se describieron cada una de las conexiones y sus características fundamentales, así como sus ventajas y desventajas.
3. Se describieron los ensayos de cortocircuito y vacío.

Capítulo 2 Materiales y Métodos

2.1 Introducción

En el presente capítulo se describe en bloques el banco de pruebas para el trabajo de laboratorio con transformadores eléctricos, los cálculos que se deben de efectuar en cada uno de los bloques considerando las características que deben de estar presentes para entregar la energía de una forma más segura, se tiene en cuenta una serie de parámetros para disminuir la peligrosidad a la que se someterán los estudiantes así como la metodología de trabajo en este para cada ensayo y las medidas a tomar por parte de los profesores a la hora de impartir cada una de estas prácticas de laboratorio.

2.2 Diagrama en bloque del circuito realizado

En la figura 2.1 se puede apreciar un diagrama en bloques de las partes principales que componen banco de pruebas para el trabajo de laboratorio con transformadores eléctricos donde seguidamente se da una explicación detallada de cada uno.

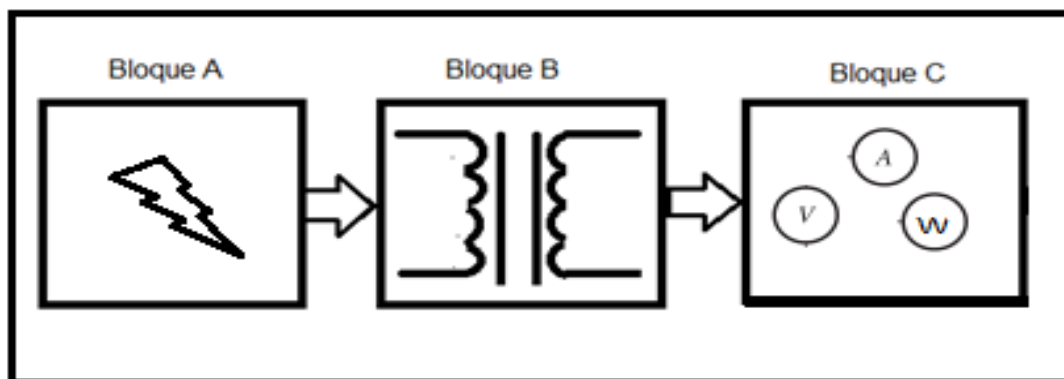


Figura 2.1 Diagrama en bloques del banco de pruebas para el trabajo de laboratorio con transformadores eléctricos.

2.2.1 Bloque A

Sistema de alimentación y seguridad. Está compuesto por los conductores, por tres drop out de polímero de 18kV y 50 A y tres pararrayos de 18.5 kV cada uno. Es la parte encargada de suministrar la energía al banco de pruebas a través de una red trifásica de 220V y frecuencia 60Hz.

2.2.3 Bloque B

Banco de transformadores es la parte principal, tienen como función principal la reducción de la tensión alterna de entrada a un nivel deseado de alterna a la



salida y son el objeto de las mediciones, para esto fueron escogidos tres transformadores de fabricación rusa con una potencia 63VA para obtener una tensión a la salida de 12 volts a una corriente máxima de 5.25 Amperes, con el objetivo de proporcionar una intensidad de corriente menor buscando que esta sea lo más segura posible en la parte más interactiva del banco de trabajo.

2.2.4 Bloque C

Está compuesto por los instrumentos de medición y los componentes suplementarios para la realización de cada uno de los ensayos. Es la parte donde se realizan y visualizan las mediciones.

2.3 Materiales y métodos utilizados

Para realizar el diseño y construcción del banco de pruebas para el trabajo de laboratorio de transformadores se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

2.3.1 Habilidades a adquirir por los estudiantes:

Se realizó un estudio del programa analítico de la asignatura, determinándose el conjunto de habilidades prácticas que deben obtener los estudiantes. Las mismas son:

- ❖ Determinar teórica y experimentalmente los parámetros y características operativas de los transformadores.
- ❖ Conectar transformadores monofásicos en bancos monofásicos y trifásicos, así como los transformadores trifásicos.
- ❖ Evaluar la operación de los transformadores monofásicos y trifásicos en diferentes regímenes de operación, con vistas a su explotación eficiente.
- ❖ Identificar y diferenciar las características constructivas y datos de chapa de los transformadores.

2.3.2 Procedimientos

Procedimientos de ensayos reflejados en las normas internacionales tales como IEC 60076 e IEEE C57. [9, 11, 18-20] En general estas normas plantean la realización de los siguientes ensayos, los cuales están relacionados con las habilidades a adquirir por los estudiantes:



- Medición de resistencias de los devanados, determinación de la temperatura “en frío”, corrección de las resistencias medidas a otras temperaturas y métodos de medición de las resistencias.
- Pruebas de polaridad y relación de fases, prueba de polaridad en transformadores monofásicos y pruebas de polaridad y relación de fases en transformadores polifásicos.
- Prueba de relación de transformación.
- Ensayo de vacío, ensayo de pérdidas de vacío en transformadores monofásicos, métodos de ensayos para transformadores trifásicos y medición de la corriente de excitación (vacío).
- Medición de las pérdidas de carga y el voltaje de impedancia.
- Ensayo de cortocircuito, ensayo para analizar el comportamiento de un transformador a plena carga, así como medición de la temperatura ambiente y medición del incremento de temperatura promedio en los devanados.

2.3.3 Recursos con que se cuenta para la construcción del banco de transformadores

Ante la dificultad de adquirir los equipos y accesorios en el mercado, se adecuó el diseño al equipamiento existente en la universidad. Estos son tres transformadores 220/12V, dos voltímetros analógicos de hasta 250V AC, dos amperímetros analógicos de hasta 1.5A AC y dos watímetros digitales.

2.3.4 Normas de seguridad

Las medidas de seguridad implantadas deberán ser cumplidas durante el desarrollo de las prácticas, para de esta forma lograr la protección del personal y del equipamiento utilizado. Todo material accesorio o equipo que se utilice debe estar en buen estado.

2.3.5 Tensiones de trabajo de los transformadores

Las mismas serán de CA trifásicas y monofásicas de 220V, 110V, 12V y tensiones variables para los ensayos de vacío y cortocircuito.

2.4 Metodología

Se realizó el diseño y construcción de un puesto de trabajo para la realización de los siguientes ensayos:



2.4.1 Ensayo 1 Conexiones de transformadores

En este puesto de trabajo se pueden realizar los tipos de conexiones de los bancos de transformadores en diferentes regímenes de funcionamiento. El puesto cuenta con 3 transformadores monofásicos de 220/12 V. El devanado primario se conecta en (Y ó Δ) y en el caso de los secundarios en (Y ó Δ). Esto permite realizar todas las variantes posibles de conexión de los bancos de transformadores. Además, se realiza la interpretación de los datos de chapa de los transformadores y la identificación de sus elementos constructivos. Ver esquema de conexionado en el **Anexos**

Anexo 1

Conexión de transformadores en paralelo

En este ensayo se determina el grupo de conexión de los transformadores monofásicos empleados, sus voltajes nominales primarios y secundarios y los componentes activos e inductivos de su impedancia de cortocircuito. Esto se hace con el objetivo de comprobar cuáles de los transformadores empleados tienen similares características, para luego proceder a conectarlos en paralelo y analizar el comportamiento de los mismos. Ver esquema de conexionado en el **Anexos**

Anexo 1

Para la realización de esta práctica se siguen los siguientes pasos.

- 4) Conecte el circuito que aparece en la figura xx utilizando los instrumentos de medición del banco de pruebas. Los devanados primarios (1 a 2) se conectan a la red de alimentación 220V CA. El Watímetro indicará la potencia de entrada. Cada devanado secundario (3 a 4) se conectará en paralelo con la carga RL. Los amperímetros se conectan para medir la corriente de carga I_L y las corrientes de los secundarios de los transformadores
- 5) Ponga todos los interruptores de resistencia en la posición “abierto” para tener una corriente de carga igual a cero. Observe



que los devanados se conectan para funcionar como transformador reductor 220/12V

- 6) Antes de seguir con la práctica pídale al profesor que revise el circuito y de su aprobación.
- 7) Conecte la alimentación y observe las mediciones de corriente de los secundarios I1 e I2, así como la medición de corriente de carga IL. Si los devanados están debidamente faseados, no habrá ninguna corriente de carga, ni corrientes en los secundarios.
- 8) .a) Aumente gradualmente la carga RL, hasta que la corriente de carga IL sea igual a 500mA. Revise el circuito para comprobar que la tensión de entrada sea estable.
b) Mida y anote los valores de tensión de carga, la corriente en los secundarios de los transformadores y la potencia de entrada.
c) Desconecte la alimentación
- 9) a) Calcule la potencia en la carga utilizando los valores obtenidos.

$$P = V \cdot I \quad (1.32)$$

Donde P es la potencia, V la tensión nominal en el secundario e I la corriente nominal en el secundario

- b) Calcule la eficiencia del circuito

$$\frac{P_{salida}}{P_{entrada}} \cdot 100\% \quad (1.33)$$

- c) Calcule las pérdidas del transformador.

$$P_{salida} - P_{entrada} = P_{perdidas} \quad (1.34)$$

- d) Calcule la potencia entregada por el transformador 1

$$P = V_{T1} \cdot I_{T1} \quad (1.35)$$

- e) Calcule la potencia entregada por el transformador 2

$$P = V_{T2} \cdot I_{T2} \quad (1.36)$$

Ensayos al transformador



En este puesto de trabajo se realizan los ensayos de vacío y cortocircuito con el objetivo de determinar los parámetros del circuito equivalente del transformador, así como la relación de transformación, la impedancia de cortocircuito, la regulación de tensión y la eficiencia, además se realiza el ensayo con carga del transformador monofásico por el método del “back to back”.

Para estos ensayos se cuenta con, un amperímetro, un watímetro y un voltímetro los cuales se conectan a uno de los transformadores del banco de pruebas según el tipo de prueba específica que se vaya a realizar.

2.4.2 Ensayo 2.- Pruebas en vacío

En este ensayo se analiza el comportamiento del transformador en vacío, así como la forma de onda de las tensiones de fase de dicho banco. Se colocaron además los bornes que señalizan las fases de la CA trifásica y el del neutro sobre un tablero ubicado en el puesto de trabajo, todos energizados mediante un breaker.

En la prueba de vacío, se deja abierto el devanado secundario del transformador y el devanado primario se conecta al voltaje pleno nominal. En el devanado primario o de alta del transformador se conecta es amperímetro en serie con el transformador, el voltímetro en paralelo y el watímetro de la forma específica según el tipo de potencia a medir sea reactiva o activa. (Ver esquema de conexiónado en el Anexo II. En las condiciones descritas, toda la corriente de entrada debe fluir a través de la rama de excitación del transformador. Las componentes en serie R_1 y X_1 , son tan pequeñas, comparadas con R_{fe} y X_M , (ver figura 1.1) para ocasionar una caída significativa del voltaje que, esencialmente, todo el voltaje de entrada cae a través de la rama de excitación. Con esta información es posible determinar el factor de potencia, la magnitud y el ángulo de la impedancia de excitación

Expresiones fundamentales para la realización de los cálculos en esta práctica:

$$Z_{oc} = R_{eq} + jX_{eq} + Z_{\emptyset} = R_{eq} + jX_{eq} + \frac{R_{eq}(jX_m)}{R_{eq} + jX_m} \quad (2.1)$$

$$R_{oc} = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}} \quad (2.2)$$

$$|Z_{oc}| = \frac{V_{oc}}{P_{oc}} \quad (2.3)$$

$$PF = \cos \theta = \frac{P_{oc}}{V_{oc} \cdot I_{oc}} \quad (2.4)$$

El factor de potencia durante la prueba de circuito abierto es

$$PF = \cos \theta = \frac{P_{oc}}{V_{oc} \cdot I_{oc}} \quad (2.5)$$

La admitancia de excitación está dada por

$$Y_E = \frac{I_{OC}}{V_{OC}} \angle -\cos^{-1} PF \quad (2.6)$$
$$= \frac{1}{R_{OC}} - j \frac{1}{X_M}$$

Los valores de V_{OC} , I_{OC} y P_{OC} , se obtienen de los datos de chapa del transformador que se someterá al ensayo

Ensayo 3.- Pruebas de cortocircuito

En la prueba de cortocircuito los terminales del secundario del transformador se cortocircuitan y los del primario se conectan a una fuente adecuada de voltaje (Ver esquema de conexión en el Anexo 1). El voltaje de entrada se ajusta hasta que la corriente de los devanados cortocircuitados sea igual a su valor nominal (asegurarse de mantener el voltaje primario en un nivel seguro. No es buena idea quemar los devanados del transformador mientras se intenta el ensayo). De nuevo, se miden el voltaje, la corriente y la potencia de entrada. Puesto que el voltaje de entrada es tan pequeño durante la prueba, la corriente que fluye por la rama de excitación es despreciable. Si la corriente de excitación se ignora, toda la caída de voltaje en el transformador puede ser atribuida a los elementos del circuito en serie.



La magnitud de las impedancias en serie

$$Z_{sc} \approx R_{eq} = jX_{eq} + R_{eqs} + jX_{eqs} = R_{eq} + jX_{eq} \quad (2.7)$$

$$Z_{sc} = \frac{V_{sc} \angle 0^\circ}{I_{sc} \angle -\theta^\circ} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle \theta^\circ \quad (2.8)$$

$$R_{eq} = R_{sc} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (2.9)$$

$$X_{eq} = X_{sc} = \sqrt{|Z_{sc}|^2 - R_{sc}^2} \quad (2.10)$$

El factor de potencia durante la prueba de cortocircuito es

$$PF = \cos \theta = \frac{P_{oc}}{V_{sc} \cdot I_{sc}} \quad (2.11)$$

La impedancia serie está dada por

$$Z_E = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle \cos^{-1} PF \quad (2.12)$$

Los datos de las variables se obtienen de los datos de chapa del transformador que se somete al ensayo.

2.4.4 Ensayo 4.- Transformador trifásico con carga

En este ensayo se analiza el comportamiento del transformador trifásico en régimen asimétrico y se realizarán sus distintas conexiones para verificar los voltajes de cada fase.

En esta prueba se realizan las diferentes conexiones del banco de transformadores y se le varía la carga conectada utilizando resistencias variables u otra carga que se adecuen a los parámetros del transformador, luego se procede a medir los voltajes en las fases y se comparan las mediciones con cada carga con el objetivo de comprender como se comporta un banco de transformadores cuando se le aplican cargas asimétricas o desbalanceadas.



2.4.5 Ensayo 6.- Ensayo de calentamiento

En este ensayo se realiza el ensayo de calentamiento a un transformador monofásico de 63 VA, 220 V/ 12 V, se determina la resistencia del devanado primario a la temperatura ambiente y se miden los incrementos de temperatura en el devanado. Se emplea el método de ensayo de la prueba de cortocircuito. (Figura 1.1)

En todos los casos para realizar las mediciones se utilizan los instrumentos anteriormente mencionados mediante los bornes colocados en la parte superior del banco de pruebas.

2.5 Conclusiones

1. Se realizó el diseño de las prácticas de laboratorio a realizar en el puesto de trabajo.
2. Se describieron los ensayos que se pueden realizar a los transformadores utilizando el puesto de trabajo.
3. Los ensayos realizados en las prácticas de laboratorio cumplen con los estándares de la asignatura de Transformadores.

Capítulo 3. Resultados y valoración técnica-ecológica-social

3.1 Introducción

En el presente capítulo se expondrán satisfactoriamente los resultados obtenidos del capítulo anterior con respecto a la parte práctica de este trabajo de diploma, además de una valoración técnica y medioambiental a partir del impacto técnico y docente que presenta el puesto de trabajo propuesto.

3.2 Análisis de los resultados obtenidos

El diseño del banco de pruebas cumple con los requisitos de este tipo de puestos de laboratorio, por su forma de construcción permite realizar prácticas reales de ensayos a transformadores y concesión de estos en todas sus variantes con fines. [25, 26]

Se construyeron los bloques propuestos en este trabajo representados en las imágenes que se muestran a continuación.

Bloque B está compuesto por tres transformadores colocados en el interior de las cubas de transformadores de distribución de 10 kVA



Figura 3.1 Transformadores utilizados en el Bloque B

Bloque C este está compuesto por 2 voltímetros, 2 amperímetros, 2 watímetros, un autotransformador, un breaker y un autotransformador

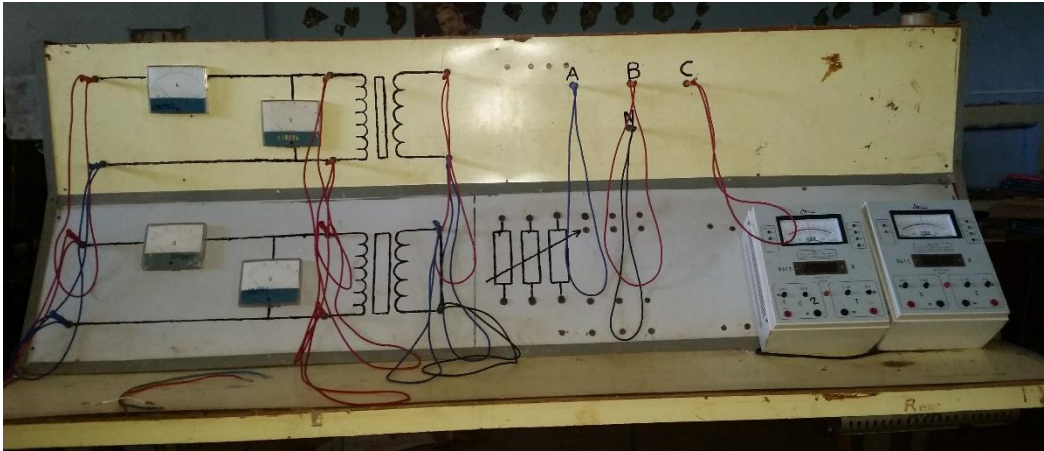


Figura 3.2 Instrumentos de medición utilizados en los ensayos



Figura 3.3 autotransformador utilizado en la contrucción del banco de pruebas

3.3 Análisis técnico de funcionamiento del sistema

Al medio de enseñanza construido se le incorporo puntos de medición con el objetivo de que los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica puedan interactuar y realizar una serie de mediciones, las imágenes que se muestran a continuación pueden servir de patrón para revisar funcionamiento correcto del banco de pruebas para el trabajo de laboratorio con transformadores eléctricos a través de los instrumentos de medición del puesto de trabajo y visualizando los valores de frecuencia, corriente, potencia y de tensión auxiliándose de un multímetro profesional.



Mediante las mediciones realizadas obtuvimos diferentes valores de las magnitudes representadas en las Figuras que se muestran a continuación.

3.4 Aplicación docente del medio de enseñanza

El banco de transformadores con fines docentes está previsto para que apoye como base material de estudio en la asignatura de transformadores eléctricos.

3.5 Valoración ecológica y social.

Realizando una valoración ecológica y medioambiental de las consecuencias perjudiciales que pudiera traer el banco de pruebas construido, podemos decir que este no introduce tóxicos al medioambiente ni produce ruidos de acuerdo a que su frecuencia de trabajo se encuentra en un rango estable, como tampoco introduce interferencias en sistemas de comunicación, no tiene un impacto visualmente negativo, además se encuentra ubicado dentro del laboratorio de máquinas eléctricas del ISMM.

Por otra parte, la formación profesional en la disciplina de transformadores eléctricos cuenta con un medio de enseñanza que permite realizar disímiles prácticas de laboratorio que anteriormente no existía. Este trabajo permite al profesor o técnico de laboratorio explicar una materia compleja por medio de un recurso didáctico de fácil asimilación por el estudiante, al cual le permite realizar prácticas docente e investigaciones.

3.6 Instrucciones de operación y de mantenimiento

Para lograr una mejor explotación del diseño se hizo necesario crear un Manual de Operación y Mantenimiento, que permite guiar al usuario en caso de alguna falla o algún cambio que sea necesario realizar en el mismo y poder solucionar de forma rápida el problema.

3.6.1 Instrucciones operación

Si el puesto del laboratorio presenta defecto en su funcionamiento se podrá revisar lo siguiente:

- Compruebe que la alimentación de entrada tenga un valor de 220 VCA.
- Si no encienden las luces de atención revise las conexiones del banco.



- Si en algunos de los puntos de medición no aparece los valores que podrá comparar con valores de las magnitudes que se muestran en las imágenes de este capítulo revise que estos no tengan oxido o suciedad.

3.6.2 Instrucciones de mantenimiento

El mantenimiento juega un papel importante, ya que contamos con condiciones ambientales desfavorables, proporcionándole menor durabilidad a los elementos que lo conforman, para lo cual se creó un sistema de mantenimiento dividido por etapas:

- Primera etapa: se realizará cada tres meses y será un mantenimiento de limpieza con brocha o aspiradora, sobre los elementos de conexión l banco
- Segunda etapa: se realizara cada seis meses el cual consiste en realizar una limpieza más profunda sobre todos los elementos del banco como los contactos, aplicando alcohol u otros productos utilizados para este tipo de mantenimiento, ajuste de los terminales y lubricación contra la corrosión .
- Tercera etapa: Este mantenimiento será realizado cada un año el cual consiste en la comprobación y medición de los parámetros de cada uno de los elementos que componen el esquema y ajuste o sustitución en caso de avería.

3.7. Conclusiones

- Se diseñó y fabricó una aplicación práctica para la asignatura de transformadores eléctricos en el laboratorio de Máquinas Eléctricas.
- Se crearon varios puntos de mediciones los que posibilitan que los estudiantes realicen los experimentos orientados y que de esta forma comprendan mejor el funcionamiento de cada uno de los bloques funcionales de un banco de pruebas para transformadores eléctricos.



Conclusiones Generales.

1. Se realizó el diseño de las siguientes prácticas de laboratorio:
 - + Conexiones del transformador.
 - + Ensayos al transformador.
 - + Operación en vacío.
 - + Operación en cortocircuito
 - + Operación con carga.
 - + Operación con carga asimétrica.
 - + Operación en paralelo.
 - + Ensayo de calentamiento.
2. El sistema de laboratorios propuesto permite la adquisición de habilidades de la asignatura Transformadores por parte de los estudiantes.
3. El puesto de trabajo permite la implementación de un sistema de prácticas de laboratorio de forma cíclica, logrando de esta forma la disminución del número de estudiantes por puestos de trabajo.
4. Se elaboraron los folletos para la realización de las prácticas de laboratorio de la asignatura Transformadores los cuales están detallados en los anexos.



Recomendaciones

- Realizar prácticas de laboratorio de las asignaturas de Transformadores, Electrotecnia Básica y Electricidad Aplicada a la Ingeniería Mecánica ajustadas a las posibilidades que brinda el medio de enseñanza del laboratorio.
- Estudiar la posibilidad de integrar otras pruebas o ensayos no empleados en el medio de enseñanza y la automatización del mismo.



Bibliografías

1. Mora, J.F., *Maquinas Eléctricas*. (5ta edición), 2003.
2. Ponce, M., *Cómo enseñar mejor: técnicas de asesoramiento para docentes* (3a. ed.). 2011.
3. Bentounsi, A., Djeghloud, H., Benalla, H., Birem, T., & Amiar, H, *Computer-aided teaching using matlab/simulink for enhancing an im course with laboratory tests*. 2011.
4. Chin, Y., *Development of educational platform for experiments of electric machines*.
Mathematical Problems in Engineering. 2014.
5. Martinez-Roman, J., Perez-Cruz, J., Pineda-Sanchez, M., Puche-Panadero, R., Roger-Folch, J., and M. Riera-Guasp, & Sapena-Baño, A. , *Electrical machines laminations magnetic*. 2015.
integration into undergraduate electric machinery courses. IEEE Trans. Education, 2005.
6. Roman, L comportamiento de transformador con carga, 2009
7. Ayasun, S., & Nwankpa, C. , *Induction motor tests using matlab/simulink and their integration into undergraduate electric machinery courses*. 2005.
8. Chapman, S.J., *MÁQUINAS ELÉCTRICAS*. Quinta edición, 2015. **1**.
9. IEEE, *Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating* 2007.
10. Koochaki, A., *Teaching calculation of transformer equivalent circuit parameters using matlab/simulink for undergraduate electric machinery courses*. 2015.
11. IEC, *Transformadores de potencia*. 2000.
12. Hernández, N, Trabajo de diploma en opcion del Titulode ingeniero electrico, 2001.
13. Lorenzo, *Tesis en opcion del titulo de ingeniero*. 2004.
14. José E Montejo Sivilla, E.d.I.R.M., Alfredo Hernández Rosales, Pablo Reyes Fernández y el Alfredo Carbonell Mendoza *construcción de un sistema de puestos de trabajos para la realización de ensayos y pruebas de laboratorio de la asignatura trasformadores electricos*.
15. Vergara, A.G., *proyecto de fin de curso de la carrera Ingeniería Técnica Industrial*. 2009.
16. Jose. Miguel. Díaz Chacón, C.A.H., Victor. Mata Brauer y Arnaldo. Navarro Valle *Uso de un módulo didáctico de transformadores eléctricos en la enseñanza de la asignatura de Máquinas de Inducción*
17. Rubaai, A., *Computer aided instruction of power transformer design in the undergraduate power engineering class*. 1994.
18. IEC, *Transformadores de potencia*. 1999.
19. IEC, *Transformadores de potencia*. 1993.
20. IEC, *Transformadores de potencia*. 1997.



21. Jewell, W.T., *Transformer design in the undergraduate power engineering laboratory*. 1990.
22. Jewell, W.T., *Transformer design in the undergraduate power engineering laboratory*. 1990.
23. 8412, R.I.d.P.A.y.G.E.I.-. and P. 04, Enero – Junio 2016 PAG.
24. Fitzgerald, 2004.
25. George McPherson, R.D.L., *An introduction to electrical machines and transformers*. 1998.
26. Feito, J.S., *Máquinas Eléctricas*. . Dpto de Ingeniería Eléctrica, Universidad Carlos III de Madrid., 2002.



Anexos

Anexo 1

Folletos para la realización de las prácticas de laboratorio de la asignatura Transformadores.

Conexiones del transformador

En este puesto de trabajo se pueden realizar los tipos de conexiones de los bancos de transformadores en diferentes regímenes de funcionamiento. El puesto cuenta con 3 transformadores monofásicos de 220/12 V. El devanado primario se conecta en (Y ó Δ) y en el caso de los secundarios en (Y ó Δ), serie o paralelo. Esto permite realizar todas las variantes posibles de conexión de los bancos de transformadores. Además, se realiza la interpretación de los datos de chapa de los transformadores y la identificación de sus elementos constructivos.

Pasos para la realización de esta práctica

1. Comprobar que el puesto de trabajo no este energizado.
2. Verificar que los transformadores así como todos los elementos del puesto de trabajo están desconectados
3. Elegir que estudiante va a realizar la conexión (pueden ser de 2 a 4 estudiantes)

En esta práctica de laboratorio se realizarán conexiones a transformadores monofásicos en bancos trifásicos, las conexiones que se realizarán son:

Tipos de conexión en bancos trifásicos

Un transformador trifásico consta de tres transformadores, ya sea separados o combinados sobre un solo núcleo. Los primarios y secundarios de cualquier transformador trifásico se pueden conectar independientemente en estrella (Y) o en delta (Δ). Esto nos da un total de cuatro conexiones posibles en el banco de un transformador trifásico:

Conexión estrella delta

En esta conexión, la tensión de línea del primario está relacionado con la tensión de fase del primario por la ecuación siguiente $V_{LP} = \sqrt{3V_{\phi P}}$ mientras



que la tensión de línea del secundario es igual a la tensión de fase del secundario como se expresa en la ecuación $V_{LS} = V_{\phi S}$. La relación de tensión de cada fase está dada por la división de ambas tensiones como se muestra en la siguiente ecuación $\frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} = a$. Por lo que la relación general entre la tensión de línea en el lado primario del banco y la tensión de línea en el lado secundario del banco es $\frac{V_{LP}}{V_{LP}} = \frac{\sqrt{3}V_{\phi P}}{V_{\phi S}} \frac{V_{LP}}{V_{LP}} = \sqrt{3} \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}}$ Y-Δ

La conexión se muestra en la siguiente figura

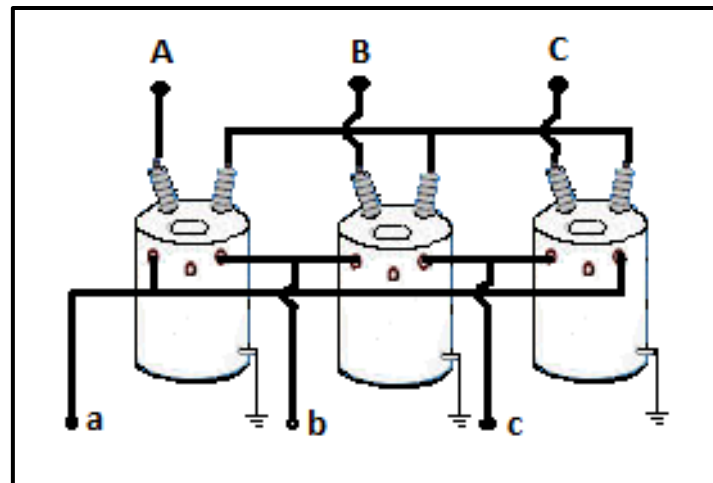


Figura 1 conexión estrella delta

El objetivo de esta práctica es comprobar de manera experimental que se cumplen estas teorías antes mencionadas midiendo las magnitudes antes referidas con los instrumentos de medición con que cuenta el puesto de trabajo, realizando los cálculos introduciendo estos datos en las variables de la ecuación y luego comprobar si se cumple que el resultado matemático y la medición sean iguales

Conexión delta-estrella

En la conexión Δ-Y de un transformador trifásico, la tensión de línea del primario es igual a la tensión de fase del primario como se muestra en la ecuación $V_{LP} = V_{\phi P}$, mientras que los voltajes secundarios están relacionados por



la ecuación $V_{LS} = \sqrt{3V_{\phi S}}$. Por lo tanto, la relación de voltaje de línea a línea en

esta conexión está dada por la ecuaciones $\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{\sqrt{3}V_{\phi S}}$ y $\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$

La conexión se muestra en el siguiente diagrama

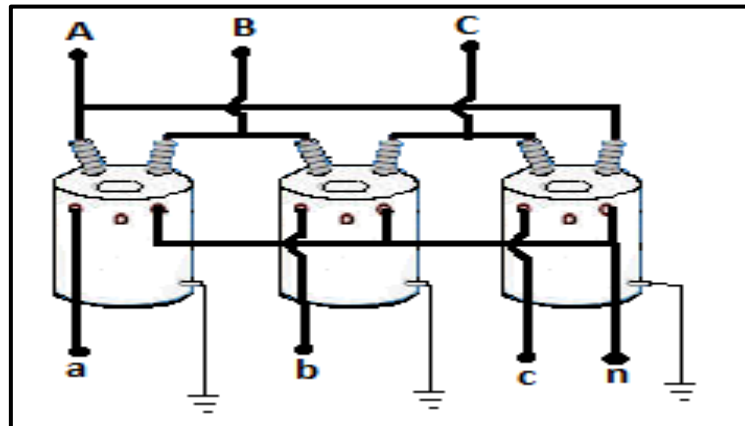


Figura 2: conexión delta estrella

Conexión estrella-estrella.

En una conexión Y-Y, la tensión del primario en cada fase del transformador está dado por la ecuación $V_{\phi P} = \frac{V_{LP}}{\sqrt{3}}$. La tensión de fase del primario se relaciona

con la tensión de fase del secundario por medio de la relación de vueltas del transformador. La tensión de fase en el secundario está relacionada con la tensión de línea en el secundario por la ecuación $V_{LS} = \sqrt{3V_{\phi S}}$. Por lo tanto, la relación de voltaje general en el transformador está dada por la ecuación

$$\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{\sqrt{3V_{\phi P}}}{\sqrt{3V_{\phi S}}} \text{ Y-Y}$$

La conexión se muestra en el siguiente diagrama

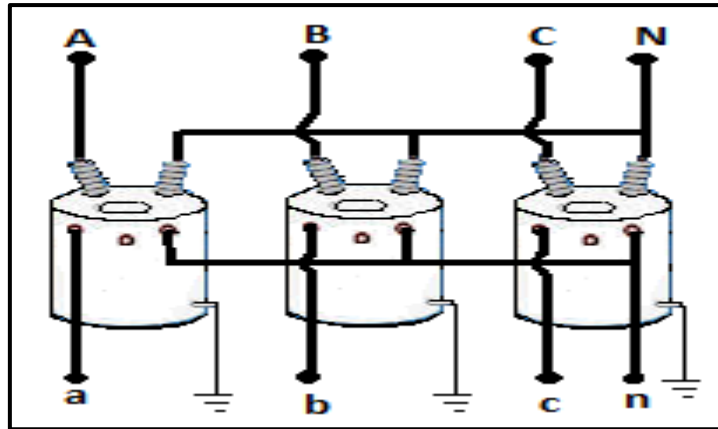


Figura 3: conexión estrella-estrella

Conexión delta-delta

En una conexión $\Delta - \Delta$, la tensión de línea es igual a la tensión de fase en cualquiera de los lados como se muestra en la ecuaciones $V_{LS} = V_{\phi s}$ y $V_{LP} = V_{\phi P}$, por lo que la relación entre los voltajes de línea primario y secundario está dada por la ecuación $\frac{V_{LP}}{V_{LS}} = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}}$

La conexión se muestra en el siguiente diagrama

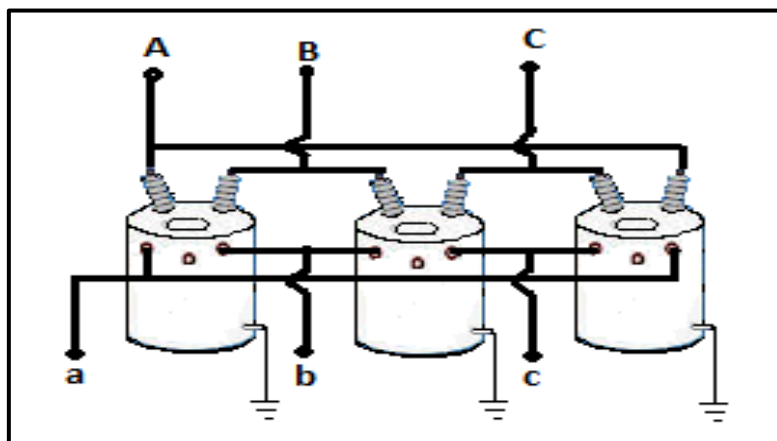


Figura 4: conexión estrella delta

Tipos de Conexión con dos transformadores

Además de las conexiones trifásicas estándar, existen modos de llevar a cabo la transformación trifásica con sólo dos transformadores. Estas técnicas se emplean algunas veces para crear potencia trifásica en ubicaciones en las que



no están disponibles las tres líneas de potencia. Por ejemplo, en áreas rurales, una compañía eléctrica a menudo tiende una o dos de las tres fases en una línea de distribución, debido a que las necesidades de potencia en el área no justifican el costo de tender los tres cables. Si hay un usuario aislado de potencia trifásica a lo largo de una ruta atendida por una línea de distribución con dos de las tres fases, se puede usar esta técnica para crear potencia trifásica para ese usuario en particular. Todas las técnicas que crean potencia trifásica con sólo dos transformadores involucran una reducción de la capacidad de manejo de potencia de los transformadores, pero se justifican en ciertas situaciones económicas.

Algunas de las conexiones más importantes con dos transformadores son:

Conexión Δ abierta o (V-V)

En ciertas situaciones no puede utilizarse un banco de transformadores completo para realizar una transformación trifásica. Por ejemplo, supóngase que un banco de transformadores Δ - Δ que consta de transformadores separados tiene una fase dañada que se debe retirar para su reparación. Si los dos voltajes secundarios que permanecen son la fase (A) y la fase (B) $V_A = V < 0^\circ$ y $V_B = 120^\circ$, entonces la tensión que pasa a través de la abertura que dejó el tercer transformador está dada por la siguiente expresión

$$\begin{aligned} V_C &= -V_A - V_B \\ &= -V < 0^\circ - V < -120^\circ \\ &= -V - (-0.5V - j0.866V) \\ &= -0.5V + j0.866V \\ &= V < 120^\circ \end{aligned}$$

Ésta es la misma tensión que estaría presente si el tercer transformador siguiera ahí. A menudo, a la fase C se le llama fase fantasma. Entonces, la



conexión delta abierta posibilita que un banco de transformadores siga funcionando con sólo dos de sus transformadores, lo que permite que fluya cierta potencia aun cuando se haya removido una fase dañada.

La conexión se muestra en el siguiente diagrama

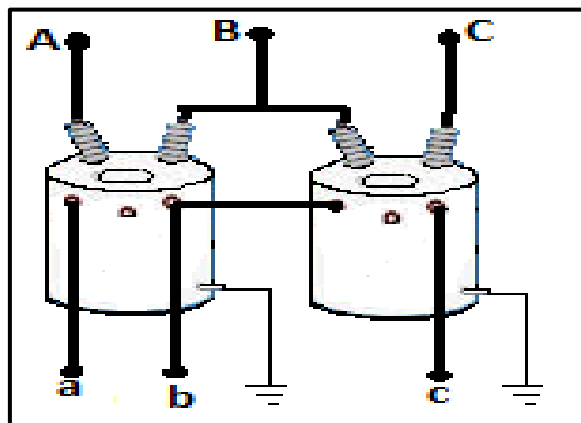


Figura 5: conexión delta abierta

Conexión Y abierta- Δ abierta.

La conexión Y abierta - Δ abierta es muy parecida a la conexión delta abierta excepto en que las tensiones primarias se derivan de dos fases y el neutro. Se utiliza para dar servicio a pequeños clientes comerciales que necesitan servicio trifásico en áreas rurales donde no están disponibles las tres fases. Con esta conexión un cliente puede obtener el servicio trifásico provisional hasta que la demanda haga necesaria la instalación de la tercera fase.

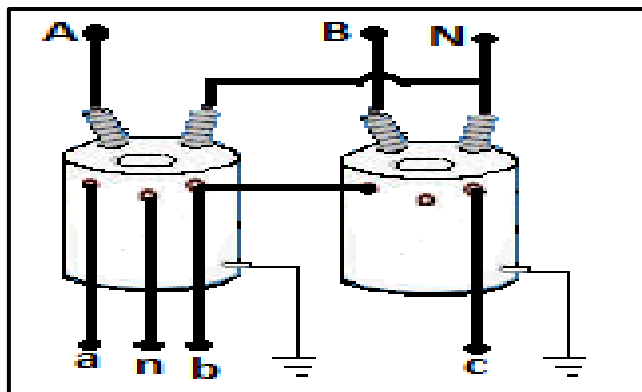


Figura 6: conexión estrella delta abierta



Transformadores en paralelo

Los transformadores se pueden conectar en paralelo para proporcionar corrientes de cargas mayores que la corriente nominal de cada transformador, cuando los transformadores se conectan en paralelo es necesario tener en cuenta las siguientes reglas:

3. Los derivadores que van a conectarse en paralelo deben tener el mismo valor nominal de tensión de salida.
4. Los devanados que se van a conectar en paralelo deben tener polaridades idénticas.

Si no se siguen estas reglas se pueden producir corrientes de cortocircuito excesivamente grandes. En efecto, los transformadores, los interruptores y los circuitos asociados pueden sufrir graves daños e incluso explotar, si las corrientes de cortocircuito alcanzan cierto nivel.

La razón más común por la que se conectan transformadores en paralelo es el crecimiento de la carga, cuando esta supera la potencia del transformador instalado se suele optar por colocar otra unidad en paralelo con la existente.

Las combinaciones primario secundario reunidas bajo el mismo grupo dan un ángulo igual entre la línea de uno y otro lado respectivamente, y pueden acoplarse en paralelo sin más que unir entre si las terminales designadas con la misma inicial.

La conexión de transformadores en paralelo se hace necesaria debido a los incrementos de la demanda que superan la capacidad existente o cuando los requerimientos de confiabilidad y continuidad de operación lo exigen, este es el caso, que si un transformador falla, el otro continuara alimentando la carga sin interrupción.

Cuando la demanda de energía se reduce temporalmente, resulta más económico operar un transformador pequeño cerca de su límite de capacidad a plena carga que un transformador mayor a capacidad reducida. Por lo que, cuando la demanda energética es muy fluctuante resulta más provechoso la



instalación de dos o más transformadores en paralelo que utilizar un transformador de gran capacidad. En estas condiciones el sistema es más flexible por que tiene la posibilidad de agregar una parte de los transformadores paralelo cuando sea necesario.

Condiciones para la puesta en paralelo

Para la conexión en paralelo de dos transformadores según el esquema de la figura 1-10, se debe cumplir condicione, que, en orden de importancias son:

5. Las tenciones secundarias deben estar en fase
6. Las relaciones de transformaciones deben ser iguales.
7. Las tensiones de cortocircuito deben ser iguales.
8. Las impedancias de cortocircuito deben tener el mismo ángulo de fase.

Para la realización de esta práctica se escogen dos transformadores del banco se analizan sus parámetros comparándolas con las condiciones propuestas para la puesta en paralelo y se conectan como se muestra en la siguiente figura

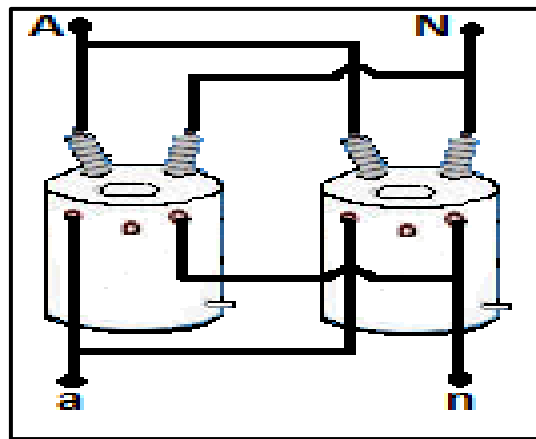


Figura 7: conexión en paralelo



Ensayos al transformador

Ensayos de cortocircuito y vacío

Es posible determinar experimentalmente los valores de las impedancias y resistencias en el modelo del transformador. Se puede obtener una aproximación adecuada de estos valores con únicamente dos pruebas: la prueba de circuito abierto y la prueba de cortocircuito

Ensayo de vacío

Pasos para la realización de esta práctica

1. Comprobar que el puesto de trabajo no este energizado.
2. Verificar que los transformadores, así como todos los elementos del puesto de trabajo están desconectados
3. Elegir que estudiante va a realizar la conexión (pueden ser de 2 a 4 estudiantes)
4. Seleccionar que transformador se va a someter a esta prueba.
5. Tomar los datos de chapa del transformador seleccionado.

En este ensayo se analiza el comportamiento del transformador en vacío.

En la prueba de vacío, se deja abierto el devanado secundario del transformador y el devanado primario se conecta al voltaje pleno nominal. En el devanado primario o de alta del transformador se conecta es amperímetro en serie con el transformador, el voltímetro en paralelo y el wattímetro de la forma específica según el tipo de potencia a medir sea reactiva o activa. En las condiciones descritas, toda la corriente de entrada debe fluir a través de la rama de excitación del transformador. Las componentes en serie R_{eqp} y X_{eqp} , son tan pequeñas, comparadas con R_M y X_M , (ver figura 8) para ocasionar una caída significativa del voltaje que, esencialmente, todo el voltaje de entrada cae a través de la rama de excitación. Con esta información es posible determinar el factor de potencia, la magnitud y el ángulo de la impedancia de excitación

Conectar el transformador como se muestra en el esquema siguiente.

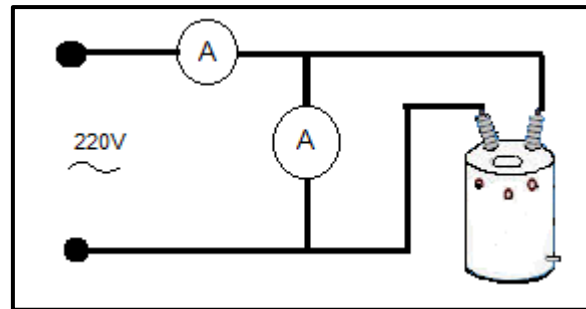


Figura 8: Esquema de conexión del ensayo de vacío.

Expresiones y cálculos fundamentales para la realización de esta práctica:

Calcular la resistencia de cortocircuito a través de la siguiente ecuación

$$R_{oc} = \frac{V_{oc}^2}{P_{oc}}$$

Calcular el módulo de la impedancia de cortocircuito a través de la siguiente ecuación.

$$|Z_{oc}| = \frac{V_{oc}}{P_{oc}}$$

Calcular el factor de potencia

$$PF = \cos \theta = \frac{P_{oc}}{V_{oc} \cdot I_{oc}}$$

Calcular la admitancia de excitación con la siguiente ecuación.

$$Y_E = \frac{I_{oc}}{V_{oc}} \angle -\cos^{-1} PF$$

$$= \frac{1}{R_{oc}} - j \frac{1}{X_M}$$

Los valores de tensión de cortocircuito V_{oc} , corriente de cortocircuito I_{oc} y potencia de cortocircuito P_{oc} , se obtiene de las mediciones arrojadas en el ensayo



Ensayo de cortocircuito.

Pasos para la realización de esta práctica

1. Comprobar que el puesto de trabajo no este energizado.
2. Verificar que los transformadores, así como todos los elementos del puesto de trabajo están desconectados
3. Elegir que estudiante va a realizar el ensayo (pueden ser de 2 a 4 estudiantes)
4. Seleccionar un transformador el cual se someterá al ensayo.

En la prueba de cortocircuito los terminales del secundario del transformador se cortocircuitan y los del primario se conectan a una fuente adecuada de voltaje (Ver esquema de conexionado en la figura 9). El voltaje de entrada se ajusta hasta que la corriente de los devanados cortocircuitados sea igual a su valor nominal (asegurarse de mantener el voltaje primario en un nivel seguro. No es buena idea quemar los devanados del transformador mientras se intenta el ensayo). De nuevo, se miden el voltaje, la corriente y la potencia de entrada. Puesto que el voltaje de entrada es tan pequeño durante la prueba, la corriente que fluye por la rama de excitación es despreciable. Si la corriente de excitación se ignora, toda la caída de voltaje en el transformador puede ser atribuida a los elementos del circuito en serie.

Conectar el transformador como indica el siguiente esquema.

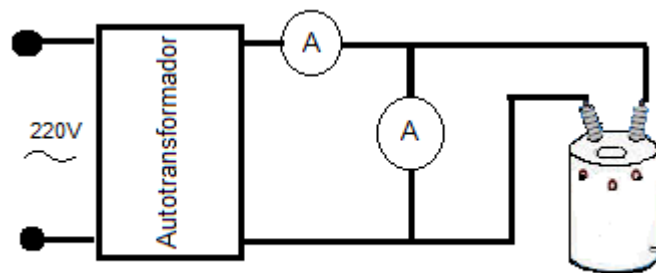


Figura 9: Esquema de conexión del ensayo de vacío.

Calcular la magnitud de las impedancias en serie a través de la siguiente ecuación.



$$Z_{sc} = \frac{V_{sc} \angle 0^\circ}{I_{sc} \angle -\theta^\circ} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle \theta^\circ$$

Calcular la magnitud de la resistencia equivalente a través de la siguiente ecuación.

$$R_{eq} = R_{sc} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2}$$

Calcular el valor de la impedancia equivalente a través de la siguiente ecuación.

$$X_{eq} = X_{sc} = \sqrt{|Z_{sc}|^2 - R_{sc}^2}$$

Calcular el factor de potencia durante la prueba de cortocircuito a través de la siguiente ecuación.

$$PF = \cos \theta = \frac{P_{oc}}{V_{sc} \cdot I_{sc}}$$

Calcular la impedancia serie a través de la ecuación siguiente.

$$Z_E = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \angle \cos^{-1} PF$$

Los datos de las variables se obtienen de las mediciones del ensayo.

Después de terminar el ensayo, se debe llevar la tensión al nivel mínimo luego desconectar la tensión del puesto de trabajo.



Trabajo de Diploma. Diseño y construcción de un banco de pruebas para el trabajo de laboratorio con transformadores eléctricos.
