



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

**CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y
ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE
POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU)**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO ELÉCTRICISTA

AREA: ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

PRESENTAN:

VARGAS CRUZ ÁNGEL

VELÁZQUEZ ROMERO EDUARDO

ASESOR:

M. EN C. OCÓN VALDEZ RODRIGO

MÉXICO, D.F.

2010





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTO.

A **Dios** por darme la fortaleza, la serenidad y el entendimiento de mis errores.

A mi Mamá **María Elena** por darme el apoyo incondicional y su amor de madre.

Al señor **Lorenzo Becerra** por facilitarme lo necesario para terminar este sueño.

A mi Padre **Eduardo Velázquez** por ser siempre un ejemplo profesional.

A mis hermanas **María Elena** e **Ivett** que las quiero mucho y porque me han dado su apoyo a lo largo de nuestras vidas como hermanos.

A **Aida** por darme tu cariño y comprensión.

A nuestro asesor el **M.C. Rodrigo Ocón** por apoyarnos y tener paciencia para la realización de este trabajo y así poder continuar mejorando mi vida profesional.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** por darme un espacio en esta escuela, pero principalmente a mi **Facultad de Estudios Superiores Aragón** que me permitió desarrollarme como persona profesional.

Eduardo Velázquez Romero

AGRADECIMIENTOS.

Para mi **Dios** por darme los medios y la paciencia para estudiar y sacar adelante mi carrera.

A mis padres **Juliana Cruz Galván** y **Geu Vargas Antunes** por haberme dado la oportunidad de estudiar y que nunca dudaron en hacer sacrificios para sacarnos adelante y que nunca perdieron la fe en todos nosotros.

A mis hermanos **Leonel** y **Jesús** por haberme animado a terminar mis estudios y apoyarme en lo que tuvieron en sus manos para salir adelante.

A nuestro asesor **M. en C. Rodrigo Ocón Valdez** por tener paciencia y alentarnos en el desarrollo de la tesis y que nunca nos negó su ayuda para contribuir en el mejoramiento de la tesis.

Para la **Universidad Nacional Autónoma de México** por brindarme la oportunidad de estudiar en la **Facultad de Estudios Profesionales Aragón** para desarrollarme profesionalmente.

Ángel Vargas Cruz

ÍNDICE.

Resumen	3
Objetivo	3
Introducción	4
Capítulo 1 - Fundamentos del Transformador.	
1.1.- Leyes Fundamentales (Ley de Ampere, Faraday, Lenz y Biot Savart).....	8
1.2.- Principio de Operación del Transformador.....	11
1.3.- Circuito Equivalente.....	13
1.4.- Reactancia de Dispersión.....	22
1.5.- Eficiencia y Regulación de Voltaje.....	23
1.6.- Transformadores Monofásicos y Trifásicos.....	25
1.7.- Conexiones Trifásicas y Conexiones en Paralelo.....	27
Capítulo 2 - Construcción del Transformador.	
2.1.- Clasificación por el Tipo de Construcción (Tipo Acorazado y Columnas).....	36
2.2.- Componentes: Núcleo Magnético, Bobinas, Tanques, Aislamiento, Sistema de Enfriamiento, Boquillas.....	39
Capítulo 3 - Cortocircuito en Sistemas de Potencia.	
3.1.- Concepto de Cortocircuito.....	51
3.2.- Tipos de Falla en Sistemas de Potencia.....	52
3.3.- Metodología de Análisis de Falla en Sistemas de Potencia. Utilizando Componentes Simétricas.....	58

Capítulo 4 - Efecto del Cortocircuito en Transformadores.

4.1.- Proceso de Diseño de Transformadores.....	67
4.1.1.- Diseño Eléctrico.....	71
4.1.2.- Diseño Mecánico.....	71
4.1.3.- Diseño Térmico.....	75
4.1.4.- Optimización Económica.....	77
4.2.- Fuerzas Mecánicas en los Devanados Durante un Cortocircuito.....	78
4.3.- Corrientes Asimétricas y Factor de Asimetría.....	83
4.4.- Efecto Mecánico y Térmico de un Cortocircuito En Transformadores.....	85
4.5.- Modos de Falla Típicos para Transformadores	
Tipo Columna y Acorazado.....	86

Capítulo 5 - Cálculo de Corrientes de Cortocircuito y Esfuerzos Mecánicos en Transformadores Tipo Generador.

5.1.- Requisitos Normalizados de Cortocircuito para Transformadores (ANSI-IEEE C57.12.00).....	92
5.2.- Cálculo de Corrientes Máximas de Cortocircuito.....	98
5.3.- Programa de Cálculo y Análisis de Resultados.....	100
Conclusiones	135
Bibliografía	136

RESUMEN.

En este trabajo se analiza y se desarrolla un programa de computadora como herramienta para el cálculo de las corrientes de corto circuito en transformadores conectados directamente a los generadores eléctricos, comúnmente denominados GSU (Generador Step Up, por sus siglas en ingles).

El cálculo de la corriente esperada durante un cortocircuito, es el primer paso para estimar los esfuerzos mecánicos producidos en los devanados, los cuales son considerados durante la etapa de diseño de estos equipos.

El uso de este programa permite al diseñador evaluar el comportamiento del sistema Generador-Transformador ante la variación de parámetros como la reactancia del generador, impedancia del transformador, relación de impedancias de secuencia positiva a secuencia cero.

Los Generadores síncronos son máquinas dinámicas diseñadas para obtener energía eléctrica a partir de otras fuentes que se generan en las grandes centrales eléctricas (hidroeléctricas, termoeléctricas, geotérmicas, centrales nucleares, etc.) en niveles de tensión de hasta 25 kV que posteriormente son elevadas por medio de transformadores elevadores que se utilizan para "aumentar" eléctricamente la tensión desde el generador hasta su distribución (230 y 400 kV en el caso de México Y hasta 1000 kV en otros países).

OBJETIVO GENERAL.

Estudiar y analizar el cálculo de cortocircuito y esfuerzos mecánicos en transformadores de potencia tipo generador con la ayuda de un programa por computadora.

OBJETIVO PARTICULAR.

- Analizar el comportamiento del Generador-Transformador a través de un sencillo programa en Excel ante la variación de parámetros como la reactancia del generador, impedancia del transformador y en la relación de impedancias de secuencia positiva a secuencia cero.
- Cálculo y análisis de cada tipo de falla por medio del método de componentes simétricas.
- Expresar todas las cantidades en por unidad (p.u.) utilizando una base común.
- Construir las redes de secuencia positiva, negativa y cero para cada tipo de falla.
- Graficar y comparar los diferentes tipos de falla.

INTRODUCCIÓN.

Los Generadores síncronos son máquinas dinámicas diseñadas para obtener energía eléctrica a partir de otras fuentes que se generan en las grandes centrales eléctricas (hidroeléctricas, termoeléctricas, geotérmicas, centrales nucleares, etc.) en niveles de tensión de hasta 25 kV que posteriormente son elevadas por medio de transformadores elevadores que se utilizan para "aumentar" eléctricamente la tensión desde el generador hasta su distribución (230 y 400 kV en el caso de México Y hasta 1000 kV en otros países).

Los Transformadores elevadores tipo generador conocidos como GSU (Generator Set Up) por sus siglas en ingles son máquinas estáticas diseñadas generalmente para el transporte de energía eléctrica a largas distancias, elevando generalmente la tensión y disminuyendo por lo tanto la corriente (evitando grandes pérdidas por efecto Joule), se colocan en puntos estratégicos según el sistema eléctrico (normalmente en lugares cercanos a los puntos de generación) y en disposiciones distintas, siempre intentando preservar el equilibrio entre consumo, costo y continuidad del suministro. Básicamente están divididos internamente en dos partes que son el bobinado primario y el bobinado secundario entre los cuales se produce la conversión.

El estudio de los grandes sistemas de potencia obliga a una representación fiel de las características y elementos que conforman al sistema de potencia. Pudiéndose estudiar el problema en dos diferentes modos de representación, la individual de cada componente, para analizar la operación en forma aislada, y la más difícil y compleja, que es la integración de todos los elementos para analizar en un solo diagrama unifilar el comportamiento del sistema en forma general, lo que permitirá estudiar en condiciones normales o anormales al sistema de potencia.

Desde un punto de vista descriptivo, la clasificación de los diferentes tipos de fallos que pueden aparecer en un transformador, según la naturaleza de los subsistemas involucrados, plantea varios problemas. En el análisis de un cortocircuito trifásico, donde las corrientes que circulan por cada fase son iguales, podemos estudiar una fase con el neutro formando un circuito monofásico equivalente, y para los demás tipos de falla (monofásico, línea a línea y doble línea a tierra) se tienen que hacer cálculos manuales y por separado debido a que ya no se les considera como cortocircuito balanceado.

Las causas del desbalance de las corrientes y tensiones por fase se puede deber a las diferencias en la impedancia por las asimetrías en las líneas de transmisión, naturaleza asimétrica de la carga, imperfecciones en generadores y transformadores, etc.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Las consecuencias de un cortocircuito a corto plazo si no se detecta y se aísla en un sistema de potencia, se pueden mencionar de la siguiente manera y son solo algunas:

- Un cortocircuito perturba el entorno del sistema eléctrico alrededor del punto de fallo provocando una caída repentina de tensión.
- Es necesaria la desconexión, mediante la puesta en marcha de los dispositivos de protección, de una parte de la instalación.
- Todos los equipos y conexiones (cables, líneas, transformadores, motores, generadores) sujetos a un cortocircuito están sometidos a una elevada tensión mecánica (fuerzas electrodinámicas) que puede provocar cortes y tensiones térmicas que llegan a fundir los conductores y destruir el aislamiento.
- En el punto de fallo suele haber a menudo un arco eléctrico de alta energía, lo que provoca grandes daños que se pueden extender rápidamente.

Aunque los cortocircuitos tienen cada vez menos posibilidades de producirse en instalaciones modernas (ya que por lo regular son bien diseñadas y que funcionan de una manera adecuada), las serias consecuencias que pueden tener son un estímulo para instalar todos los medios posibles a fin de detectarlos y eliminarlos rápidamente.

Un sistema de potencia opera bajo condiciones estables antes de que ocurra la falla, las redes de secuencia, por lo tanto, están desacopladas antes de la falla. Durante fallas asimétricas, las redes de secuencia estarán interconectadas únicamente en la localización de la falla.

El método de componentes simétricas, que ha sido desde hace tiempo la herramienta preferida para el estudio del cortocircuito en sistemas eléctricos de potencia, nos permite que esos voltajes de fase puedan ser descompuestos en tres juegos de voltajes trifásicos balanceados, denominados “componentes de secuencia”.

Cada falla genera una corriente de amplitud definida y características específicas. La razón de llamarse fallas asimétricas es debido a que las corrientes posteriores a la falla son diferentes en magnitudes y no están desfasadas en 120 grados. Un modo de simplificar los cálculos es el de expresar todos los parámetros en por unidad (p.u.), reactancias equivalentes, tensiones, corrientes y potencias. En general todos los dispositivos integrados en una instalación vienen definidos por placas donde indica las características, dándose también las reactancias equivalentes en p.u. pero referidas a los valores base de la máquina o dispositivo.

Mediante el uso de un programa por computadora en hojas de Excel, evaluamos y calculamos las corrientes máximas de las diferentes fallas (monofásica, trifásica, línea a línea, doble línea a tierra) en el momento del cortocircuito, a partir de estas

corrientes es posible determinar las fuerzas electromagnéticas a la que son sometidas las bobinas del transformador.

En la primera parte de la tesis se refiere a leyes fundamentales como son ley de Faraday, Ampere, Lenz, etc.; así como teoría básica del transformador ideal, real y sistema por unidad (p.u.). Conceptos como eficiencia regulación de voltaje y conexiones en los transformadores, también se mencionan en este capítulo.

En el segundo capítulo se menciona los tipos de transformadores que existen, sus construcciones existentes así como las partes importantes del transformador.

Continuando con el Tercer capítulo presentamos la teoría del cortocircuito desarrollada por Fortescue, los tipos de fallas en sistemas de potencia como son cortocircuito trifásico, línea a línea, línea a tierra y doble línea a tierra.

En el cuarto capítulo se presenta el efecto del cortocircuito en los transformadores, se comienza con algunas consideraciones en el diseño tanto en la parte eléctrica como mecánica; fuerzas mecánicas que se tienen en los devanados durante el corto circuito además corrientes asimétricas y factor de asimetría, donde sabremos que la corriente asimétrica es la variación en el ciclo cuando se produce el corto circuito. Al final de este capítulo se verán las secuelas en un transformador después del corto circuito.

En la quinta parte se dan los requisitos normalizados de cortocircuito para los transformadores, por ejemplo la duración de las pruebas del cortocircuito, magnitudes de la corriente de corto circuito, limitaciones de corriente además del cálculo de la temperatura en los devanados durante el cortocircuito.

Por último se muestra un problema planteado el cual se resolvió a través de un programa en Excel ya que nuestra intención fue modificar algunos valores para poder observar el comportamiento. Se dan las tablas con los resultados obtenidos así como sus gráficas correspondientes.

CAPITULO 1
FUNDAMENTOS DEL TRANSFORMADOR.

1.1.- Leyes Fundamentales.

Ley de Faraday.

La ley de Faraday establece que si el flujo magnético eslabonado en un circuito cerrado varía respecto al tiempo, una f.e.m. es inducida en el circuito.

Si un conductor se mueve por un campo magnético de modo que corte las líneas magnéticas de flujo, se inducirá, un voltaje por el conductor, como se observa en la figura 1. Entre mayor sea la cantidad de líneas de flujo cortadas por unidad de tiempo (incrementando la velocidad con la cual el conductor pasa por el campo) o entre más fuerte sea la fuerza del campo magnético (para la misma velocidad de recorrido), mayor será el voltaje inducido por el conductor. Si el conductor se mantiene fijo y el campo magnético se mueve para que sus líneas corten el conductor, se producirá el mismo efecto.

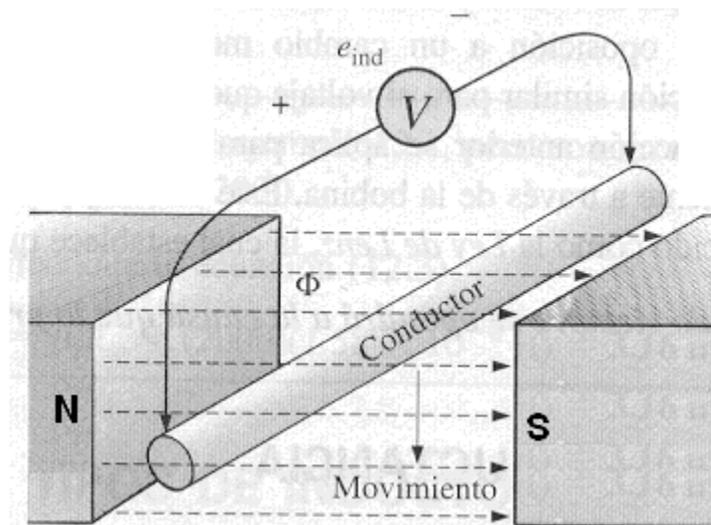


Figura 1.1.- Generación de un voltaje inducido moviendo un conductor por el campo magnético.

Por lo que la ley de Faraday se expresa como:

$$e = N \frac{d\phi}{dt} (\text{Volts}) \text{-----(1.1)}$$

Ley de Ampere.

La Ley de Ampere indica, que la línea integral de un campo magnético en una trayectoria arbitrariamente elegida es proporcional a la corriente eléctrica neta adjunta a la trayectoria. En otras palabras, si hacemos circular una corriente en un conductor colocado paralelamente sobre una aguja imantada y en una dirección

de norte a sur, la punta de la aguja que señala al norte, se moverá hacia la derecha, este movimiento indica que las líneas se mueven de izquierda a derecha, por debajo del conductor, y de derecha a izquierda sobre el conductor.

Las corrientes eléctricas que circulan por hilos conductores próximos ejercen una influencia mutua de origen magnético que modifica sus magnitudes y propiedades.

Dada una superficie abierta S por la que atraviesa una corriente eléctrica I, y dada la curva C, curva contorno de la superficie S, la forma original de la ley de Ampere para medios materiales es:

$$\oint \vec{H}d\vec{l} = NI \text{ ----- (1.2)}$$

Donde:

\vec{H} =Es la intensidad del campo magnético a lo largo de un camino cerrado.
I=se refiere a la intensidad de corriente que atraviesa dicho camino cerrado.

Ley de Lenz.

La Ley de Lenz nos dice que las fuerzas electromotrices o las corrientes inducidas serán de un sentido tal que se opongan a la variación del flujo magnético que las produjo. Esta ley es una consecuencia del principio de conservación de la energía.

La polaridad de una FEM inducida es tal, que tiende a producir una corriente, cuyo campo magnético se opone siempre a las variaciones del campo existente producido por la corriente original.

El flujo de un campo magnético uniforme a través de un circuito plano viene dado por:

$$\Phi = BS \cos \alpha \text{ ----- (1.3)}$$

Donde:

Φ = Flujo magnético. La unidad en el S.I. es el weber (Wb).

B = Inducción magnética. La unidad en el S.I. es el tesla (T).

S = Superficie del conductor en m².

α = Ángulo que forman el conductor y la dirección del campo.

Si el conductor está en movimiento el valor del flujo será:

$$\Phi = B * dS \cos \alpha \text{-----} (1.4)$$

En este caso la Ley de Faraday afirma que la FEM inducida en cada instante tiene por valor:

$$e = - \frac{d\Phi}{dt} \text{-----} (1.5)$$

El signo (-) de la formula indica que la FEM inducida se opone a la variación del flujo que la produce. Este signo corresponde a la ley de Lenz.

Ley de Biot-Savart.

La ley de Biot-Savart nos dice que todo conductor bajo la acción de un campo magnético y por la cual circula una corriente eléctrica queda sometida a la acción de una fuerza que lo hace desplazarse a través del campo.

Este campo viene definido por una magnitud vectorial llamada **densidad de flujo magnético** infinitesimal y, cuyo símbolo es $d\vec{B}$:

$$d\vec{B} = K_M * \frac{I}{r^3} d\vec{l} * \vec{r} \text{-----} (1.6)$$

Donde:

$d\vec{l}$ = Diferencia de Longitud

r = velocidad del conductor dentro de un campo magnético

KM.- La densidad de flujo magnético infinitesimal permite calcular el valor total del campo magnético asociado a una corriente eléctrica que fluye por un circuito a partir de una simple operación de suma de los elementos infinitesimales de corriente.

Matemáticamente, esta suma se expresa como una integral extendida a todo el circuito C, por lo que la densidad de flujo magnético asociada a una corriente viene dada por:

$$\vec{B}_p = K_M 1 \int_C \frac{d\vec{l} * \vec{r}}{r^3} \text{-----(1.7)}$$

$$F = BI \frac{1}{10} (\text{Dinas}) \text{-----(1.8)}$$

1.2.- Principio de Operación del Transformador.

El principio de operación del transformador, se puede explicar por medio del llamado transformador ideal monofásico, es decir, una máquina que se alimenta por medio de una corriente alterna monofásica.

Los transformadores son dispositivos basados en el fenómeno de la inducción electromagnética descrita por la ley de Faraday y están constituidos, en su forma más simple, por dos bobinas devanadas sobre un núcleo cerrado de hierro dulce o hierro silicio. Las bobinas o devanados se denominan primarios y secundarios según correspondan a la tensión alta o baja, respectivamente. También existen transformadores con más devanados, puede existir un devanado "terciario", de menor tensión que el secundario.

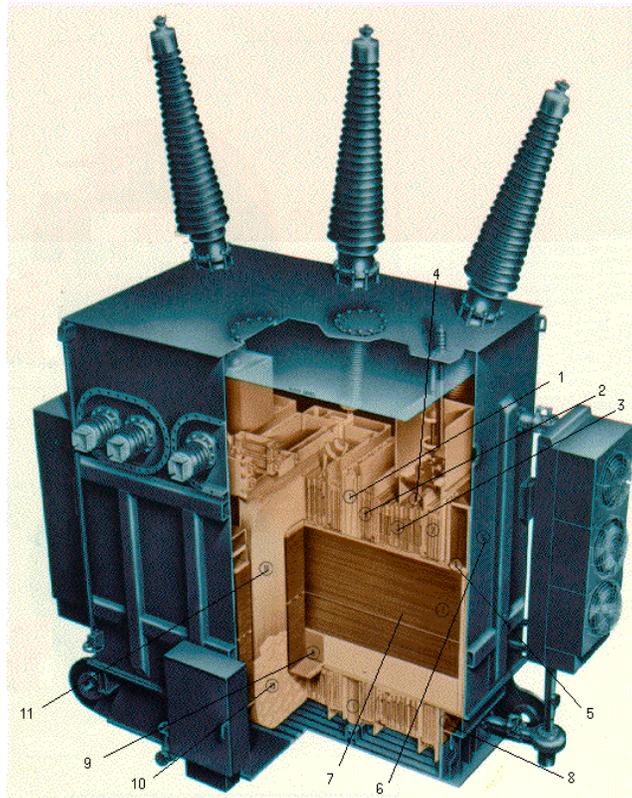


Figura 1.2.- Corte de un Transformador de Potencia Tipo Acorazado.

1. Acuñaamiento Entre Fases
2. Grupo de bobinas de Baja Tensión (LV)
3. Grupo de bobinas de Alta Tensión (HV)
4. Guías de los TAPs de Alta Tensión
5. Refuerzos Superiores del Tanque y Soportes de Núcleo y Bobinas
6. Pared del Tanque
7. Núcleo
8. Refuerzos Inferiores del Tanque y Soportes de Núcleo y Bobinas
9. Viga T inferior para Soporte de Núcleo y bobinas.
10. Rondanas Aislantes

En un transformador, el núcleo tiene dos misiones fundamentales:

1. Desde el punto de vista eléctrico y esta es su misión principal es la vía por que discurre el flujo magnético. A través de las partes de la culata conduce el flujo magnético siguiendo un circuito prescrito, de una columna a otra. El arrollamiento que recibe la energía eléctrica se denomina arrollamiento de entrada, con independencia si se trata la mayor tensión (alta tensión) o menor tensión (baja tensión). El arrollamiento del que se toma la energía eléctrica a la tensión transformada se denomina arrollamiento de salida. En concordancia con ello, los lados del transformador se denominan lado de entrada y lado de salida. El arrollamiento de entrada y el de salida envuelven la misma columna del núcleo de hierro. El núcleo se construye de hierro por que tiene una gran permeabilidad, o sea, conduce muy bien el flujo magnético.
2. Desde el punto de vista mecánico es el soporte de los arrollamientos que en él se apoyan.

1.3.- Circuito Equivalente

Transformador Ideal.

Un transformador ideal es un transformador sin pérdidas, con una bobina de entrada y una bobina de salida.

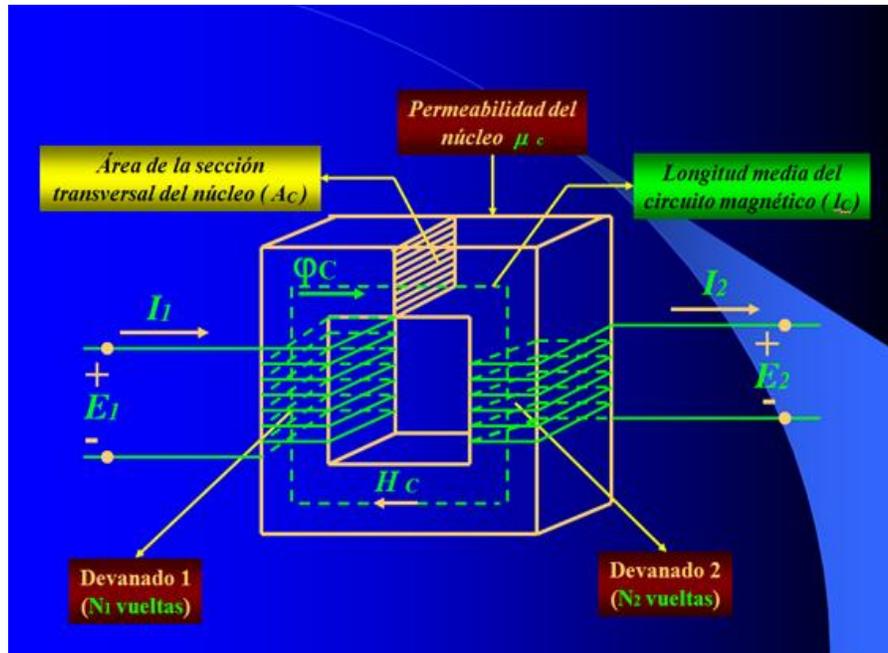


Figura 1.3.- Transformador Monofásico de dos Devanados.

Para un transformador ideal se asume lo siguiente:

- 1) Los devanados tienen cero resistencias, por lo tanto, las pérdidas (I^2R) en los devanados son cero.
- 2) La permeabilidad (μ_c), del núcleo, es infinita, lo cual corresponde a una reluctancia cero del núcleo.
- 3) No hay dispersión de flujo, es decir, el flujo (ϕ_c) íntegramente está confinado en el núcleo y enlaza ambos devanados.
- 4) No existen pérdidas en el núcleo.

Una de las propiedades interesantes de un transformador es que, como cambian los niveles de voltaje o corriente, también cambia la proporción entre el voltaje y corriente.

Si un circuito contiene un transformador ideal, entonces la forma más fácil de calcular los voltajes y corrientes del circuito es reemplazar la porción del circuito de uno de los lados del transformador por uno equivalente con las mismas características terminales. Después que el circuito equivalente se ha sustituido por un lado, el circuito resultante (sin transformador) puede calcularse por sus voltajes y corrientes. En la porción del circuito que no se modificó, los resultados obtenidos serán los valores correctos de los voltajes y corrientes del otro lado del

transformador. El proceso de reemplazar un lado de un transformador por su nivel de voltaje equivalente del otro lado se llama reflexión o referencia del primer lado al segundo lado.

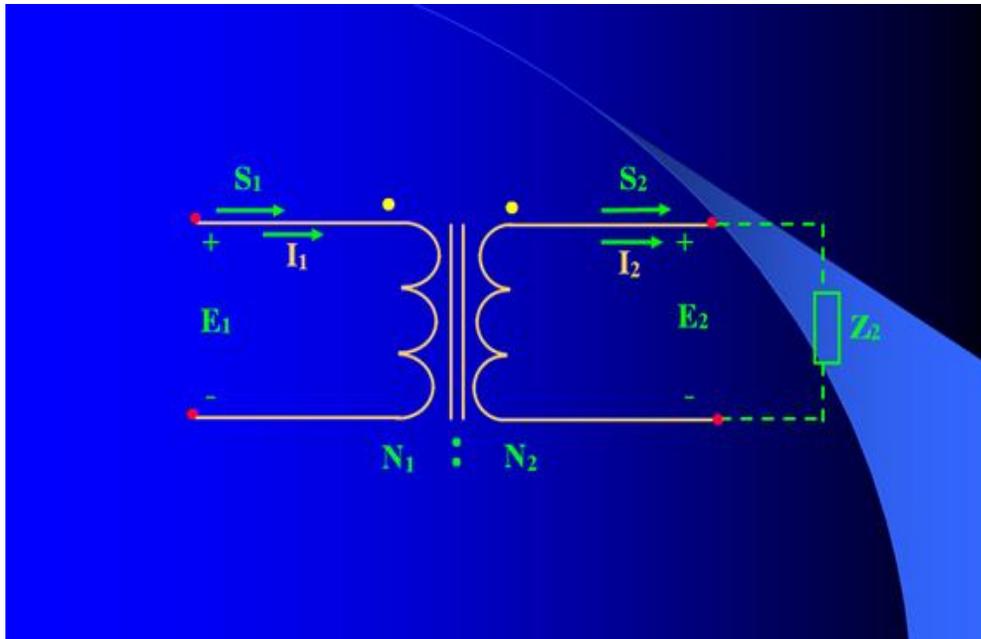


Figura 1.4.- Representación Esquemática de un Transformador Ideal.

Para un transformador ideal, (μ_c) es considerada infinita, lo cual hace que la reluctancia (R_c) sea cero, por lo que en base a la Ley de Ampere, tenemos:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0 \quad \text{O} \quad N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad \text{--- (1.9)}$$

En la práctica, los devanados y núcleo de un transformador de potencia están contenidos dentro de un recipiente cerrado y la dirección de los devanados no son visibles.

Una forma convencional para informar sobre la forma en que están enrollados los devanados, son las marcas con puntos en una terminal de cada devanado. Estas marcas son llamadas "marcas de polaridad".

La ecuación 1.9 está escrita para corriente I_1 entrando por la terminal con marca de polaridad y la corriente I_2 saliendo por la terminal con marca de polaridad.

I_1 e I_2 están en fase, puesto que:

$$I_1 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) I_2 \text{-----(1.10)}$$

Si la dirección seleccionada para I_2 fuera invertida, entonces I_1 estaría 180° fuera de fase con I_2 .

Para un transformador ideal, se asume que el flujo total esta confinado al núcleo, enlazando ambos devanados.

De la ley de Faraday, los voltajes inducidos a través de los devanados de la figura 1 son:

$$E_1 = N_1 \dot{\omega} \int \Phi \text{-----(1.11)}$$

$$E_2 = N_2 \dot{\omega} \int \Phi \text{-----(1.12)}$$

Dividiendo las ecuaciones 3.5 y 3.6, tenemos:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \text{O} \quad E_1 = \frac{N_1}{N_2} E_2 \text{--- (1.13)}$$

Las marcas de polaridad mostradas en la figura 1.4 indican que los voltajes E_1 y E_2 , tienen su polaridad positiva en las terminales marcadas, por lo que ambos voltajes están en fase. Si la polaridad es cambiada para uno de los voltajes en, E_1 estará desfasado 180° con respecto a E_2 .

La relación de vueltas (a_t) está definida como:

$$a_t = \frac{N_1}{N_2} \text{----- (1.14)}$$

Usando la ecuación 6 en las ecuaciones 2 y 5, las relaciones básicas para un transformador ideal monofásico de dos devanados son:

$$I_1 = \left(\frac{N_2}{N_1} \right) I_2 = \frac{I_2}{a_t} \text{----- (1.15)}$$

$$E_1 = \left(\frac{N_1}{N_2} \right) E_2 = a_t E_2 \text{----- (1.16)}$$

Derivadas de las ecuaciones 1.15 y 1.16, se pueden obtener dos relaciones adicionales, relacionadas con la “potencia compleja” y la “impedancia”, como sigue:

La potencia compleja que entra al devanado 1 en la figura 1.4, es:

$$S_1 = E_1 I_1 \text{ -----(1.17)}$$

Sustituyendo las ecuaciones 1.15, 1.16 en 1.17 tenemos:

$$S_1 = E_1 I_1^* = a_1 E_2 \left(\frac{I_2}{a_1} \right)^*$$
$$S_2 = E_2 I_2^* \text{ -----(1.18)}$$

Esto es, en un transformador ideal no se tiene pérdidas de potencia real o reactiva.

Transformador Real.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

El transformador real monofásico de dos devanados, se difiere del transformador ideal por lo siguiente:

- Los devanados tienen resistencia.
- La permeabilidad (μ_C), del núcleo, es finita.
- El flujo magnético (φ_C) no está enteramente confinado en el núcleo.
- Existen pérdidas de potencia real y reactiva en el núcleo.

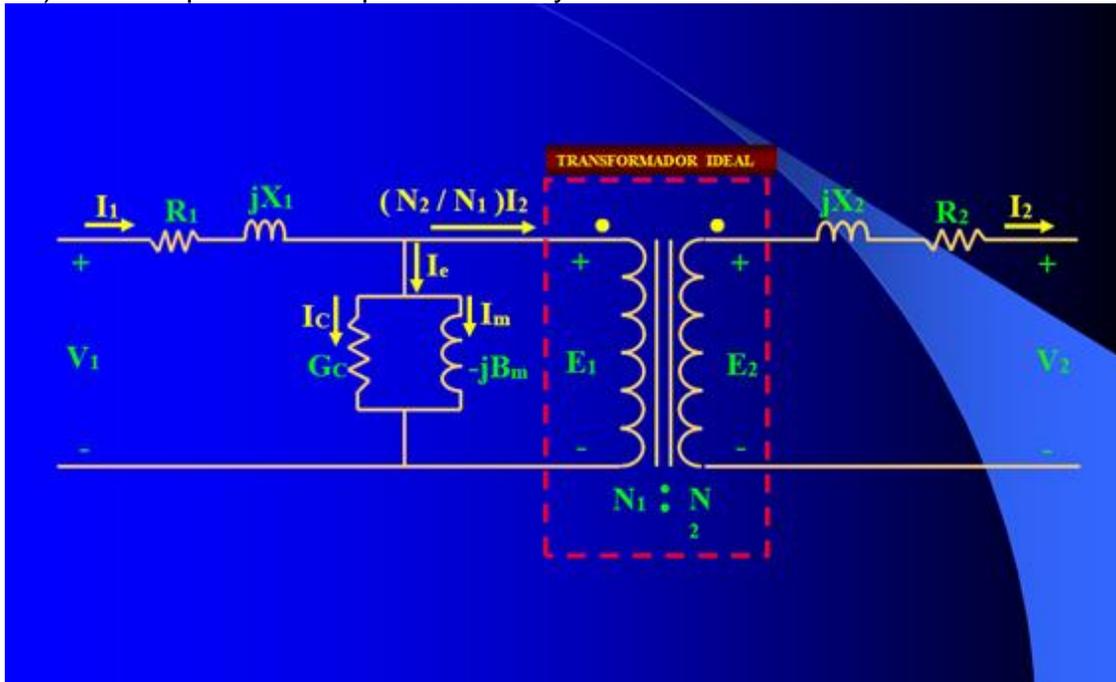


Figura 1.5.- Circuito equivalente de un Transformador Real Monofásico de dos Devanados.

- La resistencia R_1 de la figura 1.5, está en serie con el devanado 1, para considerar las pérdidas (I^2R) en ese devanado.
- Una reactancia X_1 , llamada reactancia de dispersión del devanado 1, es también incluida en serie con el devanado 1, para considerar el flujo de dispersión del devanado 1. Este flujo de dispersión es la componente del flujo que enlaza al devanado 1, pero no enlaza al devanado 2; esto causa una caída de voltaje $I_1(jX_1)$, la cual es proporcional a I_1 y adelanta a I_1 por 90° .
- Hay también una pérdida de potencia reactiva $I_1^2X_1$, asociada con esa reactancia de dispersión.
- Similarmente, hay una resistencia R_2 y una reactancia X_2 en serie con el devanado 2.
- El circuito equivalente de la figura 3.4, el cual incluye la derivación en paralelo con admitancia ($G_C - jB_m$) Ohm, permite considerar las pérdidas en el núcleo y las pérdidas por magnetización.

- Nótese que cuando el devanado 2 está abierto ($I_2 = 0$) y cuando un voltaje senoidal V_1 es aplicado al devanado 1, entonces la corriente I_1 tendrá dos componentes, la corriente de pérdidas en el núcleo I_c y la corriente de magnetización I_m .

Asociado con I_c , existe una pérdida de potencia real.

$$\frac{I_c^2}{G_c} = E_1^2 G_c \text{ (Watts)} \text{-----(1.19)}$$

Esta pérdida de potencia real considera las pérdidas dentro del núcleo por corrientes de histéresis y Eddy.

Las pérdidas por histéresis ocurren porque una variación cíclica de flujo dentro del núcleo requiere energía que se disipa en forma de calor. Las pérdidas por histéresis pueden reducirse mediante el uso de acero especial con alto grado de aleación al silicio para la fabricación del núcleo.

Las pérdidas por corrientes de Eddy ocurren porque se inducen dentro del núcleo corrientes perpendiculares al flujo, llamadas corrientes de Eddy. Estas pérdidas pueden reducirse mediante la construcción del núcleo con hojas de lámina de acero.

Asociado con I_m , hay una pérdida de potencia reactiva.

$$\frac{I_m^2}{B_m} = E_1^2 B_m \text{ (VAR)} \text{-----(1.20)}$$

Esta pérdida de potencia reactiva es requerida para magnetizar el núcleo. El fasor suma ($I_c + I_m$) es llamado la corriente de excitación I_e .

Sistema en Por Unidad (p.u.).

Los parámetros de un sistema de potencia, tales como, voltaje, corriente, potencia e impedancia, son frecuentemente expresados en por unidad (p.u.) o en %, referidos a valores base especificados. Por ejemplo, si un voltaje base de 20 kV se especifica, entonces el voltaje de 18 kV es $18 / 20 = 0.9$ p.u. ó 90 %.

Los cálculos pueden entonces hacerse, con cantidades en p.u., en vez de las cantidades reales.

Una ventaja del sistema por unidad es que si las cantidades base se especifican apropiadamente, el circuito equivalente del transformador puede simplificarse. El transformador ideal puede ser eliminado, de tal manera que voltajes, corrientes e impedancias y admitancias externas expresadas en p.u. no cambian cuando ellas son referidas desde uno u otro lado del transformador.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Esta puede ser una ventaja significativa, sobre todo en sistemas de potencia, donde pueden encontrarse cientos de transformadores.

El sistema p.u. nos permite evitar la posibilidad de cometer errores significativos de cálculo, cuando referimos cantidades de un lado al otro de un transformador.

Otra ventaja del sistema por unidad es que las impedancias en p.u. de equipo eléctrico similar, se ubican en un estrecho rango numérico cuando las capacidades nominales de los equipos son usados como valores base.

Adicionalmente, los fabricantes usualmente especifican la impedancia de máquinas y transformadores en p.u. ó en %.

Las cantidades en p.u. son calculadas como sigue:

$$\text{Cantidad en por unidad} = \frac{\text{Cantidad Real}}{\text{Valor de la Cantidad Base}} \text{ --- (1.21)}$$

Donde la “cantidad real” es el valor de la cantidad en unidades reales. El valor base tiene las mismas unidades que la cantidad real, por lo tanto la cantidad en p.u. se hace adimensional.

También, el valor base es siempre un número real, por lo tanto el ángulo de la cantidad en p.u. es el mismo que el de la cantidad real.

Dos valores base independientes pueden seleccionarse arbitrariamente en un punto del sistema de potencia.

Usualmente el voltaje base V_{baseLN} y la potencia compleja base $S_{\text{base1}\phi}$, se seleccionan para un circuito monofásico o para una fase de un circuito trifásico.

Entonces, para que las leyes eléctricas sean válidas en el sistema por unidad, las siguientes relaciones deben usarse para otros valores base.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

$$P_{\text{base } 1\phi} = Q_{\text{base } 1\phi} = S_{\text{base } 1\phi} \text{ ----- (1.22)}$$

$$I_{\text{base}} = \frac{S_{\text{base } 1\phi}}{V_{\text{baseLN}}} \text{ ----- (1.23)}$$

$$Z_{\text{base}} = R_{\text{base}} = X_{\text{base}} = \frac{V_{\text{baseLN}}}{I_{\text{base}}} = \frac{V_{\text{baseLN}}^2}{S_{\text{base } 1\phi}} \text{ ---- (1.24)}$$

$$Y_{\text{base}} = \frac{1}{Z_{\text{base}}} \text{ ----- (1.25)}$$

Por convención se adoptan las siguientes dos reglas para cantidades base:

- 1) El valor de $S_{\text{base } 1\phi}$ es el mismo para todo el sistema en estudio.
- 2) La relación de los voltajes base para cada lado de un transformador debe ser seleccionada de tal manera que sea la misma que la relación de los voltajes nominales del transformador.

Con estas dos reglas una impedancia en p.u. permanece inalterable cuando se refiere a uno u otro lado del transformador.

Por lo tanto, un transformador monofásico ideal o un transformador monofásico real se pueden representar sus impedancias serie y paralelo en valores en por unidad. Usualmente se seleccionan como valores base, los valores nominales de placa del transformador.

Sin embargo, cuando varios componentes son involucrados, los valores base del sistema pueden ser diferentes a los valores nominales de placa de un componente en particular. Es entonces necesario convertir la impedancia en p.u. de ese dispositivo de los valores nominales de placa al nuevo sistema de valores base.

Para convertir el valor de una impedancia en p.u., referida a unos valores base (viejos o de placa), a un valor referido a otros valores base (nuevos), se usa:

$$Z_{\text{p.u.nuevo}} = \frac{Z_{\text{real}}}{Z_{\text{base nueva}}} = \frac{Z_{\text{p.u.vieja}} * Z_{\text{base vieja}}}{Z_{\text{base nueva}}} \text{ ---- (1.26)}$$

O de la ecuación 1.26:

$$Z_{p.u.nuevo} = Z_{p.u.vieja} \left(\frac{V_{base\ viejo}}{V_{base\ nuevo}} \right)^2 \left(\frac{S_{base\ nueva}}{S_{base\ vieja}} \right) \text{---(1.27)}$$

- Los circuitos trifásicos balanceados pueden resolverse en por unidad con bases monofásicas, después de convertir las impedancias de carga en “Δ” a sus equivalentes en “Y”.
- Los valores base pueden seleccionarse en bases monofásicas o en bases trifásicas.

Usualmente se seleccionan $S_{base\ 3\phi}$ y $V_{base\ LL}$, donde los subíndices 3ϕ y LL indican “trifásica” y “línea a línea”, respectivamente. Por lo tanto las siguientes relaciones deberán usarse para los otros valores base:

$$S_{base\ 1\phi} = \frac{S_{base\ 3\phi}}{3} \text{---(1.28)}$$

$$V_{base\ LN} = \frac{V_{base\ LL}}{\sqrt{3}} \text{---(1.29)}$$

$$S_{base\ 3\phi} = P_{base\ 3\phi} = Q_{base\ 3\phi} \text{---(1.30)}$$

$$I_{base} = \frac{S_{base\ 1\phi}}{V_{base\ LN}} = \frac{\frac{S_{base\ 3\phi}}{3}}{\frac{V_{base\ LL}}{\sqrt{3}}} = \frac{S_{base\ 3\phi}}{\sqrt{3} V_{base\ LL}} \text{---(1.31)}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base\ LN}}{I_{base}} = \frac{V_{base\ LN}^2}{S_{base\ 1\phi}} = \frac{V_{base\ LL}^2}{S_{base\ 3\phi}} \text{---(1.32)}$$

$$R_{base} = X_{base} = Z_{base} = \frac{1}{Y_{base}} \text{---(1.33)}$$

1.4.- Reactancia de Dispersión del Transformador.

Para los bobinados concéntricos, se calcula la distancia entre arrollamientos concéntricos haciendo la semidiferencia entre el diámetro interno del bobinado exterior, y el diámetro externo del bobinado interior.

Se debe tener en cuenta que el espesor del tubo aislante de la bobina externa, no está incluido en el diámetro interno de esta bobina, es decir, el mismo se encuentra físicamente dentro de la distancia entre arrollamientos. Esto es importante a los efectos del real espacio disponible para la circulación del aceite por el canal axial que queda determinado. Para los bobinados alternados también se deben determinar las características geométricas, y el cálculo de la reactancia es inmediato.

Las magnitudes que dependen directamente del campo de dispersión son:

- La tensión de cortocircuito
- Las pérdidas adicionales
- Las elevaciones de temperatura
- Los esfuerzos de cortocircuito

Cuando la intensidad de campo de los arrollamientos no está axialmente equilibrada se tienen distorsiones del flujo de dispersión con aumento de las componentes transversales (radiales) del mismo en las cabezas de los arrollamientos o bien en las lagunas o discontinuidades de los mismos.

Los recorridos de cierre de las líneas de flujo disperso dependen de cuál es el devanado alimentado y cortocircuitado (interior o exterior).

Se asume frecuentemente que es absolutamente indiferente cual es el arrollamiento alimentado (con tensión reducida) y cual el cortocircuitado, considerando que la repartición de las líneas de flujo disperso será impuesta por la ley de mínima reluctancia de los circuitos magnéticos.

Mientras que en la situación real de funcionamiento pueden manifestarse saturaciones locales de algún tramo del circuito magnético con la consiguiente incidencia en los efectos térmicos. El trazado corresponde a un núcleo y una cuba de materiales cuya permeabilidad se supone infinita, constituyendo un modelo que se utiliza frecuentemente para el desarrollo de métodos matemáticos que permiten resolver los campos magnéticos.

Esto pone en evidencia la importancia del conocimiento del recorrido de los campos magnéticos de dispersión en las máquinas de gran potencia, con el objeto de evaluar con mayor precisión el cálculo de la reactancia, las pérdidas adicionales en los arrollamientos y partes metálicas (núcleo, cuba, etc.) así como también los esfuerzos radiales y axiales de naturaleza electrodinámica.

1.5.- Eficiencia y Regulación de Voltaje.

La regulación de voltaje de un transformador es la cantidad adicional de voltaje que requiere el transformador con el secundario abierto, necesario para mantener un voltaje constante al aplicarle carga.

Puesto que el transformador real tiene impedancias en serie en su interior, su tensión de salida varía con la carga, aún si la tensión de alimentación se mantiene constante. La Regulación de Voltaje a plena carga es una cantidad que compara el voltaje de salida del transformador en vacío con el voltaje de salida a plena carga:

$$\% \text{ Regulacion} = \frac{V_C - V_{PC}}{V_{PC}} * 100 \text{-----} (1.34)$$

Donde:

V_C = Voltaje medido en el secundario sin carga (voltaje en vacío).

V_{PC} = Voltaje medido en el secundario a plena carga.

Generalmente se considera conveniente tener una regulación de voltaje tan pequeña como sea posible. Para un transformador ideal, $RV = 0 \%$. Pero no siempre es aconsejable tener una regulación de voltaje baja, aunque algunas veces los transformadores de impedancia y regulación de voltajes altos se usan para reducir las corrientes de falla en un circuito.

Para obtener la regulación de voltaje en un transformador se requiere entender las caídas de voltaje que se producen en su interior. Los efectos de la rama de excitación en la regulación de voltaje del transformador puede, ignorarse, por lo tanto que solamente las impedancias en serie deben tomarse en cuenta. La regulación de voltaje de un transformador depende tanto de la magnitud de estas impedancias como del ángulo fase de la corriente que circula por el transformador. La forma más fácil de determinar el efecto de la impedancia y de los ángulos de fase de la corriente circulante en la regulación de voltaje del transformador es analizar el Diagrama Fasorial, un esquema de los voltajes y corrientes fasoriales del transformador.

Eficiencia del Transformador.

Los transformadores también se comparan y valoran de acuerdo con su eficiencia. La eficiencia o rendimiento de un artefacto se puede conocer por medio de la siguiente ecuación:

$$h = \frac{P_{SAL}}{P_{ENT}} * 100\% \text{ ----- (1.35)}$$

$$h = \frac{P_{SAL}}{P_{SAL} + P_{PERDIDAS}} * 100\% \text{ ----- (1.36)}$$

Donde:

h = Eficiencia del transformador

P_{SAL} = Potencia de salida del transformador

P_{ENT} = Potencia de entrada del transformador

P_{PERDIDAS} = Potencia de pérdida del transformador

Esta ecuación se aplica a motores y generadores, así como a transformadores. Los circuitos equivalentes del transformador facilitan mucho los cálculos de la eficiencia.

Hay tres tipos de pérdidas que se representan en los transformadores:

- Pérdidas en el cobre.
- Pérdidas por histéresis.
- Pérdidas por corrientes parásitas.

Para calcular la eficiencia de un transformador bajo carga dada, sólo se suman las pérdidas de cada resistencia y se aplica la ecuación:

$$h = \frac{P_{salida}}{P_{salida} + P_{perdida}} * 100\% \text{ ----- (1.37)}$$

Puesto que la potencia es P_{SAL} = V_S * I_S cos q, la eficiencia puede expresarse por:

$$h = \frac{V_S I_S \cos q_s}{P_{CU} + P_{NUCLEO} + V_S I_S \cos q_s} * 100\% \text{ ----- (1.38)}$$

1.6.- Transformadores Monofásicos y Trifásicos.

El Transformador trifásico se utiliza en la mayoría de las redes porque la energía de un sistema trifásico se puede transformar, ya sea por medio de tres transformadores monofásicos (formando un banco trifásico) o bien mediante el uso de un transformador trifásico. Por razones de tipo económico, de espacio en las instalaciones y confiabilidad en los equipos, se puede decir, que en general, es preferida la solución del uso de transformadores trifásicos en las instalaciones eléctricas que requieren de este tipo de alimentación.

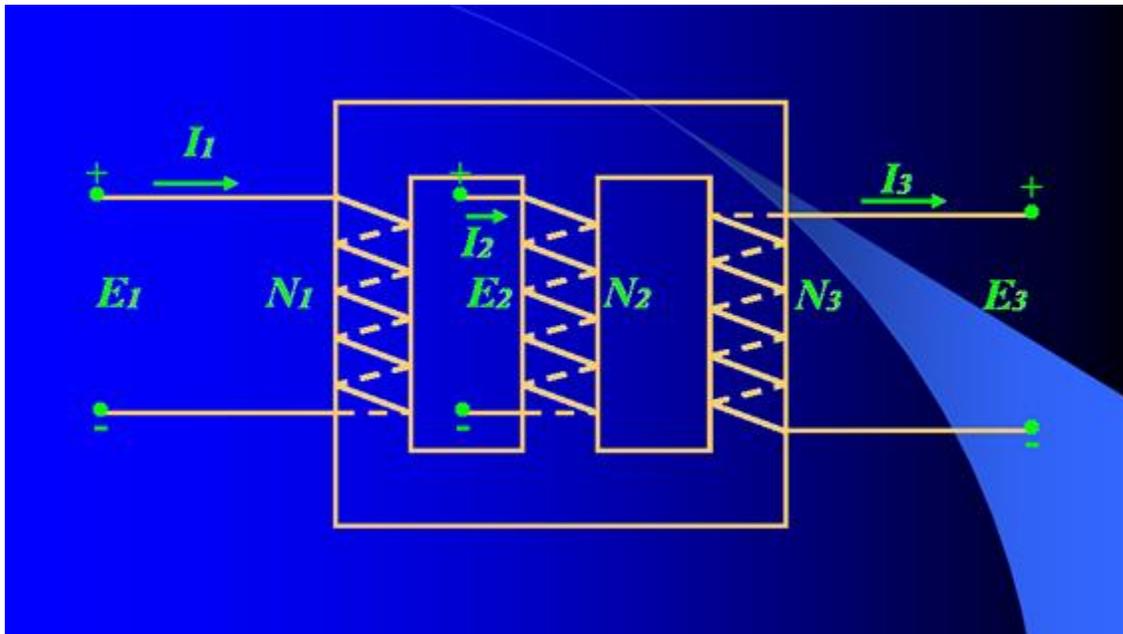


Figura 1.6.- Esquema de un Transformador Trifásico.

Hay pocas diferencias entre los transformadores trifásicos y monofásicos, en lo que respecta a los ensayos a realizar. En ambos las especificaciones sobre temperatura, aislación, etc., no pueden ser diferentes, pues las normas no hacen distinción sobre el número de fases.

Para las caídas de tensión y regulación, también pueden estudiarse como si se tratara de uno monofásico, con solo considerar separadamente cada fase. De modo que la característica de carga externa, que da la tensión en los bornes secundarios al variar la carga, se tomara para una fase, pues es igual prácticamente, para las otras fases. Una de las principales diferencias entre los transformadores trifásicos de los monofásicos es que las pérdidas en el hierro son distintas para las tres fases, cuando el núcleo es asimétrico, lo que es común. Por lo cual se deben realizar ensayos en vacío y cortocircuito.

Cuando los devanados primario y secundario de un transformador trifásico tienen conexiones distintas, la relación entre las dos tensiones de vacío (sin carga) en las

terminales, no es igual a la relación entre las espiras de una fase primaria y secundaria. Esto depende de los tipos de conexiones que se seleccionen, debidos a que cada tipo de conexión corresponde una determinada realización entre las tensiones concatenadas y las tensiones de fase.

En los transformadores trifásicos, tiene importancia entre otra cosas, el eventual desfaseamiento de fases de la tensión secundaria respecto a la tensión primaria., que puede afectar a la conexión en paralelo de los transformadores.

En términos generales, un banco formado por tres transformadores monofásicos, se puede reemplazar por un transformador trifásico. Estos transformadores trifásicos, tienen un núcleo magnético con tres piernas, en donde se alojan los devanados primario y secundario de cada una de las fases. Los devanados se conectan internamente, en forma similar a los bancos de transformadores monofásicos, en cualquiera de las conexiones trifásicas, es decir, estrella-estrella, estrella-delta, delta-estrella, delta-delta, delta abierta, etc.

Para una capacidad dada, un transformador trifásico es siempre de menor tamaño y más barato que un banco formado por tres transformadores monofásicos con la misma capacidad. En algunas ocasiones, aun con lo mencionado antes, se prefiere el uso de bancos de transformadores monofásicos, especialmente cuando por mantenimiento y confiabilidad resulta importante la facilidad para reemplazar a una de las unidades.

El transformador trifásico con carga puede estudiarse como si fuera un conjunto de tres transformadores monofásicos; pues cada fase forma un circuito independiente en lo que respecta a la carga, tal como sucedía en el estudio particular de las redes trifásicas. Las diferencias entre las corrientes de vacío de las tres fases del transformador, no inciden mayormente en el estado de carga, ya que sabemos que el valor relativo de tales corrientes, comparadas con las de carga, es despreciable

1.7.- Conexiones Trifásicas y Conexiones en Paralelo.

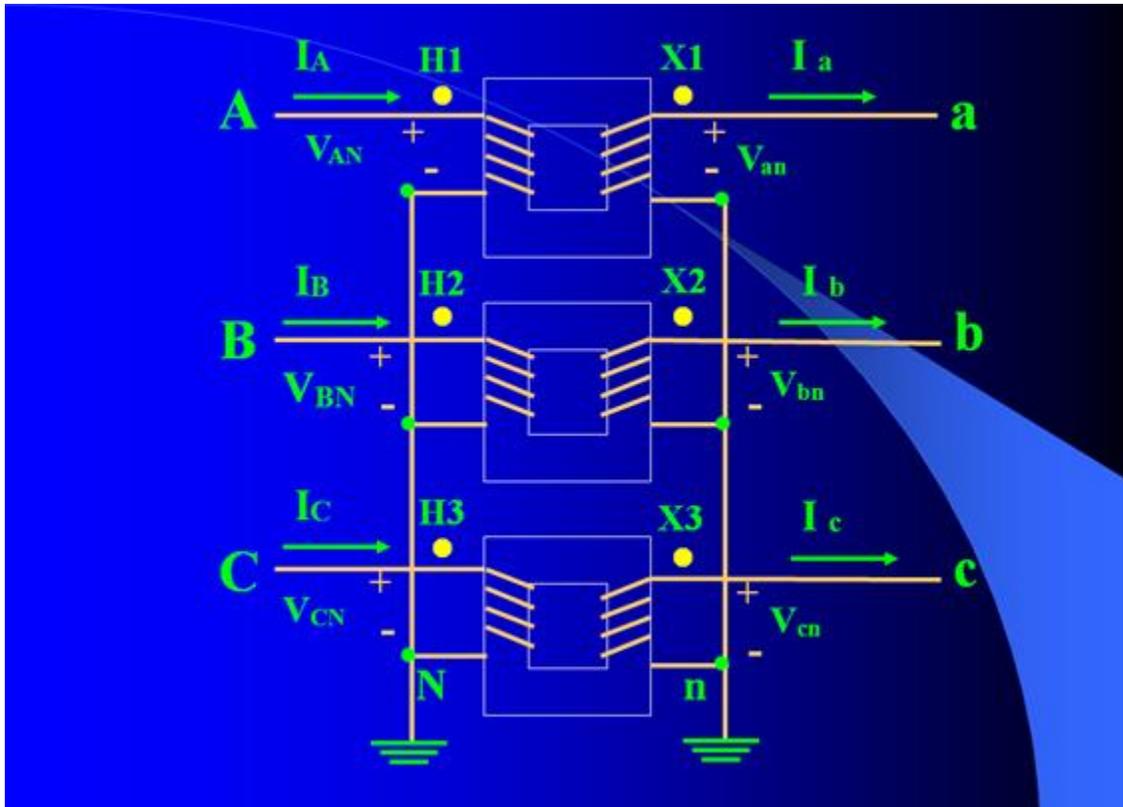


Figura 1.7.- Arreglo de Núcleos Monofásicos para formar un Banco de Transformación Trifásico Conexión Y-Y.

Los transformadores monofásicos se conectan en bancos trifásicos principalmente en dos tipos de circuitos:

- 1) En circuitos de muy alto voltaje.
- 2) En circuitos en que se requiera continuidad en el servicio. Normalmente se dispone de cuatro transformadores monofásicos, tres en operación y uno de reserva. Las conexiones se hacen en transformadores monofásicos para formar bancos trifásicos son en general las mismas que se llevan a cabo en los transformadores trifásicos.

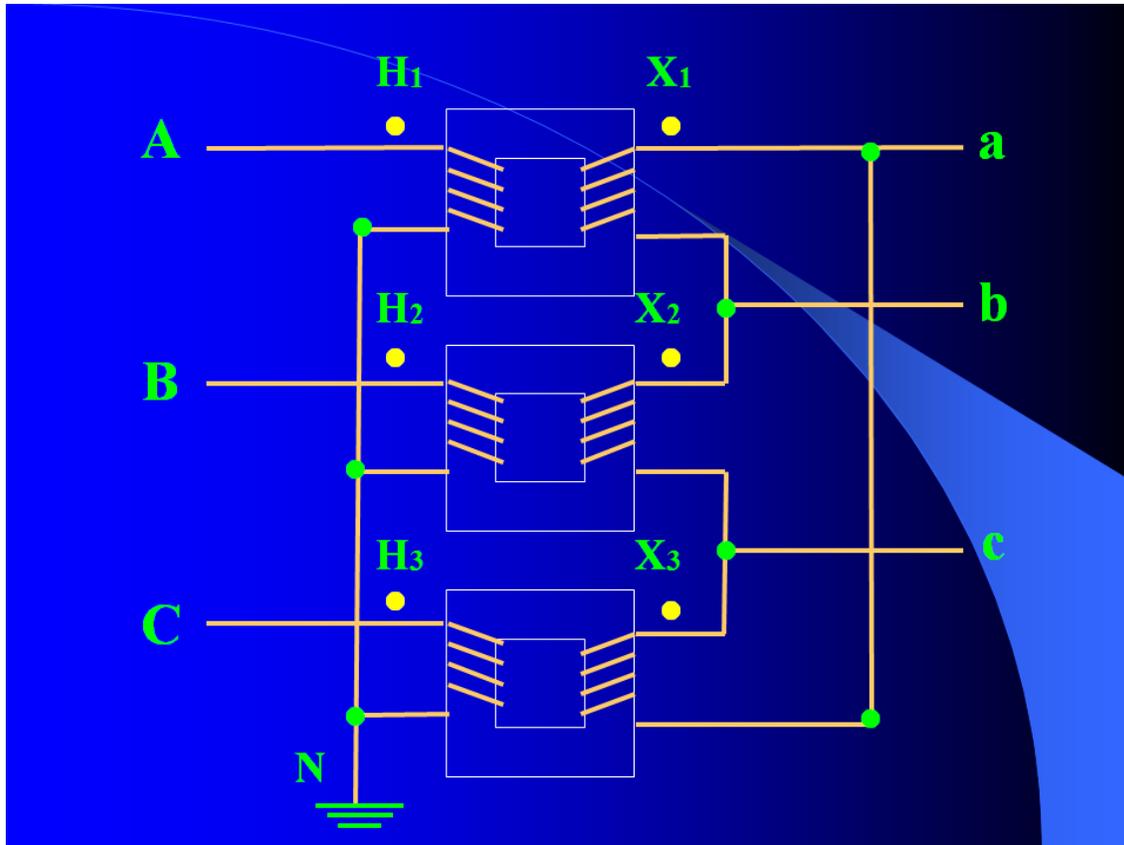


Figura 1.8.- Arreglo de Núcleos Monofásicos para formar un Banco de Transformación Trifásico Conexión Y-Δ.

Tres transformadores idénticos monofásicos de dos devanados, pueden conectarse para formar un banco trifásico. Existen cuatro formas básicas de conectar los devanados, Y-Y, Y-Δ, Δ-Y y Δ-Δ .

El estándar americano para marcar las terminales de transformadores trifásicos, reemplaza las marcas de polaridad por, H1, H2, H3 en las terminales de alto voltaje y X1, X2, X3 en las terminales de bajo voltaje. También se utilizan letras mayúsculas A, B y C para identificar las fases en el lado de alto voltaje del transformador y letras minúsculas a, b y c para identificar las fases de bajo voltaje del mismo.

En la figura 1.7 las terminales de alto voltaje del transformador H1, H2, y H3 están conectadas a las fases A, B y C, y las terminales de bajo voltaje X1, X2, y X3 a las fases a, b y c, respectivamente.

La figura 1.7 muestra una representación esquemática del transformador trifásico Y-Y. Los devanados que están en el mismo núcleo se dibujan en paralelo, y también se muestra, la relación fasorial para operación balanceada de secuencia positiva.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Las fases de un transformador Y-Y o Δ-Δ, pueden marcarse o no, ya que no existe desfaseamiento entre cantidades correspondientes de los devanados de alto y bajo voltaje. Pero para transformadores con conexiones Y-Δ o Δ-Y, existe siempre un desfaseamiento.

Transformador con conexión Y-Y.

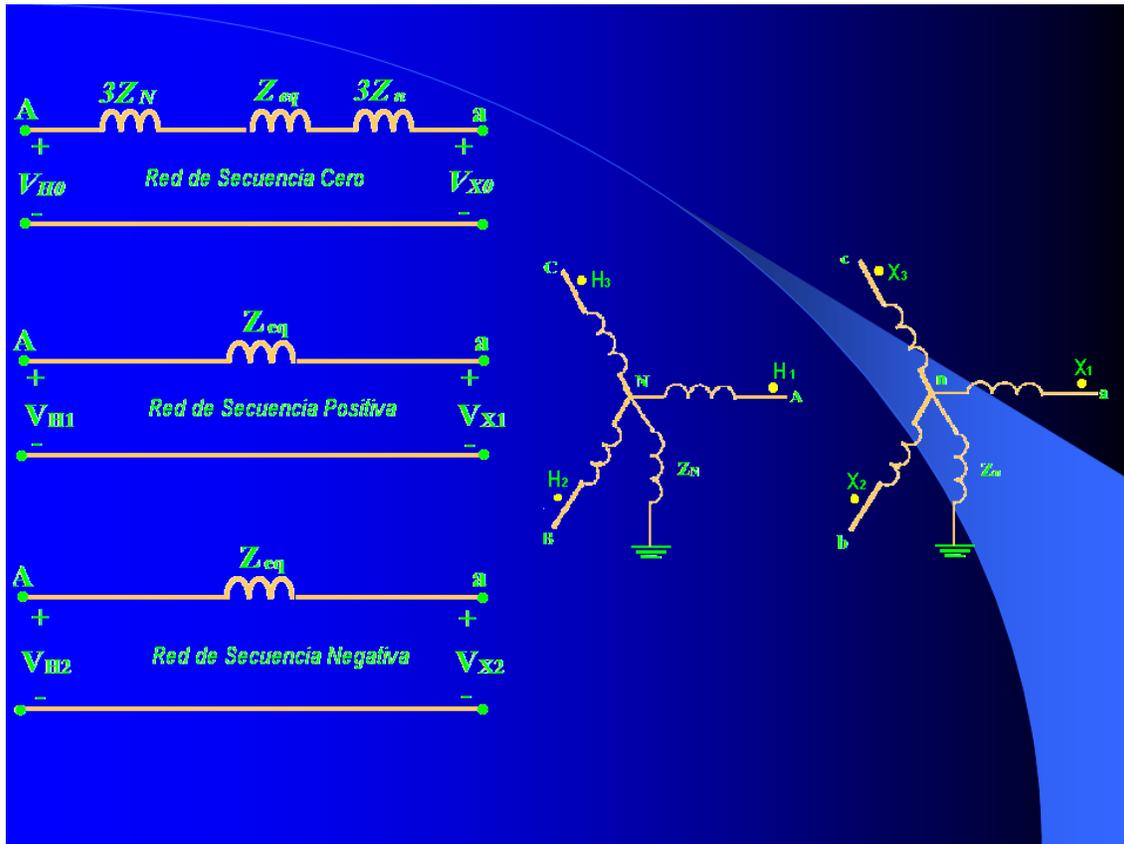


Figura 1.9.- Redes de Secuencia en Por Unidad Conexión Y-Y.

Los voltajes de línea se relacionan con los voltajes de fase según las expresiones:

$$V_{LP} = \sqrt{3} * V_{\phi P} \text{ ----- (1.39)}$$

$$V_{LS} = \sqrt{3} * V_{\phi S} \text{ ----- (1.40)}$$

Los voltajes de línea de primario y secundario guardan la siguiente relación:

$$a = \frac{V_{LP}}{V_{LS}} \text{-----(1.41)}$$

Transformador con conexión Y-Δ.

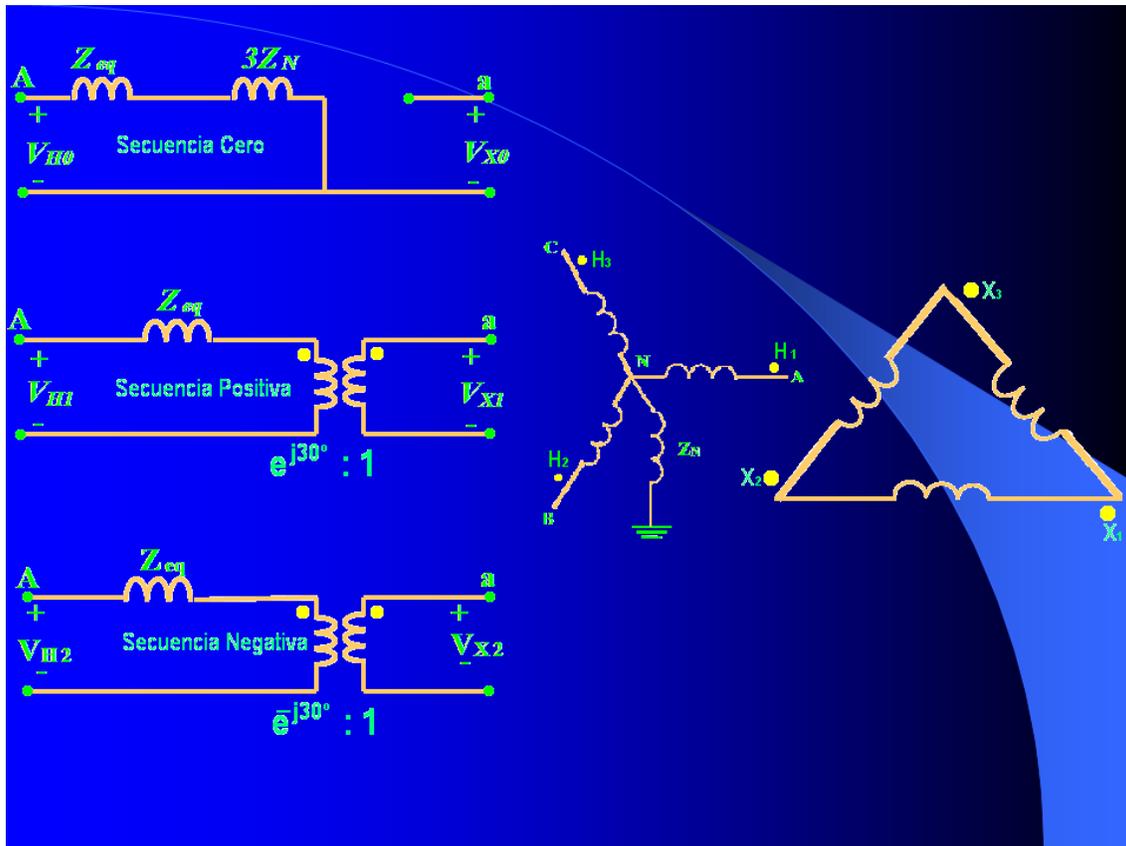


Figura 1.10.- Redes de Secuencia en Por Unidad Conexión Y-Δ.

Los voltajes primarios de línea y de fase cumplen la relación:

$$V_{LP} = \sqrt{3} * V_{\phi P} \text{-----(1.42)}$$

Las tensiones secundarias de línea y fase son iguales:

$$V_{IS} = V_{\phi S} \text{-----(1.43)}$$

La relación de tensiones de fase es:

$$a = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} \text{-----(1.44)}$$

La relación entre los voltajes de línea del primario y secundario es:

$$\sqrt{3} * a = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} \text{-----(1.45)}$$

Transformador con conexión Δ-Y.

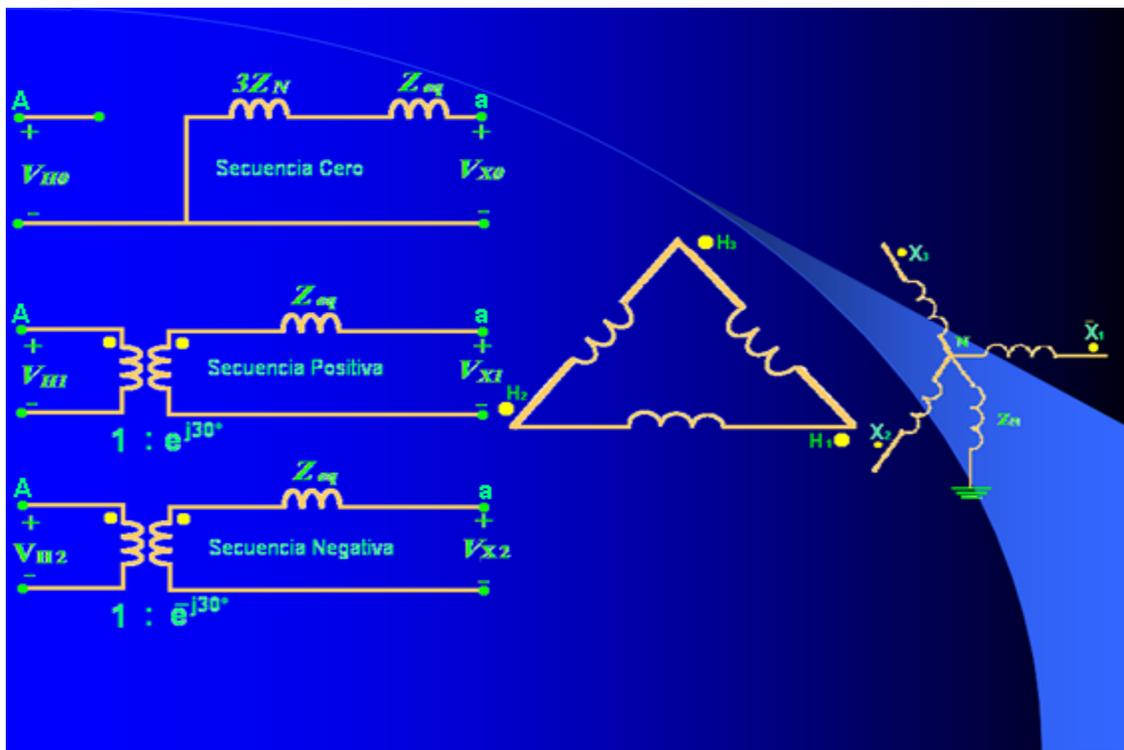


Figura 1.11.- Redes de Secuencia en Por Unidad Conexión Δ-Y.

Los voltajes primarios de línea y de fase son iguales:

$$V_{LP} = V_{\phi P} \text{-----(1.46)}$$

Las tensiones secundarias cumplen la siguiente relación:

$$V_{LS} = \sqrt{3} * V_{\phi S} \text{-----(1.47)}$$

La relación entre tensiones de fase es:

$$a = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} \text{-----} (1.48)$$

La relación entre los voltajes de línea es:

$$\frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{V_{LP}}{V_{LS}} \text{-----} (1.49)$$

Transformador con conexión Δ - Δ .

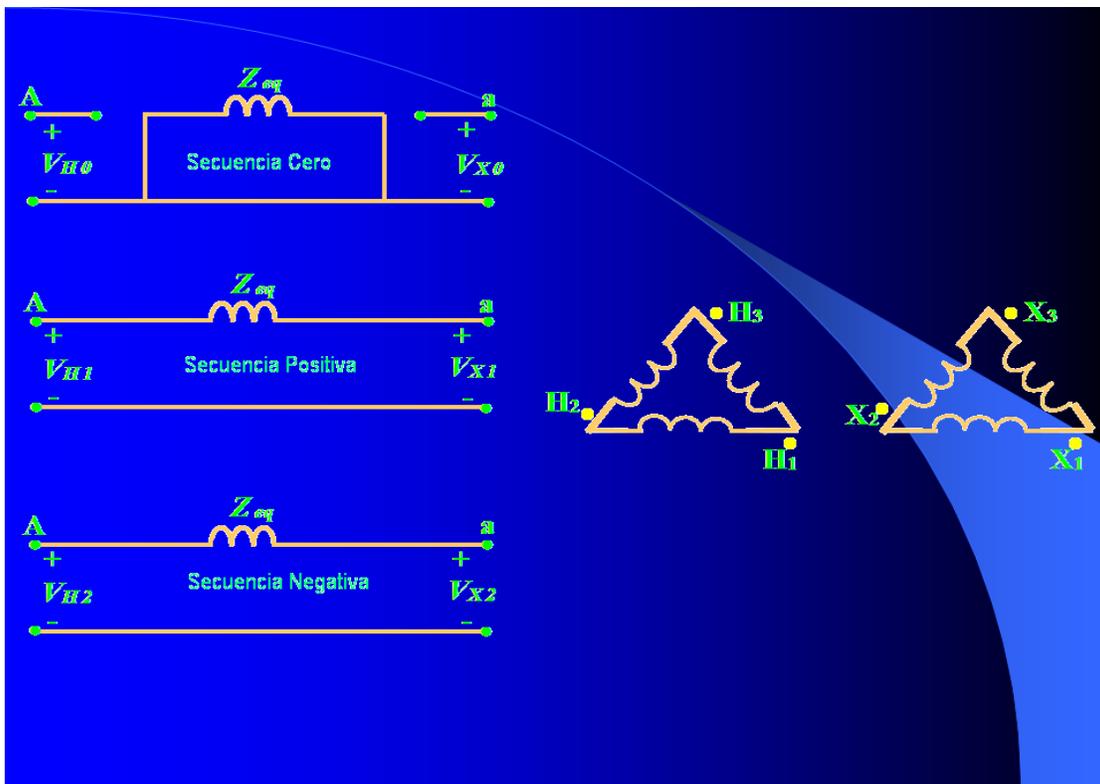


Figura 1.12.- Redes de Secuencia en Por Unidad Conexión Δ - Δ .

Los voltajes de línea y de fase son iguales en el primario y en el secundario:

$$V_{LP} = V_{\phi P} \text{-----} (1.50)$$

$$V_{LS} = V_{\phi S} \text{-----} (1.51)$$

Los voltajes de línea de primario y secundario guardan la siguiente relación:

$$a = \frac{V_{\phi P}}{V_{\phi S}} \text{-----(1.52)}$$

Transformador con conexión Δ -V (delta-delta abierta).

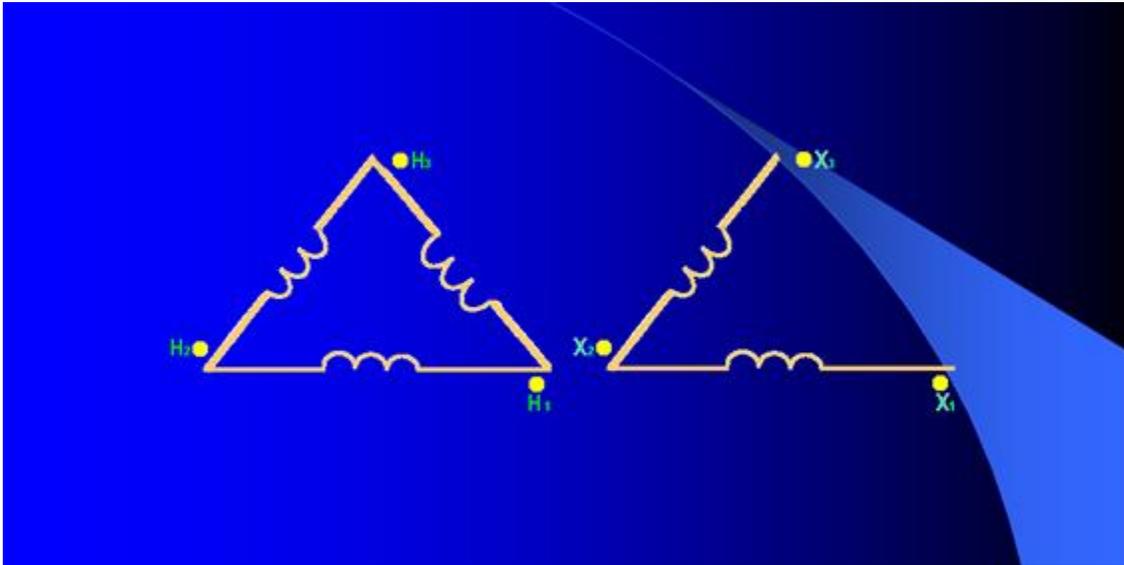


Figura 1.13.- Conexión Δ -V.

Esta puede considerarse como una conexión de emergencia en transformadores trifásicos, ya que si en un transformador se quema o sufre una avería cualquiera de sus fases, puede seguir alimentando una carga trifásica operando el transformador a dos fases, sólo que su capacidad disminuye a un 58.8% aproximadamente.

Los transformadores trifásicos en V - V (delta abierta-delta abierta) se emplean en sistemas de baja capacidad y usualmente operan como autotransformadores.

Conexión en Paralelo.

La operación en paralelo de los transformadores se presenta cuando sus primarios están conectados a una misma fuente y los secundarios a una misma carga.

Ventajas y razones para la operación de transformadores en paralelo.

- Se conectan transformadores en paralelo cuando las capacidades de generación son muy elevadas y se requiera un transformador demasiado grande.
- Para lograr un incremento en la capacidad de una instalación, frecuentemente se presenta el aumento de carga, por lo que es necesario

aumentar esa capacidad. En vez de comprar un transformador más grande, se instala en paralelo con otro ya existente de igual capacidad.

- c) Para dar flexibilidad de operación a un sistema.

Desventajas.

- a) La conexión $Y-\Delta$ tiene como desventaja que el voltaje secundario se desplaza en retraso 30° con respecto al voltaje primario del transformador, lo cual ocasiona problemas en los secundarios si se desea conectar en paralelo con otro transformador, siendo uno de los requisitos para conectar en paralelo, que los ángulos de fase de los secundarios del transformador deben ser iguales.
- b) La conexión en $Y-Y$ en donde las cargas en el circuito del transformador no están equilibradas (es lo que comúnmente ocurre), entonces los voltajes en las fases del transformador pueden llegar a desequilibrarse severamente y los voltajes de terceros armónicos son grandes.

Requisitos para la operación de transformadores en paralelo.

- a) Igual relación de transformación, voltajes iguales en el lado primario y secundario.
- b) Desplazamiento angular igual a cero.
- c) Variación de las impedancias con respecto a las capacidades de los transformadores, en forma inversa.
- d) Las relaciones de resistencias y reactancias deben ser equivalentes.

Dos transformadores trifásicos funcionaran en paralelo si tienen la misma disposición de devanados (por ejemplo, estrella-delta), están conectados con la misma polaridad y tienen la misma secuencia de rotación de fases. Si dos transformadores (o dos bancos de transformadores) tienen la misma tensión nominal, la misma relación de espiras, las mismas impedancias (en porcentaje) y las mismas relaciones entre reactancia y resistencia, se repartirán la corriente de carga proporcionalmente a sus potencias nominales, sin diferencia de fase entre las corrientes de los dos transformadores. Si cualquiera de las condiciones anteriores no se cumple, la corriente de carga puede no repartirse entre los dos transformadores en proporción a sus potencias nominales y puede haber una diferencia de fase entre las corrientes en los dos transformadores.

CAPITULO 2
CONSTRUCCIÓN DEL TRANSFORMADOR.

2.1.- Clasificación por el Tipo de Construcción (Tipo Acorazado y Columnas).

En la siguiente tabla vemos una clasificación general.

Clasificación de los transformadores	Por su núcleo	<ol style="list-style-type: none"> 1) Tipo columna 2) Tipo acorazado 3) Envoltente 4) Radial
	Por su número de fases	<ol style="list-style-type: none"> 1) Monofásico 2) Trifásico
	Por el número de devanados	<ol style="list-style-type: none"> 1) Dos devanados 2) Tres devanados
	Por el medio refrigerante	<ol style="list-style-type: none"> 1) Aceite 2) Aire 3) Líquido refrigerante
	Por el tipo de enfriamiento	<ol style="list-style-type: none"> 1) OW 2) OA 3) OW/A 4) OA/AF 5) OA/FA/FO 6) FOA 7) OA/FA/FOA 8) FOW 9) A/A 10) AA/FA
	O= Aceite	
	A= Aire	
	W= Agua	
	F= Forzada	
Por la conexión de sus devanados	<ol style="list-style-type: none"> 1) Y-Y (estrella-estrella) 2) Y-Δ (estrella-delta) 3) Δ-Y (delta-estrella) 4) Δ-Δ (delta-delta) 	
Por la operación	<ol style="list-style-type: none"> 1) De transferencia 2) De distribución 3) Elevador 4) Reductor 5) De potencia 	
Por la regulación	<ol style="list-style-type: none"> 1) Regulación fija 2) Regulación variable con carga 3) Regulación variable sin carga 	

En cuanto a las disposiciones constructivas, el núcleo determina característica relevantes, de manera que se establece una diferencia fundamental en la construcción de transformadores, dependiendo de la forma del núcleo, estos son el Núcleo tipo columnas y el Núcleo tipo acorazado, existen otros aspectos que establecen diferencias entre tipos de transformadores, como es por ejemplo el sistema de enfriamiento, que establece la forma de disipación del calor producido en los mismos, o bien en términos de su potencia y voltaje para aplicaciones, como por ejemplo clasificar en transformadores de potencia o distribución.

Núcleo tipo columnas: en este diseño las bobinas están enrolladas alrededor del núcleo lo que le da la forma de bobinas cilíndricas, generalmente las bobinas de alta y baja tensión se enrollan concéntricamente, normalmente la bobina de baja tensión se arrolla en la bobina de alta tensión. Existen también los núcleos monofásicos y trifásicos, los núcleos monofásicos tienen dos columnas unidas en las partes inferior y superior por medio de un yugo, en cada una de estas columnas se encuentran incrustados la mitad del devanado primario y la mitad del devanado secundario, en el núcleo trifásico se tienen tres columnas dispuestas sobre el mismo plano unidas en sus partes inferior y superior por medio de yugos. Sobre cada columna se incrustan los devanados primarios y secundarios de una fase.

Las corrientes magnetizantes de las tres fases son distintas entre sí, debido principalmente a que el circuito magnético de las columnas externas es más largo que el correspondiente a la columna central. Este desequilibrio, tomando en cuenta que la corriente magnetizantes de las tres fases es distinta entre sí, debido principalmente que el circuito magnético de las columnas externas es más largo que el correspondiente a la columna central. Este desequilibrio, tomando en cuenta que la corriente de vacío es bastante baja, tiene influencia solamente para las condiciones de operación en vacío.

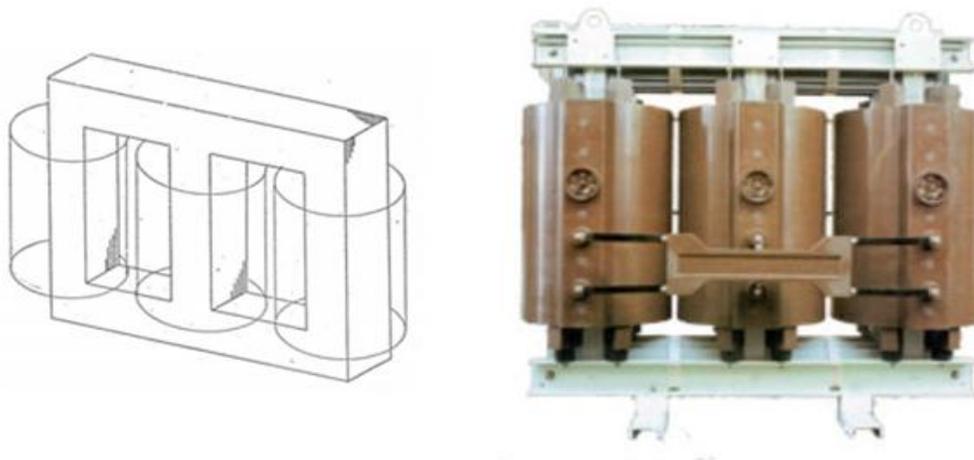


Figura 2.1.- Transformador Tipo Columnas.

Núcleo tipo acorazado: En el núcleo acorazado, los devanados se localizan sobre la columna central, y cuando se trata de transformadores pequeños, las laminaciones se hacen en troqueles. Las formas de construcción pueden ser distintas y varían de acuerdo con la potencia.

Este tipo de núcleo, tiene la ventaja con respecto al tipo columna, de reducir la dispersión magnética, su uso es más común en los transformadores monofásicos.

En el núcleo acorazado los devanados se localizan sobre la columna central, y cuando se trata de transformadores pequeños, las laminaciones se hacen en troqueles. Las formas de construcción pueden ser distintas y varían de acuerdo con la potencia.

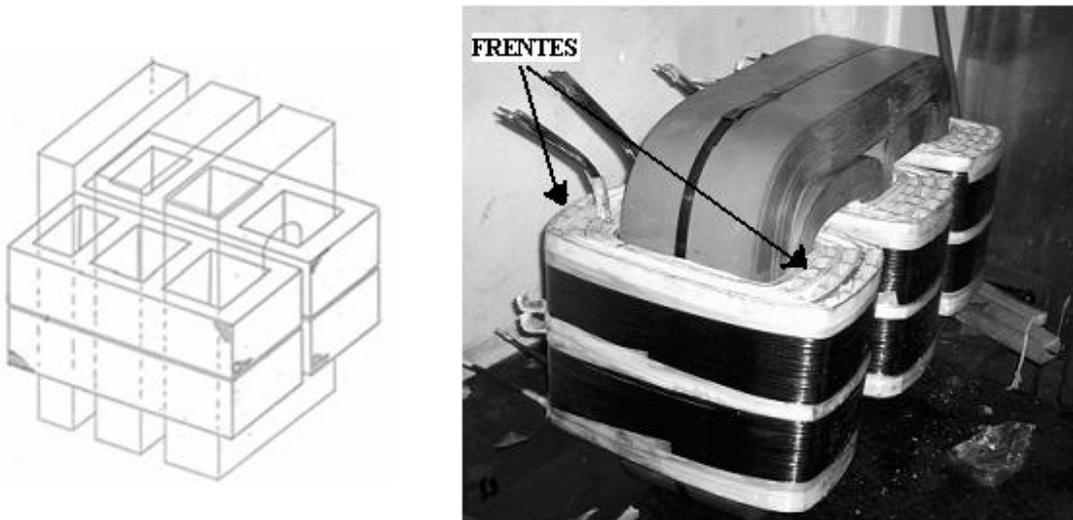


Figura 2.2.- Transformador Tipo Acorazado.

Los núcleos de los transformadores tienen partes que cumplen con funciones puramente mecánicas de sujeción de las laminaciones y estructuras, estas pares o elementos se conocen como “herrajes” o armadura y se complementan con componentes como fibra de vidrio o madera para protección de la sujeción de los yugos.

El hecho que los núcleos sean hechos en dos trozos, hace que aparezcan juntas donde los filos del hierro no coinciden perfectamente, quedando una pequeña luz que se llama entrehierro. Obsérvese en la figura anterior que en el tipo núcleo hay dos entrehierros en el recorrido de las fuerzas, porque los dos laterales son atravesados por la mitad de líneas cada uno.

Los diseños tipo Acorazado son realizados con devanados rectangulares ajustadas en forma, las cuales consisten en una serie de bobinas tipo galleta inter-

conectadas. Los devanados y el paquete de aislamientos son montados verticalmente en la sección inferior del tanque.

El ensamble de aislamientos consiste en barreras de papel prensado (pressboard) de alto valor de rigidez dieléctrica y ductos de aceite colocados estratégicamente y diseñados para controlar las concentraciones de esfuerzos dieléctricos.

En el núcleo acorazado, los devanados se localizan sobre la columna central, y cuando se trata de transformadores pequeños, las laminaciones se hacen en troqueles. Las formas de construcción pueden ser distintas y varían de acuerdo con la potencia.

En el núcleo acorazado, los devanados se localizan sobre la columna central, y cuando se trata de transformadores pequeños, las laminaciones se hacen en troqueles. Las formas de construcción pueden ser distintas y varían de acuerdo con la potencia.

El calor generado por el núcleo y las bobinas es disipado por la circulación de aceite.

El flujo de aceite desde la parte inferior hasta la superior es mantenido gracias a la diferencia en los gradientes de temperatura. La adición de bombas y ventiladores para enfriamiento forzado incrementa el flujo de aceite a través del núcleo y las bobinas, y el flujo de aire a través de los radiadores externos.

En cualquier paso de enfriamiento el aceite circula por los radiadores donde es enfriado antes de volver a entrar por la parte inferior del tanque.

2.2.- Componentes: Núcleo Magnético, Bobinas, Tanques, Aislamiento, Sistema De Enfriamiento, Boquillas.

Núcleo Magnético.

El núcleo constituye el circuito magnético que transfiere energía de un circuito a otro y su función principal es la de conducir el flujo activo.

Está sujeto por el herraje o bastidor, se construye de laminaciones de acero al silicio (4%) y sus gruesos son del orden de 0.014 de pulgadas (0.355mm) con un aislante de 0.001 de pulgada (0.0254 mm).

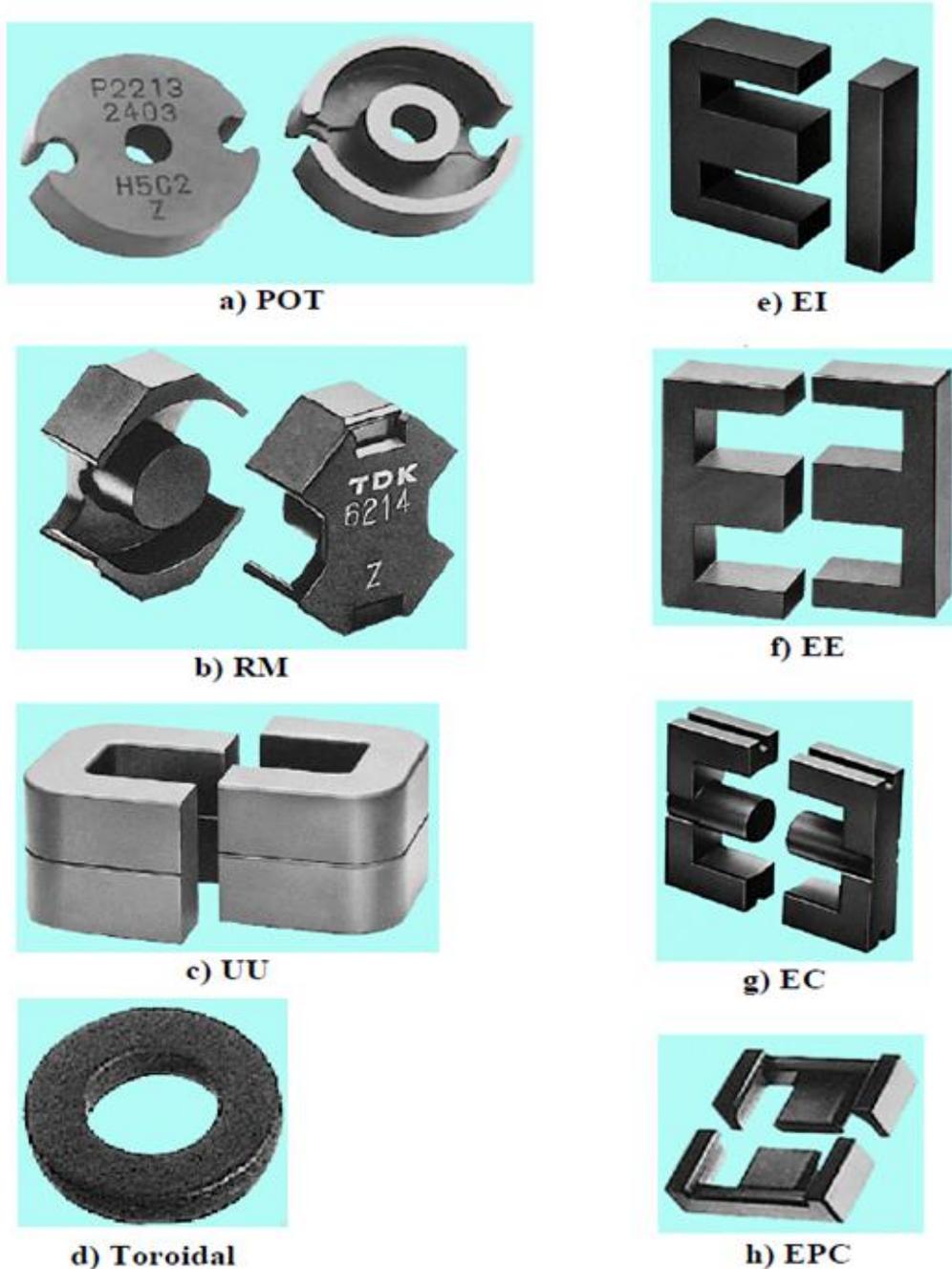


Figura 2.3.- Tipos de Núcleo.

El núcleo magnético está formado por laminaciones de acero que tienen pequeño porcentajes de silicio (alrededor del 4%) y que se denominan “laminaciones magnéticas”, estas laminaciones tienen la propiedad de tener pérdidas relativamente bajas por efecto de histéresis y de corrientes circulantes.

Están formados por un conjunto de laminaciones acomodadas en la forma y dimensiones requeridas. La razón de usar laminaciones de acero al silicio en los

núcleos de las máquinas eléctricas, es que el silicio aumenta la resistividad del material y hace disminuir la magnitud de las corrientes parásitas o circulantes y en consecuencia las pérdidas por este concepto.

En el caso de transformadores de gran potencia, se usan las llamadas “laminaciones de cristal orientado” cuyo espesor es de algunos milímetros y contienen entre 3% y 4% de silicio, se obtienen de material laminado en caliente, después se hace el laminado en frío, dando un tratamiento térmico final a la superficie de las mismas. Este tipo de laminación cuando se sujetan al flujo en la dirección de las laminaciones, presentan propiedades magnéticas mejores que la laminación “normal” de acero al silicio usada para otro tipo de transformadores.

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

Debido a que las bobinas se deben montar bajo un cierto procedimiento y desmontar cuando sea necesario por trabajos de mantenimiento, los núcleos que cierran el circuito magnético, terminan al mismo nivel en la parte que está en contacto con los yugos, o bien con salientes. En ambos casos los núcleos se arman con “juegos” de laminaciones para columnas y yugos que se arman por capas de arreglos “pares” e “impares”.

Cuando se emplean laminaciones de cristal orientado, es necesario que las uniones entre yugos y columnas se realicen con cortes inclinados para evitar trayectorias transversales de las líneas de flujo respecto a tales direcciones.

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

En cuanto a los Yugos, se refiere, no estando vinculados estos con los devanados, pueden ser, entonces, rectangulares, aún cuando pueden tener también escalones para mejorar el enfriamiento.

Laminaciones.

Las chapas utilizadas para la construcción de los núcleos tipo núcleo y tipo acorazado son generalmente de acero al silicio en proporciones de 2 a 4% de este último. Los espesores de estas láminas varían entre 0,3 y 0,5 mm para frecuencias de 50 a 60 ciclos.

Entre chapas debe haber aislación eléctrica lo que se consigue de diferentes formas:

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

- 1) Con una capa de barniz aplicado a una de sus caras.
- 2) Con una hoja de papel muy delgada encalado sobre una cara de la chapa.
- 3) Para un material más económico, produciendo una oxidación superficial con vapor de agua.

Según el tipo de aislación se tienen diferentes efectos sobre el costo de la chapa y sobre la reducción de la sección neta del hierro. Para chapas de 0,35 a 0,5 mm de espesor, puede estimarse que la reducción de sección neta con aislación de barniz o papel es de un 10%.

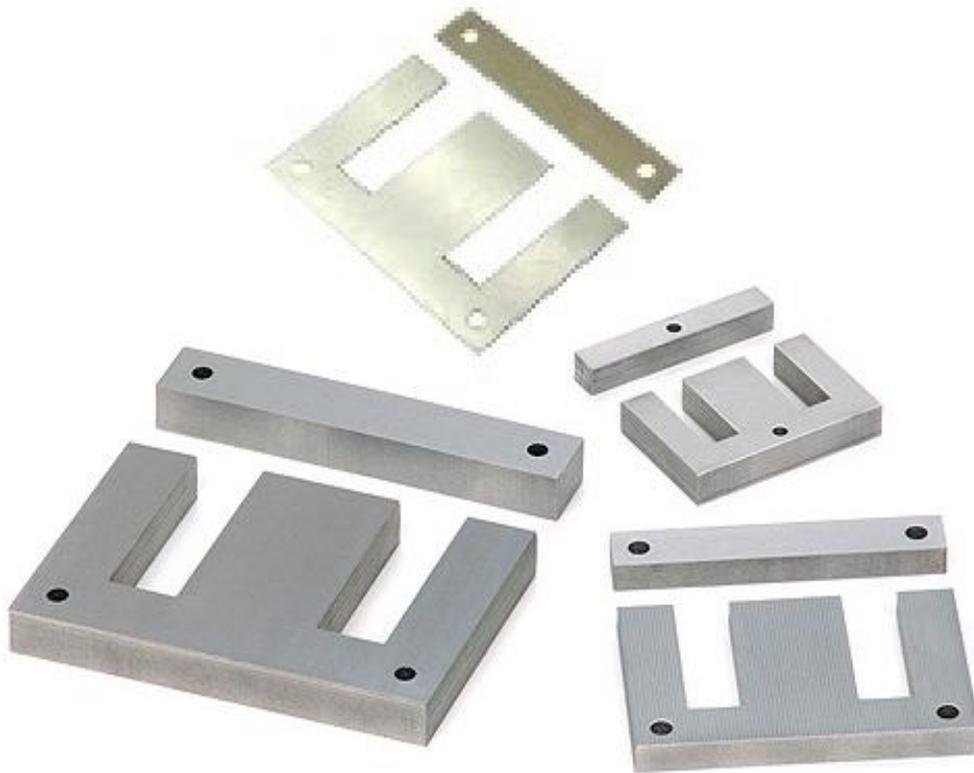


Figura 2.4.- Laminaciones para el Transformador

En los transformadores pequeños se colocan las chapas una a una, alternando las juntas, para dar más solidez al conjunto y evitar piezas de unión entre partes del núcleo. En los grandes, las dos cabezas quedan separadas, y deben sujetarse con pernos roscados.

En los transformadores de gran potencia suele ser necesario formar conductos de refrigeración en la masa del núcleo, para aumentar la superficie de disipación del calor se colocan entonces separadores aislantes, de espesor conveniente para la circulación del aceite.

Tanque, recipiente o cubierta.

El tanque o recipiente es un elemento indispensable en aquellos transformadores cuyo medio de refrigeración no es el aire; sin embargo, puede prescindirse de él en casos especiales. Su función es la de radiar el calor producido en el transformador.

Devanados.

Los devanados primario y secundario son concéntricos sobre un soporte aislante único. Por lo general, se usan conductores de cobre esmaltado devanados en espiral y con capas sobrepuestas. Por lo general, el devanado de menor tensión se instala más cerca del núcleo interponiendo un cilindro de papel aislante y mediante separadores, se instala en forma concéntrica el devanado de tensión mayor. Los extremos de los devanados (denominados también principio y final del devanador) se protegen con aislante de forma de tubo conocido como “espagueti”.

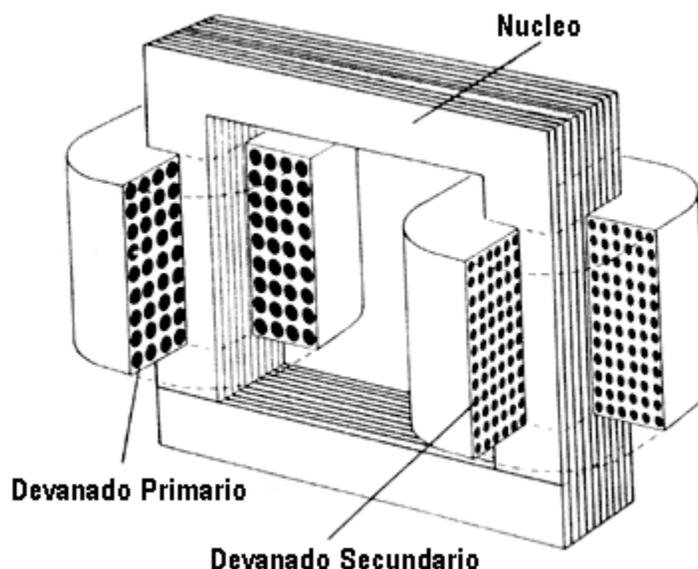


Figura 2.5.- Devanados de un Transformador Monofásico.

Existen 3 diferentes tipos de devanados:

- 1) Devanados para transformadores de distribución.
- 2) Devanados de baja tensión.
- 3) Devanados de alta tensión.

Devanados para transformadores de distribución.

En estos transformador, las diferencia entre las tensiones primaria y secundaria es notable, por ejemplo, los transformados para redes de distribución de 13200 volts

a las tensiones de utilización de 220/127 volts debido a estas diferencias, se emplean criterios constructivo distintos a son considerados en los transformadores pequeños de baja tensión y se dividen en devanados de baja tensión y de alta tensión.

Devanados de baja tensión.

Están constituidos por lo general, de una sola espiral (algunas veces en dos o tres capas sobrepuestas), con alambre rectangular aislado. El conductor se usa generalmente para potencia pequeñas y tiene diámetros no superiores a 3 o 3.5 mm. El aislamiento de los conductores cuando son cilíndricos puede ser de algodón o de papel, pero raramente de conductor esmaltado en el caso de que los transformadores no sean enfriados por aceite.

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

Devanados de alta tensión.

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

Con respecto a las características constructivas, se tienen variantes de fabricante a fabricante, hay básicamente dos tipos, el llamado “tipo bobina” formados de varias capas de conductores, estas bobinas tienen forma discoidal, estas bobinas se conectan por lo general en serie para dar el número total de espiras de una fase. El otro tipo es el llamado “de capas” constituido por una sola bobina con varias capas, esta bobina es de longitud equivalente a las varias bobinas discoidales que constituirían el devanado equivalente, por lo general, el número de espiras por capa en este tipo de devanado es superior al constituido de varias bobinas discoidales.

Como aspectos generales, se puede decir que el primer tipo (bobinas discoidales), da mayor facilidad de enfriamiento e impregnarse de aceite, debido a que dispone de canales de circulación más numerosos, también tiene la ventaja de que requiere de conductores de menor diámetro equivalente al otro tipo, da mayor facilidad constructiva. Este devanado tiene la desventaja de ser más tardado en su construcción.

Las bobinas discoidales se conocen también como “tipo galleta” en algunos casos, se forman cada una, de un cierto número de conductores dispuestos en capas y aisladas estas capas entre sí por papel aislante, cada bobina al terminar se

“amarra” con cinta de lino o algodón para darle consistencia mecánica y posteriormente se les da un baño de barniz y se hornean a una cierta temperatura, con lo cual adquiere la rigidez mecánica necesaria. Cada bobina, está diseñada para tener una tensión no superior a 1000-1500 volts, por lo que para dar la tensión necesaria para una fase, se deben colocar varias bobinas en serie.

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

Una de las construcciones más típicas de los devanados se puede hacer con relación a la potencia del transformador, para tal fin existen devanados para transformadores de baja potencia, que son más fáciles de realizar, por ejemplo de 1000 a 2000 KVA.

Sistema de Aislamiento.

Los sistemas de aislamiento usados en transformadores de potencia comprenden sistemas líquidos y sistemas gaseosos. En ambos casos se usa también algo de aislamiento sólido. Los sistemas líquidos incluyen aceite, que es el más usado, y askarel, que se usa para evitar la combustibilidad. Los sistemas gaseosos incluyen nitrógeno, aire y gases fluorados (por ejemplo, hexafluoruro de azufre SF₆). Los gases fluorados se usan para evitar la combustibilidad y limitar los efectos secundarios de defectos internos.

El aislamiento principal separa el devanado de alta tensión del devanado de baja tensión. Este aislamiento soporta la tensión más elevada y ocupa el espacio más limitado; por esta razón, generalmente funciona con las solicitaciones más elevadas. Según la construcción, puede utilizarse el aislamiento de capas o el aislamiento de bobinas entre las distintas secciones de los devanados. El aislamiento de espiras se aplica a cada cable del conductor o a grupos de cables que formen una espira única.

La resistencia de aislamiento se mide por medio de un aparato conocido como “MEGGER”. El megger consiste de una fuente de alimentación en corriente directa y un sistema de medición. La fuente es un pequeño generador que se puede accionar en forma manual o eléctricamente. La escala del instrumento está graduada para leer resistencias de aislamiento en el rango de 0 a 10,000 megohms.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

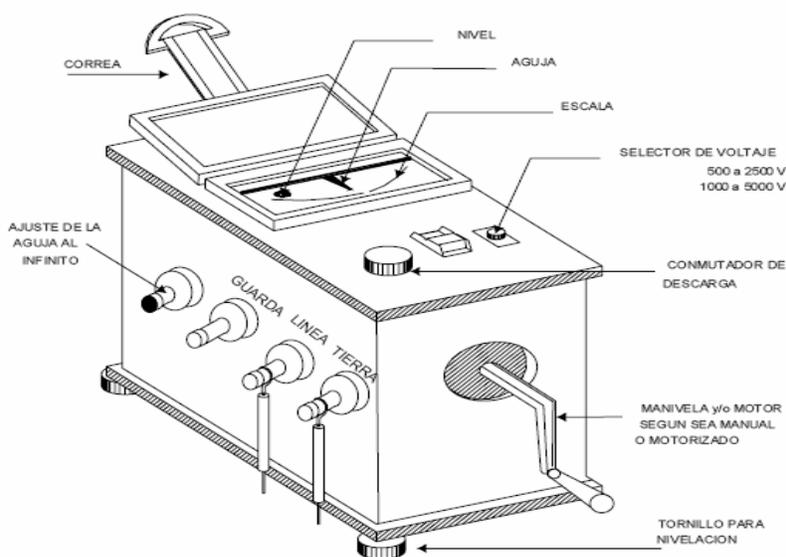


Figura 2.5.- Megger.

La resistencia de aislamiento de un transformador se mide entre los devanados conectados todos entre sí, contra el tanque conectado a tierra y entre cada devanado y el tanque, con el resto de los devanados conectados a tierra.

Para un transformador de dos devanados se deben tomar las siguientes medidas:

- Entre el devanado de alto voltaje y el tanque con el devanado de bajo voltaje conectado a tierra.
- Entre los devanados de alto voltaje y bajo voltaje conectados entre sí, contra el tanque.

Los transformadores dependen del comportamiento de sus aislamientos para las condiciones normales de operación, por esta razón las asociaciones de fabricantes de equipo eléctrico han designado cuatro tipos de aislamientos:

Aislamiento Clase A: Diseñado para operar a no más de 55 °C de elevación de temperatura, para en los transformadores tipo seco, prevenir accidentes con materiales combustibles.

Aislamiento Clase B: La Elevación de temperatura puede no exceder los 80 °C en las bobinas, por lo general son más pequeños que los que usan aislamiento Clase A.

Aislamiento Clase F: Esta clasificación se relaciona con elevaciones de temperatura en las bobinas de hasta 115 °C. Por lo general, corresponden a transformadores pequeños tipo distribución de hasta 25 °C.

Aislamiento Clase H: Esta clase de materiales aislantes permiten diseñar para elevaciones de temperatura de 150 °C cuando esta operando el transformador a una temperatura ambiente de 40 °C, para que alcance hasta los 190 °C y con el punto más caliente no exceda a 220 °C. Los materiales aislantes de clase H son: mica, fibra de vidrio, asbestos, elastómeros y silicones o resinas a base de estos.

Cuando se trata de transformadores con tres devanados las mediciones que se deben efectuar son las siguientes:

Alto voltaje (primario) Vs. Tanque con los devanados de bajo voltaje (secundario) y medio voltaje (terciario) a tierra.

- Medio voltaje (terciario) Vs. Tanque con los devanados e alto voltaje y bajo voltaje a tierra.
- Bajo voltaje (secundario) Vs. Tanque, con los devanados de alto voltaje y medio voltaje a tierra.
- Alto voltaje y medio voltaje juntos Vs. Tanque, con el devanado de bajo voltaje a tierra.
- Alto voltaje + medio voltaje + bajo voltaje Vs. Tanque.

El aislamiento eléctrico se degrada con el paso del tiempo debido a los diferentes factores al que es expuesto durante su vida normal de trabajo. El aislamiento debe ser sometido a pruebas periódicas con el fin de evaluar su estado de degradación. La mayoría de los fabricantes exigen que se haga esta prueba antes de energizar el transformador con el fin de descartar fallas que se puedan presentar debido a un mal proceso de almacenamiento o embarque. Esta prueba puede detectar partes aterrizadas del equipo, lo cual se puede dar por mala manipulación en los diferentes procesos de transporte, cargue y descargue. Se debe medir la resistencia de aislamiento en cada devanado, de acuerdo al estándar ANSI/IEEE C57.12.91. El transformador debe estar des energizado y eléctricamente aislado con todos los terminales de cada devanado cortocircuitados. Los devanados que no van a ser probados se deben aterrizar.

La prueba de resistencia de aislamiento en transformadores sirve no solo para verificar la calidad del aislamiento en transformadores, también permite verificar el grado de humedad y en ocasiones defectos severos en el aislamiento.

La vida del transformador es realmente la vida del sistema aislante. La mayoría de los transformadores usan sistemas de aislamiento líquido (aceite de transformador) y aislamiento sólido (papel Kraft, papel prensado, madera y productos de celulosa). Un gran porcentaje de las fallas presentadas en el transformador se atribuyen a fallas en dicho sistema de aislamiento.

Tipos de Aislamiento de un Transformador.

Madera: En electrotecnia se emplean por lo general maderas duras, como el roble y el nogal, el principal inconveniente de la madera es que es higroscópica, su rigidez dieléctrica disminuye en presencia de humedad o lluvia, [1] puede emplearse como aislante contra sobretensiones atmosféricas, sobre los postes de madera utilizados en líneas de distribución eléctrica.

Papel: Se fabrica con pulpa de madera o fibras vegetales, el más utilizado como papel aislante es el papel Kraft el cual puede impregnarse fácilmente, [1] se emplea para aislamientos de conductores y cables, para hojas laminadas y tubos impregnados o como refuerzo en aislamientos compuestos, mediante la impregnación del papel con barnices, aceites, resinas se consiguen varios resultados:

- Se llenan los poros del papel y se tiende a eliminar la humedad.
- Aumenta la rigidez dieléctrica.
- Aumenta la resistencia al calor.
- Se reduce la tendencia a la contracción.
- Aumenta la conductividad térmica del papel, resultando de ello una mejor eliminación de calor.

Existen otros tipos de aislamientos que son el aceite y se dividen en:

Aceites aislantes: Son hidrocarburos refinados de depósitos de petróleo crudo, se emplean en transformadores e interruptores por inmersión de estos equipos, además de su utilización en la fabricación de barnices aislantes, una de las ventajas de todos los aceites aislantes es su propiedad de auto regenerarse después de una perforación dieléctrica o una descarga disruptiva, aunque si esta es muy elevada, puede sobrecalentar el aceite provocando su combustión.

Aceites minerales: Se utiliza en todas las aplicaciones electrotécnicas que necesitan aceites aislantes (interruptores, condensadores, mufas y transformadores) la constante dieléctrica de los aceites minerales es baja, ya que ellos son esencialmente no polares, la resistencia dieléctrica varía considerablemente con el estado de pureza; es económico en comparación con otros aceites aislantes, se inflama cuando es descompuesto por el calor o por el arco eléctrico ya que entre sus productos de descomposición se encuentra el hidrógeno que reacciona violentamente con el oxígeno y esta reacción produce incendio y explosión. En interruptores los aceites minerales deben actuar no solamente como aislamiento entre las partes conductoras sino también apagar rápidamente el arco de ruptura en el momento de la desconexión. En transformadores debe aislar los devanados entre sí y con la cuba del transformador para evitar cualquier posibilidad de arco eléctrico y al mismo tiempo actuar como agente refrigerante evacuando las pérdidas caloríficas producidas en el devanador efecto Joule, corrientes parásitas, etc.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Siliconas: Poseen gran estabilidad térmica, buena inercia química, muy pequeña tensión interfacial, excelentes propiedades dieléctricas, resistencia al oxígeno, al ozono y al efecto corona, resistencia a los agentes químicos agresivos, ausencia de envejecimiento a los agentes climatológicos y excelente resistencia a las sobrecargas a frecuencia industrial.

Boquillas terminales.

La boquilla permite el paso de la corriente a través del transformador y la evita que haya un escape indebido de corriente y con la protección contra flameo.



Figura 2.6.- Accesorios para Transformadores.

CAPITULO 3
CORTOCIRCUITO EN SISTEMAS DE POTENCIA.

3.1- Concepto de Cortocircuito.

El cortocircuito es una falla que se manifiesta como un régimen anormal de operación en un sistema eléctrico de potencia.

Los parámetros de calidad en un sistema eléctrico de potencia son:

- 1) Tensión.
- 2) Frecuencia.
- 3) Forma de onda.
- 4) Continuidad.

Las condiciones de operación de un sistema eléctrico de potencia durante su proceso de explotación son:

- 1) Régimen normal o estable.
- 2) Régimen anormal.
- 3) Falla de cortocircuito.

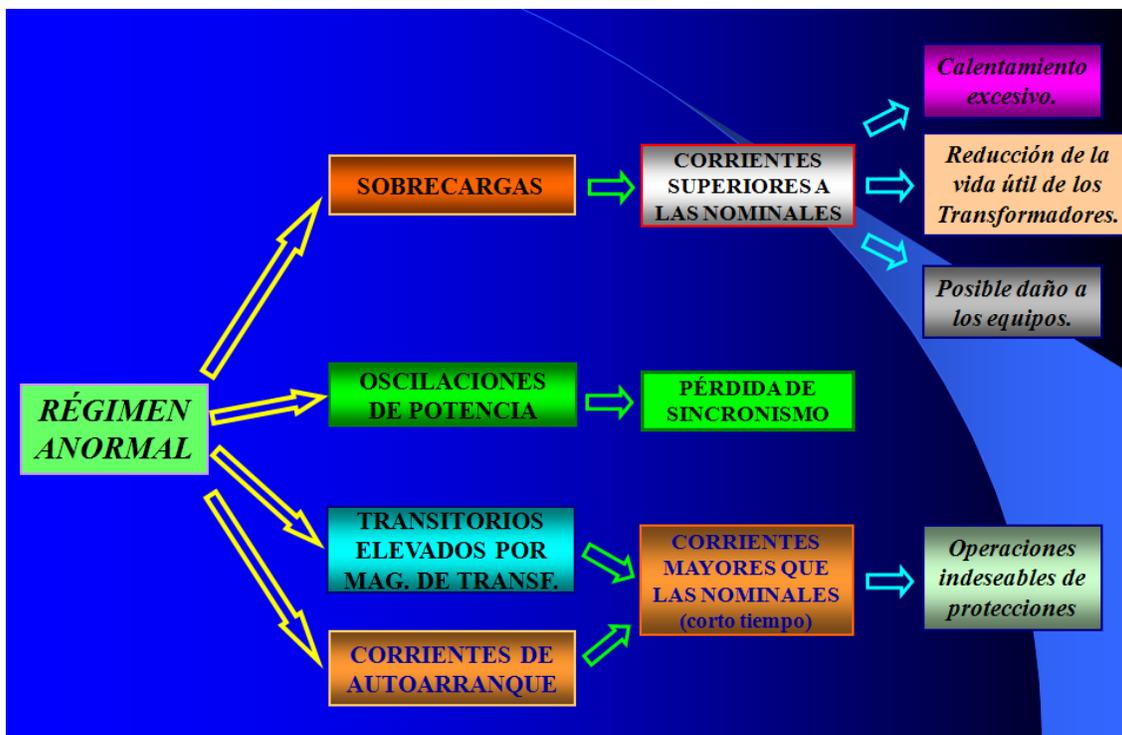


Figura 3.1.- Representación Esquemática de un Régimen Anormal.

El Cortocircuito tiene un impacto directo sobre la Seguridad Eléctrica y la Producción continua en la planta. Una combinación de nivel de Cortocircuito elevado y una mala selección de las capacidades interruptoras de los equipos,

puede desatar una explosión o un incendio en caso de que se llegase a presentar una pérdida de aislamiento en el Sistema Eléctrico.

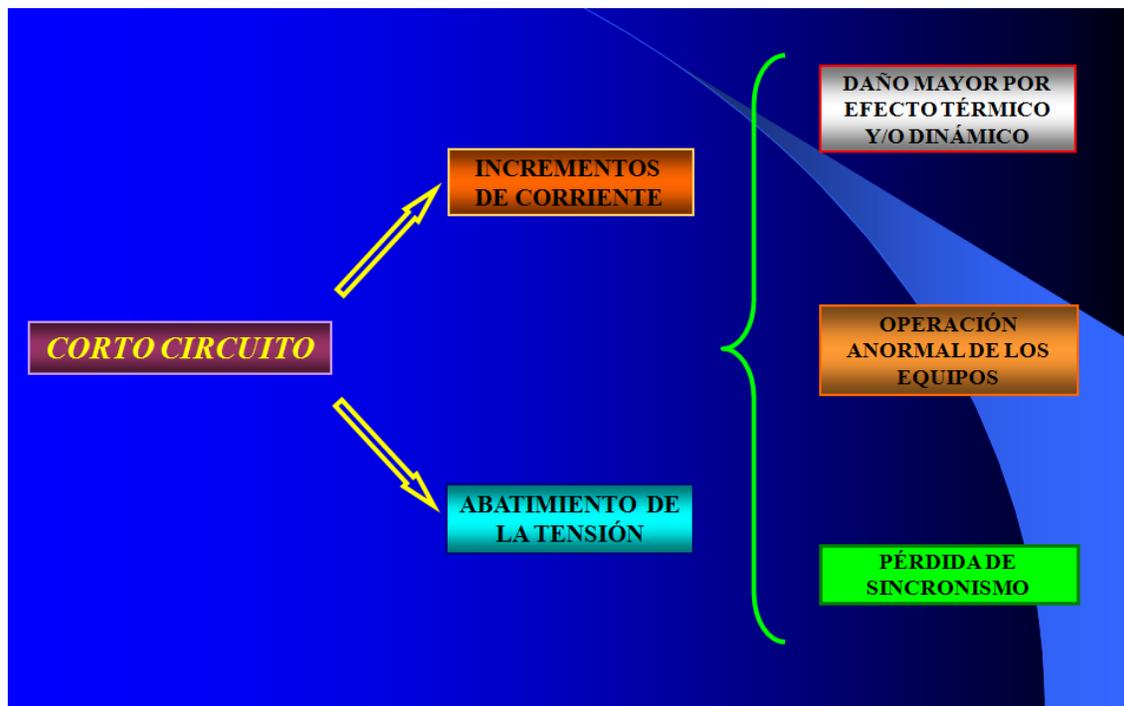


Figura 3.2.- Consecuencias de un Cortocircuito en un Sistema Eléctrico de Potencia.

3.2.- Tipos de Falla en Sistemas de Potencia.

- 1) Cortocircuito Trifásico.- Consisten en el contacto de las tres fases, directamente o a través de una impedancia de valor bajo, en el caso de las tres fases se le denomina fallo simétrico y los restantes son fallos asimétricos. Un ejemplo de cortocircuito trifásico es la caída de una torre de transmisión. Este tipo de cortocircuitos es el más grave en el sistema, produciendo las mayores corrientes. Por consiguiente, debe ser detectado rápidamente y eliminada la fuente de fallo del sistema (por medio de la actuación del sistema de protección) en el plazo menor posible. Desde el punto de vista de análisis, es el más simple de ser calculado, porque al estar involucradas las tres fases en la misma forma las corrientes de cortocircuito son iguales en las tres fases, siendo representado por un sistema de corrientes simétrico.
- 2) Cortocircuito Línea a Línea o Bifásico.- Los corto circuitos línea a línea o bifásicos consisten en el contacto de dos fases entre si. Como ejemplos de cortocircuito bifásico puede citarse: el roce de dos fases en líneas aéreas y la falla de aislamiento puntual en cables aislados. Este tipo de cortocircuito

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

produce un sistema desequilibrado de corrientes, con intensidades diferentes en las tres fases.

- 3) Cortocircuito Línea a Tierra o Monofásico.- El cortocircuito monofásico (contacto de una fase y tierra) es responsable de la mayor cantidad de cortocircuitos en el sistema (en líneas aéreas, 85% de los cortocircuitos son monofásicos). Las corrientes de cortocircuito que provoca dependen de la impedancia de la falla y de las conexiones a tierra de los transformadores en la línea.
- 4) Cortocircuito Doble Línea a Tierra o Bifásica a Tierra.- En este tipo de cortocircuitos, dos de las fases toman contacto entre sí y con la tierra en el punto de fallo. Es este el tipo de cortocircuito que ocurre con menos frecuencia.

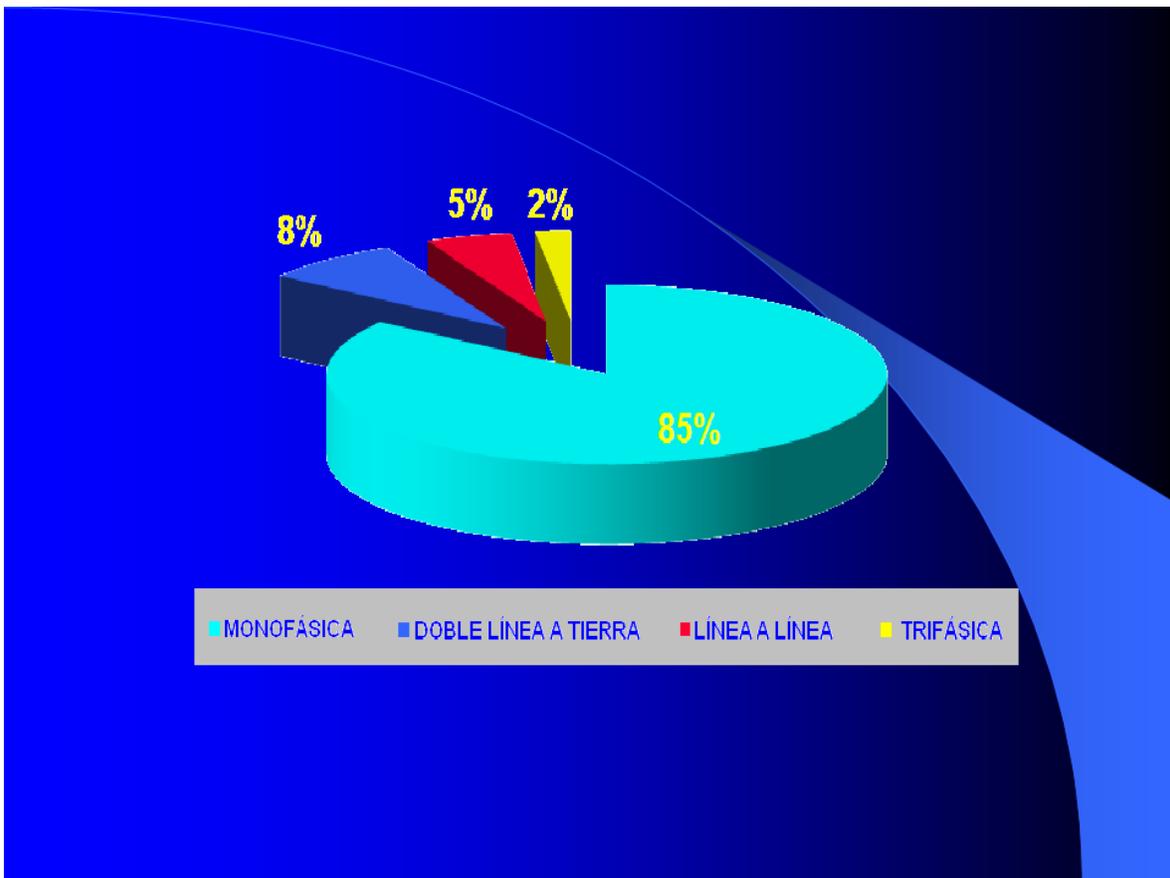


Figura 3.3.- Probabilidad de fallas en sistemas de distribución.

Los cortocircuitos trifásicos son los defectos que producen las mayores exigencias de corriente en el sistema. Un cortocircuito trifásico que se prolongue en el tiempo puede producir daños físicos en el equipamiento de la red (quema de

transformadores, generadores, etc.), que impidan restablecer la entrega de electricidad en un plazo corto.

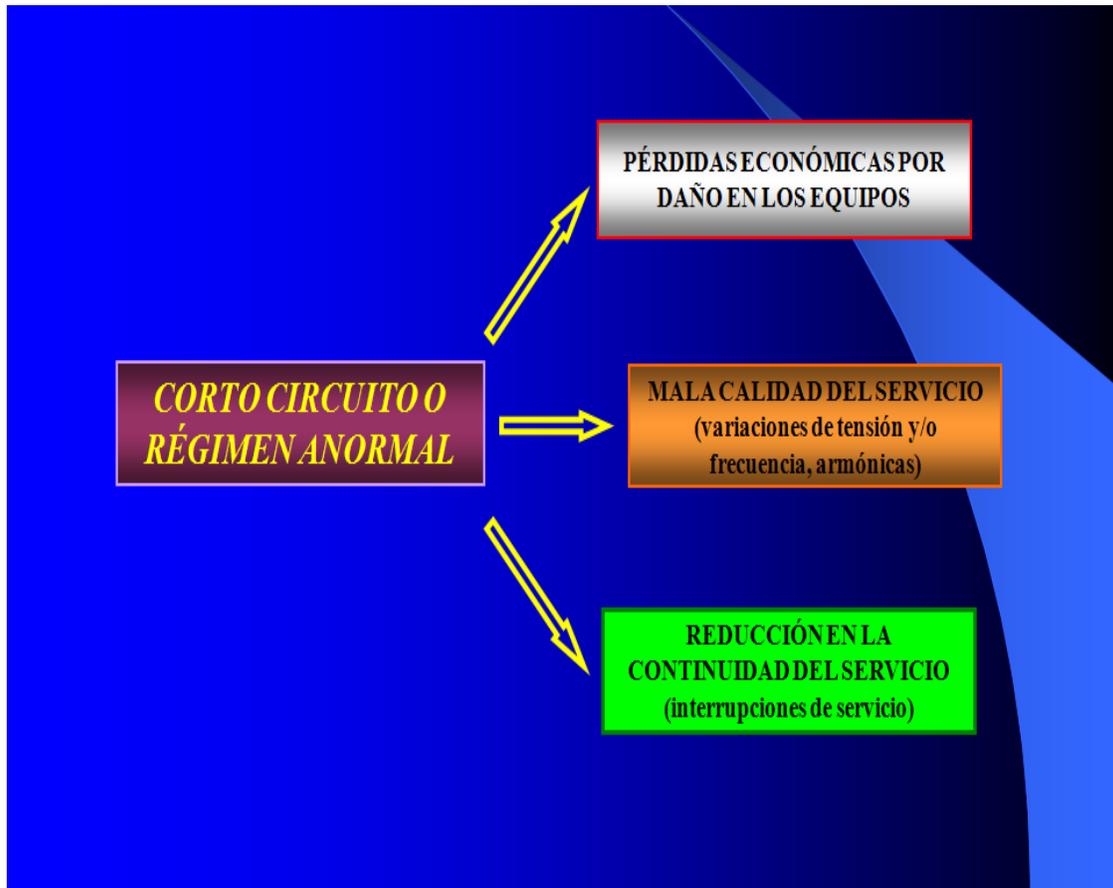


Figura 3.4.- Efectos del Cortocircuito

Por consiguiente, el cortocircuito debe ser detectado y eliminado en el menor tiempo posible.

A fin de detectar que se ha producido un cortocircuito, se debe analizar el circuito cuando se produce la falla y comparar las corrientes que se producen con el defecto y en situación normal de funcionamiento.

Cuando se produce un cortocircuito, los equipos del sistema tienden a comportarse en una forma distinta a cuando están en operación normal, debiéndose muchas veces utilizar otros modelos para su representación.

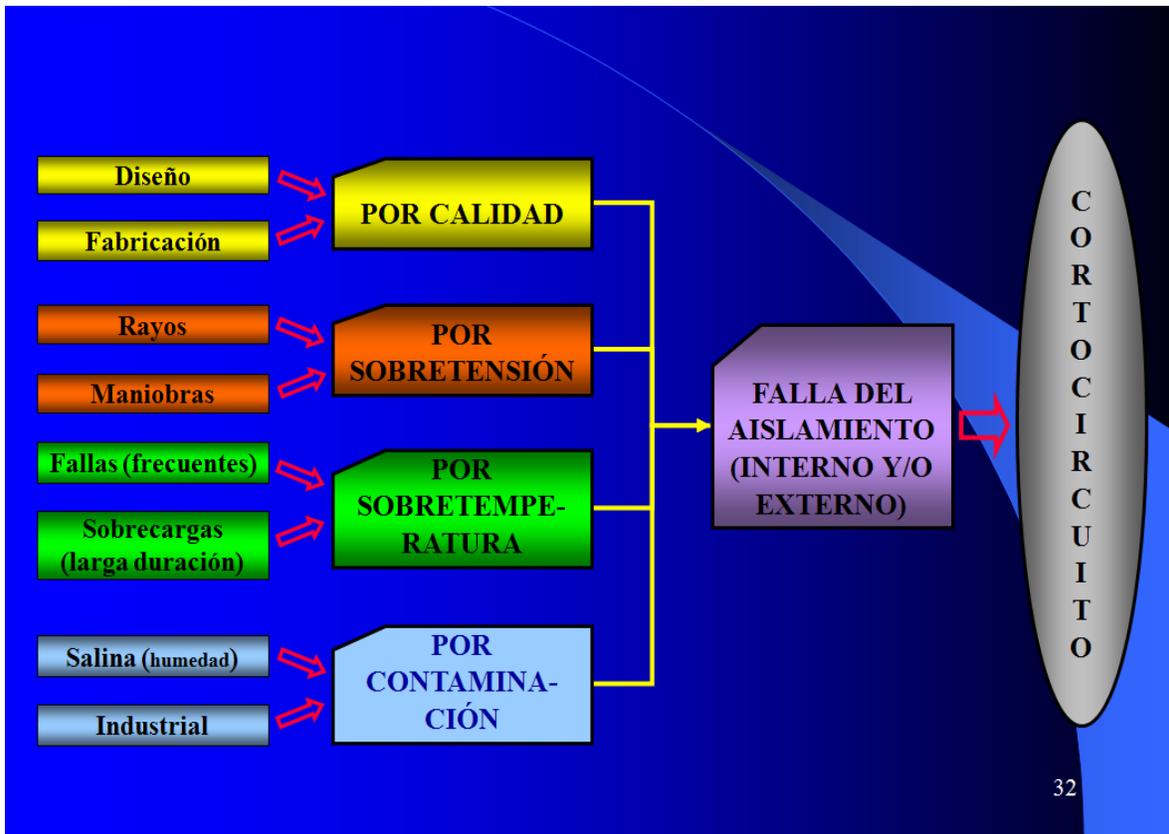


Figura 3.5.- Causas de un Cortocircuito.

Los transformadores eléctricos se ven sujetos durante su vida útil a condiciones de corto circuito de mayor o menor severidad y ocurrencia. Estos equipos deben ser diseñados y construidos para soportar, sin daño, las fuerzas electromagnéticas producidas por la corriente de corto circuito. Al mismo tiempo, los materiales empleados en la construcción, tanto conductores como aislantes, deben ser capaces de soportar sin deterioro significativo las altas temperaturas producidas por la corriente de falla.

Para lograr lo anterior se deben tomar en cuenta tres factores principales:

- Los diseños deben contemplar los requerimientos resultantes de las condiciones más críticas de la operación.
- Las tolerancias dimensionales de la fabricación deben ser controladas dentro de los márgenes que el mismo diseño les impone.
- Las pruebas de prototipos, deben ser representativas y sus criterios de evaluación adecuados.

De acuerdo a la Ley sobre Instalaciones, Suministro y Uso de la Energía Eléctrica (NOM-001-SEDE-1999) en el art. 110-9, 110-10. "Todos los equipos destinados a interrumpir corrientes de falla deben tener una capacidad interruptora nominal

suficiente para la tensión nominal del sistema y la corriente disponible en sus terminales de entrada. Además es requisito indispensable tener este Estudio actualizado en las auditorías de la certificación ISO 14000.

Para elaborar un estudio de Cortocircuito será necesario tener actualizado el diagrama unifilar del Sistema Eléctrico con los siguientes datos:

- 1) Calibre de cables.
- 2) Longitudes de cables.
- 3) Datos de transformadores
- 4) Datos de Motores.
- 5) Contribución de Corto Circuito de CFE.
- 6) Tipo de canalizaciones.

Fallas trifásicas en sistemas de potencia:

Con el fin de calcular la corriente de falla subtransitoria para un corto circuito trifásico en un sistema de potencia, hacemos las siguientes suposiciones:

- 1) Los transformadores son representados únicamente por sus reactancias de dispersión.
- 2) Las líneas de transmisión, únicamente se representan por sus reactancias serie equivalentes de secuencia positiva.
- 3) Las maquinas síncronas se representan por fuentes de voltaje constante detrás de sus reactancias subtransitorias.
- 4) Todas las impedancias de carga no rotativas, se desprecian.
- 5) Los motores de inducción, se desprecian (< 50 hp) o se representan en la misma forma que las máquinas síncronas.
- 6) En sistemas de distribución, las resistencias de las líneas primarias y secundarias, reducen significativamente las magnitudes de las corrientes de falla, por lo que deberán tomarse en cuenta en los cálculos de cortocircuito.

Es común que los valores de corto circuito trifásico en los buses de transmisión en los cuales se conectan las subestaciones de Distribución, se den en “Corrientes de Cortocircuito” o en “Potencia de corto circuito”, por lo cual para hacer un cálculo manual de Cortocircuito en los diferentes buses de las instalaciones de distribución es necesario determinar la impedancia de thévenin del sistema hasta ese punto.

Si para la falla trifásica nos dan el valor de la “corriente de corto circuito” en amperes, entonces la impedancia de thévenin de secuencia positiva del sistema hasta el bus de transición Transmisión-Distribución se obtiene de la siguiente forma.

Si la corriente de cortocircuito trifásico es:

$$I_{CC3\phi Amperes} = \left(\frac{V_{Fp.u.}}{Z_{1p.u.}} \right) \leftarrow_{BAmperes} \text{-----} (3.1)$$

Entonces si ($V_{Fp.u.} = 1p.u.$), entonces:

$$Z_{1p.u.} = \left(\frac{I_{BAmperes}}{I_{CC3\phi Amperes}} \right) \text{-----} (3.2)$$

Si la “potencia de corto circuito” se calcula de la siguiente manera. Tomando en cuenta que para fallas trifásicas solo se presentan corrientes de secuencia positiva:

$$S_{CC3\phi MVA} = (V_{Fp.u.} \times I_{1p.u.}) \leftarrow_{B3\phi MVA} \text{-----} (3.3)$$

$$Y \text{ si: } I_{1p.u.} = \frac{V_{Fp.u.}}{Z_{1p.u.}} \text{-----} (3.4)$$

Entonces la ecuación 3.3 se convierte en:

$$S_{CC3\phi MVA} = \left[V_{Fp.u.} \times \left(\frac{V_{Fp.u.}}{Z_{1p.u.}} \right) \right] \leftarrow_{B3\phi MVA} \text{-----} (3.5)$$

Finalmente si $V_{Fp.u.} = 1p.u.$, entonces:

$$Z_{1p.u.} = Z_{2p.u.} = \frac{S_{B3\phi MVA}}{S_{CC3\phi MVA}} \text{-----} (3.6)$$

3.3- Metodología de Análisis de Fallas en Sistemas de Potencia Utilizando Componentes Simétricas.

Definición de componentes simétricas.

Las propiedades de las componentes simétricas tienen las siguientes consecuencias prácticas con respecto a las corrientes y tensiones. En un sistema sin retorno de tierra o sin conductor de neutro la suma de las tres corrientes es igual a cero. Su transformación en componentes simétricas contiene componentes de secuencia directa e inversa pero no componente de secuencia cero. Las corrientes de un sistema conectado en delta tiene esta propiedad. (También un sistema conectado en estrella, con el neutro aislado).

Si hay corriente de neutro a tierra o a través de un conductor de neutro (cuarto conductor), entonces el sistema de corrientes de fase puede tener componente de secuencia cero. Esta es una condición normal en un sistema de distribución con cuatro conductores con cargas monofásicas entre fase y neutro. Las líneas de transmisión de alta tensión normalmente funcionan intencionalmente sin ninguna corriente de neutro. Aunque existen cargas asimétricas, estas mas bien tienen el carácter de cargas entres dos fases que da por resultado componente de secuencia negativa, pero no de secuencia cero, sólo durante las fallas a tierra se presentan corrientes de secuencia cero. Los sistemas de alta tensión frecuentemente tienen los transformadores con arrollamientos conectados en estrella con neutro conectado a tierra directamente, para limitar las corrientes de falla monofásicas cuando varios transformadores están en paralelo sólo alguno está conectado a tierra, los otros aislados.

Componentes de secuencia cero se encuentran en fase, y tienen la misma amplitud, en las tres fases. La componente de corriente de secuencia cero, vale en consecuencia un tercio de la corriente de neutro. Un conjunto de tensiones entre línea aplicadas a un devanado con conexión en delta suman cero, debido a la conexión cerrada, y no contienen ninguna componente de secuencia cero. Pero dentro de la conexión en delta, pueden circular corrientes de secuencia cero. Por ejemplo una conexión en estrella con neutro por el que circulan corrientes de cortocircuito, induce en el devanado en delta una corriente de secuencia cero, se observa en consecuencia corriente en el arrollamiento en triángulo.

Suponiendo que es dado un juego de voltajes trifásicos des balanceados, designados por V_a , V_b , y V_c , de acuerdo con "Fortescue", esos voltajes de fase pueden ser descompuestos en tres juegos de voltajes trifásicos balanceados, denominados "componentes de secuencia". Las componentes simétricas constituyen un procedimiento analítico de gran valor para determinar el rendimiento de ciertos tipos de circuitos trifásicos o polifásicos en general desequilibrados que contienen maquinas eléctricas rotativas, pero también se puede usar para redes estáticas desequilibradas pero tiene el inconveniente de ser mas complejo y laborioso que los métodos estándar que los analizan.

- a) La componente de “secuencia cero”, que consiste de tres fasores de voltaje con igual magnitud y con cero grados de desplazamiento angular entre ellos.

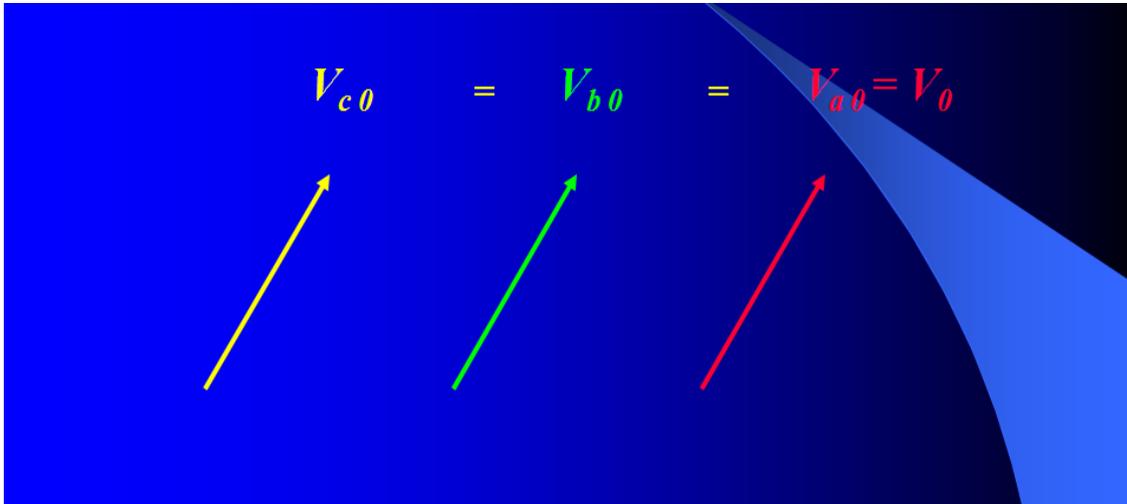


Figura 3.6.- Componentes de “secuencia cero”.

- b) La componente de “secuencia positiva”, que consiste de tres fasores de voltaje, con igual magnitud y desplazamiento angular entre ellos de 120° con secuencia positiva.

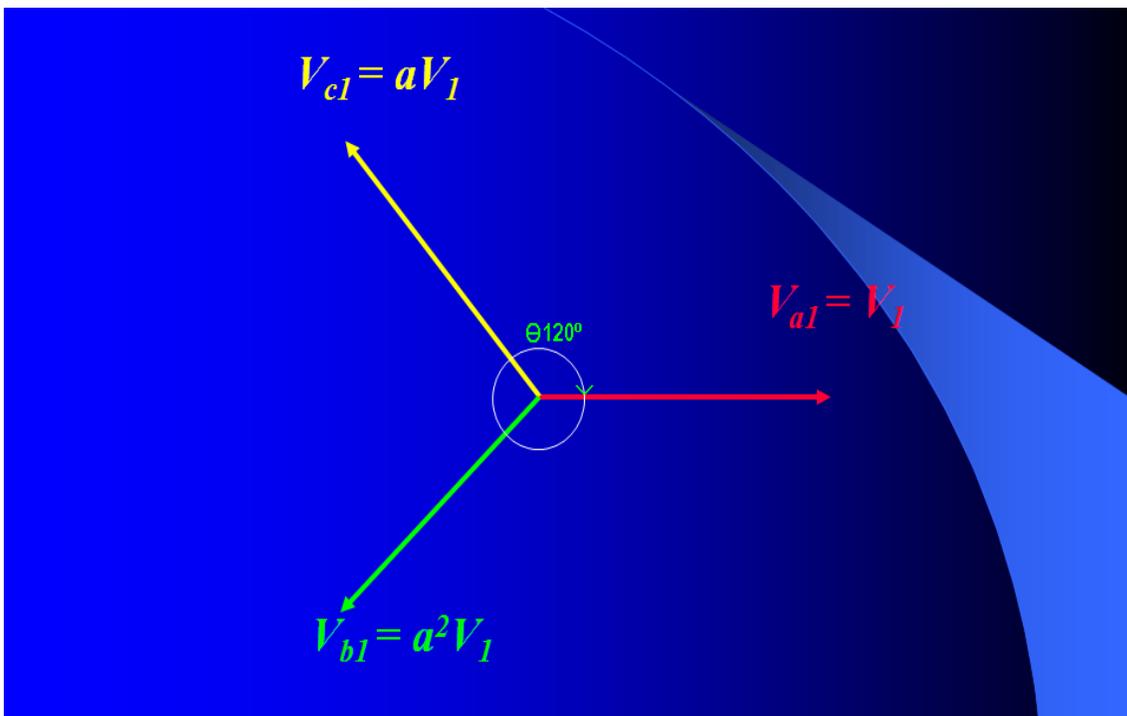


Figura 3.7.- Componentes de “secuencia positiva” (abc).

- c) La componente de “secuencia negativa”, que consiste de tres fasores de voltaje, con igual magnitud y con desplazamiento angular entre ellos de 120° , pero con secuencia negativa.

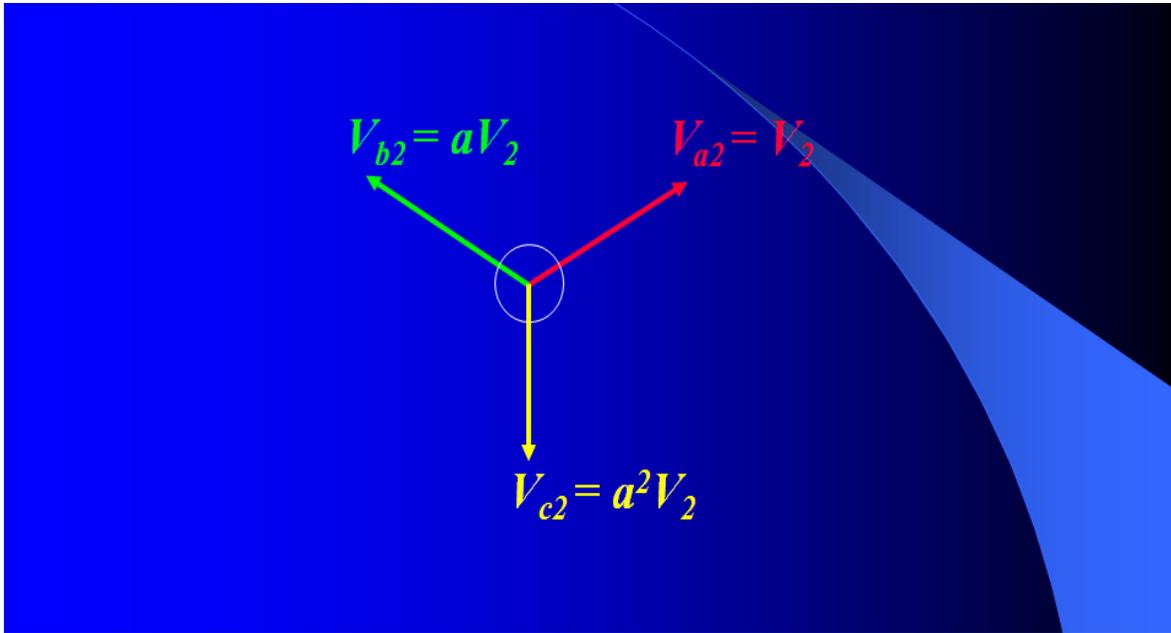


Figura 3.8.- Componentes de “secuencia negativa” (acb).

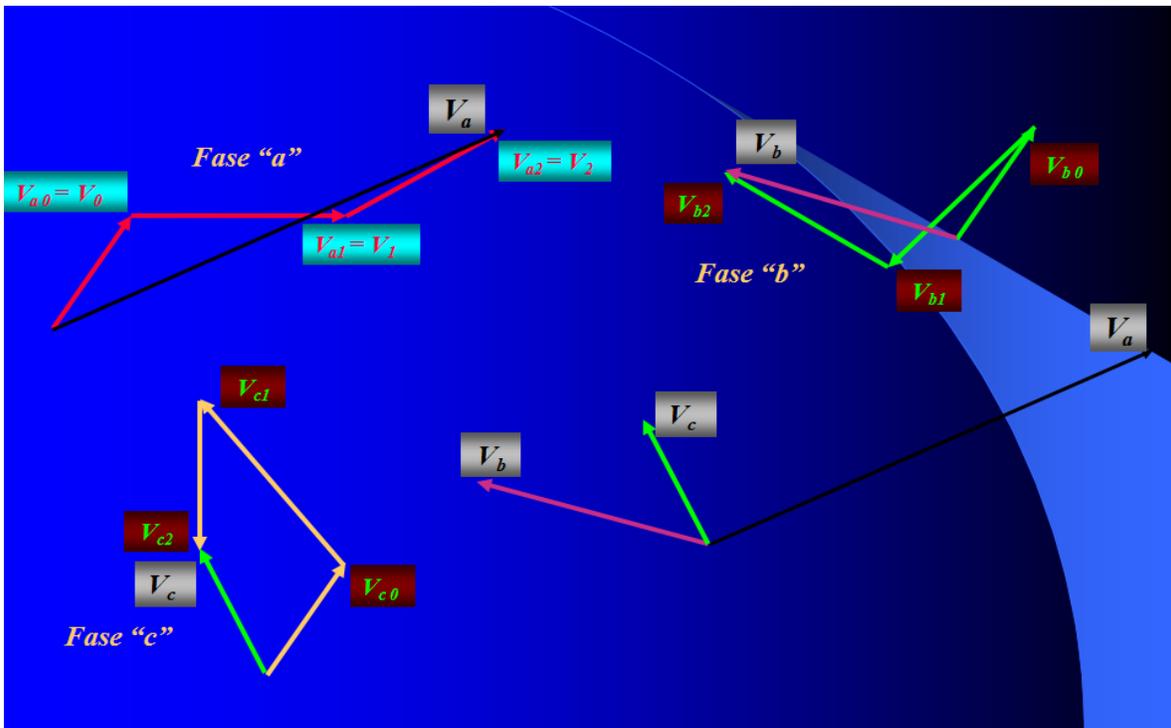


Figura 3.9.- Definición de Componentes Simétricas.

Matemáticamente podemos representar la definición de las componentes simétricas, aplicando el operador “a”, como sigue:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \text{-----} (3.7)$$

Donde:

$$a = 1 \angle 120^\circ = \frac{-1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a = -0.5 + 0.866j \text{-----} (3.8)$$

$$a^2 = 1 \angle 240^\circ = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = -0.5 - 0.866j \text{-----} (3.9)$$

Escribiendo la ecuación 3.7 como tres ecuaciones separadas, tenemos:

$$V_a = V_0 + V_1 + V_2 \text{-----} (3.10)$$

$$V_b = V_0 + a^2 V_1 + a V_2 \text{-----} (3.11)$$

$$V_c = V_0 + a V_1 + a^2 V_2 \text{-----} (3.12)$$

Si en la ecuación 3.7 definimos como:

$$V_F = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; V_S = \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix}; A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \text{-----} (3.13)$$

Donde:

“V_F” es el vector columna de “voltajes de fase”.

“V_S” es el vector columna de “voltajes de secuencia”.

“A” es la “matriz de transformación” 3*3 del operador “a”.

Por lo anterior, la ecuación 1, se simplifica como:

$$V_F = AV_S \text{ -----(3.14)}$$

La inversa de la matriz "A" es:

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \text{ -----(3.15)}$$

Multiplicando la ecuación 3.15 por A⁻¹, obtenemos:

$$V_S = A^{-1}V_F \text{ -----(3.16)}$$

Sustituyendo la ecuación 3.13 en la ecuación 7 tenemos:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \text{ -----(3.17)}$$

Escribiendo la ecuación 3.17 como tres ecuaciones separadas, tenemos:

$$V_0 = \frac{1}{3} (V_a + V_b + V_c) \text{ -----(3.18)}$$

$$V_1 = \frac{1}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c) \text{ -----(3.19)}$$

$$V_2 = \frac{1}{3} (V_a + a^2V_b + aV_c) \text{ -----(3.20)}$$

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

- La ecuación 3.18 nos muestra que en un sistema trifásico balanceado no hay voltajes de secuencia cero, porque la suma de tres fasores balanceados es cero.
- En un sistema trifásico desbalanceado, los voltajes línea a neutro pueden tener componentes de secuencia cero.
- Para los voltajes línea a línea nunca tienen componente de secuencia cero, puesto que por la ley de voltajes de Kirchhoff (KVL) su suma es siempre cero.

La transformación a componentes simétricas puede también ser aplicada a corrientes, como sigue:

$$I_F = AI_S \text{ ----- (3.21)}$$

Donde “ I_F ” es el vector de corrientes de fase, e “ I_S ” es el vector de corrientes de secuencia.

En un sistema trifásico conectado en estrella, la corriente al neutro “ I_n ” es la suma de las corrientes de línea, es decir:

$$I_F = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}; I_S = \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \text{ ----- (3.22)}$$

También:

$$I_S = A^{-1}I_F \text{ ----- (3.23)}$$

Las ecuaciones 3.21 y 3.23, pueden ser escritas como tres ecuaciones separadas, como sigue:

$$I_a = I_0 + I_1 + I_2 \text{ -----(3.24)}$$

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 \text{ -----(3.25)}$$

$$I_c = I_0 + a I_1 + a^2 I_2 \text{ -----(3.26)}$$

Y las corrientes de secuencia son:

$$I_0 = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c) \text{ -----(3.27)}$$

$$I_1 = \frac{1}{3} (I_a + a I_b + a^2 I_c) \text{ -----(3.28)}$$

$$I_2 = \frac{1}{3} (I_a + a^2 I_b + a I_c) \text{ -----(3.29)}$$

En un sistema trifásico conectado en estrella, la corriente al neutro “ I_n ” es la suma de las corrientes de línea, es decir:

$$I_n = I_a + I_b + I_c \text{ -----(3.30)}$$

Sustituyendo la ecuación 3.31 en 3.28 obtenemos:

$$I_n = 3I_0 \text{ -----(3.31)}$$

- Entonces, la corriente al neutro es igual a tres veces la corriente de secuencia cero.
- En un sistema balanceado conectado en estrella, las corrientes de línea no tienen componentes de secuencia cero, puesto que la corriente al neutro es cero.
- En un sistema trifásico sin camino al neutro, tal como un sistema conectado en delta o un sistema trifásico conectado en estrella con neutro aislado, las corrientes de línea no tienen componente de secuencia cero.

También:

- Un sistema trifásico balanceado con secuencia “abc” (o secuencia positiva), no tiene componentes de secuencia cero ni negativa, ya que los voltajes de secuencia cero y secuencia negativa son ambos cero.
- Un sistema trifásico balanceado con secuencia “acb” (o secuencia negativa), no tiene componentes de secuencia cero ni positiva, ya que las corrientes de secuencia cero y secuencia positiva son ambas cero.
- Un sistema trifásico des balanceado puede tener valores diferentes de cero para todas las componentes de secuencia.
- La corriente al neutro, es tres veces la corriente de secuencia cero, como se determinó en la ecuación 3.31.

CAPITULO 4
EFEECTO DEL CORTOCIRCUITO EN TRANSFORMADORES.

4.1.- Proceso de Diseño de Transformadores.

Históricamente, los transformadores sumergidos en aceite han sido la opción más utilizada en la red eléctrica, pero, debido a algunos problemas asociados con el manejo ambiental, la alta probabilidad de incendio, el control de fugas y el mantenimiento general, han motivado la evolución y utilización de los transformadores tipo seco en zonas tales como: centros comerciales, edificios, hospitales, entre otros.

Es común que los valores de cortocircuito trifásico en los buses de transmisión en los cuales se conectan las subestaciones de Distribución, se den en “Corrientes de corto circuito” o en “Potencia de cortocircuito”, por lo cual para hacer un cálculo manual de corto circuito en los diferentes buses de las instalaciones de distribución es necesario determinar la impedancia de Thévenin del sistema hasta ese punto.

Los transformadores son aparatos que pueden aumentar o disminuir el nivel de voltaje de una corriente eléctrica. La energía eléctrica se produce en centrales generadoras que queman diversos combustibles (petróleo, carbón, gas, etc.) y los transforman en energía. Esta energía se genera en forma de electricidad de alto voltaje que luego se distribuye a los usuarios finales (fábricas, hogares, minas, vías férreas, escuelas, etc.), que pueden estar cerca o lejos de la planta generadora.

Esta energía eléctrica se transfiere mucho mejor si el voltaje se mantiene alto, porque con los altos voltajes se pierde mucha menos energía durante el transporte por el tendido de cables, sea por aire, de una a otra torre, sea bajo tierra. Los cables de energía eléctrica que solemos ver transportan electricidad a un voltaje de varios miles de kilovoltios. El voltaje debe disminuir antes de llegar al usuario, para así ajustarse a sus necesidades. Una fábrica puede necesitar quizás unos miles de voltios, mientras que las necesidades domésticas pueden ser de unos cientos de voltios. Esta disminución o reducción del voltaje se logra por medio de transformadores. Cada transformador que vemos en las subestaciones eléctricas, en la vía pública, el campo, en los postes, etc., tiene como misión reducir el voltaje.

Estos transformadores deben estar adaptados a la tarea que se les asigna. Eso quiere decir que pueden ser muy grandes, si se utilizan para grandes voltajes y corrientes, o relativamente pequeños, si se colocan en la última etapa de la cadena de abastecimiento para suministrar energía a un sólo usuario u hogar, que necesite, por ejemplo, unos 127 voltios. Por eso, los transformadores varían mucho en cuanto a tamaño y forma. Con todo, tienen el mismo diseño básico que consiste en un núcleo de metal magnético alrededor del cual se colocan dos juegos de cables conductores (de cobre). La diferencia en número de vueltas entre estos cables, en las dos bobinas, es la que determina la diferencia proporcional entre voltaje de entrada y de salida.

Esta estructura está suspendida dentro de un cubo metálico y sostenido por separadores de madera (que tienen propiedades aislantes). Los dos circuitos eléctricos están equipados con electrodos de entrada que permiten conexiones eléctricas hacia el exterior. Estos electrodos están aislados del depósito metálico por medio de aislantes de cerámica.

El proceso de diseño de un transformador es el típico ejemplo de diseño rutinario, como lo puede ser también el diseño de una instalación eléctrica de un edificio.

Ante una actividad rutinaria, debemos aplicar técnicas de gestión que proponen planes más cerrados, es decir, que ya lo tenemos prácticamente todo definido, incluidos los controles a realizar: revisión, verificación, y validación. Esto significa que nuestra planificación del diseño no tiene que efectuarse cada vez que se inicia un nuevo diseño. Otra cosa es que se diseñe un transformador con una nueva tecnología, o que su aplicación o dimensiones sean nuevas, etc.

El procedimiento de diseño debería contener el plan que se ejecutará para diseñar (según ISO 9001 no se tiene la obligación de tenerlo por escrito,). En dicho plan debería estar reflejado qué se verificará, cuándo se realizará la verificación, quién lo hace y cómo, etc. Y lo mismo con la validación.

Para el diseño de los transformadores, se utilizará la disposición de las bobinas con respecto al núcleo de tipo columna, debido a que este tipo de transformador tiene un tamaño más reducido que el de los transformadores tipo acorazado, en el cual el núcleo abraza las bobinas. Esta diferencia de tamaño permite un ahorro de espacio considerable, aspecto importante si se tiene en cuenta que los transformadores secos son más robustos que los transformadores convencionales de igual potencia.

Un transformador está compuesto de las siguientes partes:

- Un cubo metálico.
- Un núcleo de acero magnético (láminas ensambladas).
- Bobinas de cobre, cubiertas con una capa aislante de resina o papel.
- Separadores de madera de diversas formas (son porosos y pueden absorber el aceite dieléctrico).
- Aceite dieléctrico.

En cuanto a la distribución de las bobinas con respecto al núcleo, estas pueden ubicarse en dos formas:

- 1) Distribuida: Es aquella donde los devanados del primario y del secundario están en progresión radial con relación a un núcleo común.
- 2) Concéntrica: Aquella en la que los devanados primario y secundario están subdivididos en discos e intercalados en el mismo núcleo.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Los devanados concéntricos que envuelven el núcleo pueden ser de dos tipos, dependiendo de las tensiones a la que están expuestos, así:

- 1) Devanado concéntrico circular: Usado en niveles de tensión inferiores a 1 kV.
- 2) Devanado concéntrico en galleta: Utilizado para niveles de tensión superiores a 1 kV debido a la característica que permite dividir el nivel de tensión en niveles más pequeños, para simplificar el aislamiento en sentido axial.

Los devanados del transformador deben ser de cobre electrolítico de 99.99% de pureza capaces de soportar las pruebas dieléctricas especificadas, para la clase de aislamiento asignada a cada devanado, así como los requerimientos de corto circuito.

El diseño y construcción de los conductores, aislamiento y blindajes debe ser tal que no exceda el nivel de descargas parciales, no sólo en las tensiones de operación, sino también durante las pruebas dieléctricas y de cortocircuito.

La distribución de los devanados tipo concéntrica circular, es la mas utilizada. La razón de esta selección es debida a los niveles de tensión para los que se realizan estos diseños (clase 1kV).

Debido a los diferentes niveles de tensión que se presentan en la parte activa de los transformadores, se necesitan sistemas de aislamiento entre el devanado de baja tensión y tierra, entre los devanados de baja y alta tensión, entre las capas de los devanados de baja y alta tensión como el cabezal de baja y alta tensión y entre espiras de los devanados. El aislamiento de los devanados del transformador tipo seco se realiza utilizando materiales sintéticos con aislamientos de clase H [4], que soportan temperaturas hasta de 185 °C, tales como el asbesto y el NOMEX.

El calor producido por las pérdidas en los materiales activos (núcleo magnético y arrollamientos) y las pérdidas adicionales, se concentra en las bobinas de alta y baja tensión del transformador. Este exceso de temperatura debe ser totalmente disipado al ambiente a través de medios que transportan el calor. Estos son el aceite u otro líquido aislante y refrigerante, si se trata de un transformador sumergido; o aire si el transformador es de tipo seco. En este último caso el aire debe evacuar el calor generado por las bobinas al ambiente mediante ductos de refrigeración.

Los ductos de refrigeración se implementan entre capas y/o secciones de la bobina, mediante espaciadores que se ubican en los frentes de las bobinas para que no afecten el ancho de la ventana del núcleo.

La verificación del diseño esta dedicada a comprobar que las cosas que vamos haciendo, las hemos hecho bien. Esto se efectúa en múltiples ocasiones a lo largo

de cualquier actividad. No obstante, de entre todas las comprobaciones a realizar durante el diseño de un transformador, seguro que algunas son críticas. Estas verificaciones deberían realizarse "oficialmente" y ser registradas: comprobar cálculos, disposición de elementos, dimensiones (sobre planos), etc.

En la industria también se distingue a las denominadas "características especiales". Estas no son críticas (no afectan a la seguridad) pero su importancia en otros órdenes de la calidad es tan importante que se establecen planes específicos para lograr su conformidad.

Cuando se tiene el diseño terminado hay que esperar al final para validar el diseño.

Esta validación debe ser efectuada por nosotros, no valen los resultados del control eléctrico.

Validar es probar que el transformador funciona correctamente, y los controles a realizar están ya establecidos en la legislación. En este caso habría que hacer, como mínimo, lo que pide la Ley.

El diseño de cualquier equipo es un proceso de cálculo mediante el cual se trata de determinar sus dimensiones geométricas, de modo de obtener un comportamiento pre especificado. Así, en el proceso de diseño se pueden distinguir:

- 1) Especificaciones, o características de funcionamiento deseadas.
- 2) Algoritmo de diseño, o secuencia lógica de relaciones que permiten determinar las dimensiones a partir de las especificaciones y de ciertos valores supuestos en base a experiencia en diseños similares.
- 3) Análisis del comportamiento del diseño definitivo, comparación con el comportamiento requerido (especificaciones) y repetición del proceso si es necesario corregir el diseño. Generalmente ocurre que las ecuaciones de diseño disponibles son insuficientes para la cantidad de incógnitas (dimensiones) a determinar. Por ello, para levantar la indeterminación es necesario suponer un conjunto de valores y/o emplear un modelo simplificado de modo de reducir la cantidad de incógnitas, obteniéndose un diseño preliminar o aproximado. No obstante, al analizar el comportamiento del diseño así obtenido, hay que basarse en el modelo exacto, sin simplificaciones. De allí que se produzcan diferencias entre el comportamiento calculado y las especificaciones, siendo normalmente necesario realizar una serie de iteraciones hasta lograr un diseño satisfactorio. En cada iteración deben corregirse adecuadamente los valores supuestos para aproximar el comportamiento a las especificaciones.

4.1.1.- Diseño Eléctrico.

Para el diseño eléctrico debe conocerse:

- Identificación del tipo de conductor a utilizarse en las bobinas, según la disponibilidad.
- Dimensionamiento del núcleo: Según los parámetros definidos en el módulo anterior, relacionados con la geometría del núcleo y sus dimensiones (alto, ancho y espesor de cada uno de los lazos que conformarán el núcleo).
- Cálculo de pérdidas en el núcleo: Son calculadas con base en el peso del núcleo, factor de desperdicio, la densidad de campo magnético definida como parámetro de entrada y las curvas del material (para este caso se utilizan láminas de silicio M4). Al determinar las pérdidas por diseño, se deben comparar con las establecidas en las normas técnicas, para verificar el cumplimiento de las mismas.
- Diseño de devanados: Una vez determinadas las dimensiones del núcleo y conocida la densidad de corriente J , se determina la configuración de cada una de las bobinas según el tipo de conductor seleccionado inicialmente. Entre los datos calculados en esta etapa se encuentran: Número de capas, número de secciones, calibres de los conductores, altura y ancho de la bobina, entre otros.
- Cálculo de aislamientos: Los tipos de aislamientos calculados en esta etapa son: aislamientos entre espiras, entre capas de espiras, entre bobinas y entre bobinas y núcleo.
- Cálculo de pérdidas en los devanados: Las pérdidas en el cobre son determinadas para su posterior comparación con las establecidas por norma.
- Cálculo área de refrigeración: Para determinar el área necesaria para disipar el calor, se parte de las pérdidas en los devanados. Con base en esto se ubican los espaciadores, que son elementos localizados entre las capas de las bobinas y que permiten que circule libremente el aire que las refrigera. En este módulo se determina la ubicación y la cantidad de espaciadores.

4.1.2.- Diseño Mecánico.

El diseño mecánico de componentes magnéticos bobinados es una ciencia exacta, la elección de las aleaciones magnéticas, los espesores de laminación, y las dimensiones (por no citar las tolerancias de fabricación y las propiedades eléctricas y magnéticas) al ser, aproximaciones prácticas a las posibilidades teóricas están sujetas a varias inhibiciones y compromisos.

- La configuración de las bobinas en las fases de los transformadores permite que éstas puedan combinarse fácilmente, pudiendo intercalar varios paquetes de bobinas de baja y alta tensión, de modo que se puede alcanzar cualquier valor de impedancia con un diseño estándar, o bien

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

ajustarse exactamente a valores de impedancia predeterminados, lo que optimiza el reparto de carga en máquinas trabajando en paralelo.

La naturaleza del proceso de fabricación de las ferritas permite diseñar el núcleo y sus accesorios para optimizar independientemente tanto las propiedades magnéticas como la configuración mecánica. Por esto, los componentes de ferrita son los más fáciles de bobinar, ensamblar, montar y alambrear en el circuito.

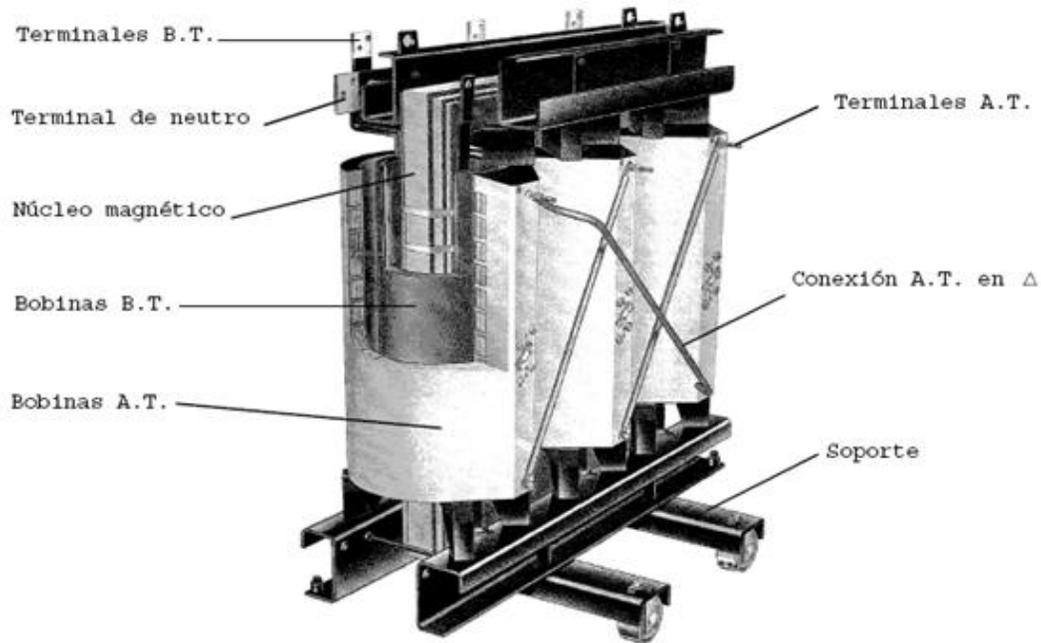


Figura 4.1.- Detalles de Construcción de un Transformador.

Con la aparición de las ferritas magnéticas y su subsiguiente desarrollo y expansión, se han abierto caminos decisivos en la problemática del diseño. Está ahora disponible una extensa gama de formas y tamaños de núcleos normalizados dentro de una amplia selección de materiales magnéticos, que ofrecen una única combinación de propiedades magnéticas, eléctricas y mecánicas que pueden ser utilizadas con confianza para satisfacer requisitos específicos de diseño. Estas representan a menudo la única posibilidad disponible para cumplir con un conjunto de objetivos de diseño, salvo severas indicaciones en contra, dentro de una gama notablemente extensa de niveles de energía, dimensiones y circuitos de aplicación.

Está disponible una enorme gama de núcleos de ferrita de formas, tamaños y características magnéticas normalizados (incluyendo la línea normalizada internacional de núcleos envolventes) a precios de producción masiva y para entrega inmediata. Si se necesita un núcleo de forma o tamaño especial, el coste del utillaje necesario para su fabricación es relativamente bajo.

Comparado con otras alternativas, el tiempo necesario para su puesta a punto es más corto para un núcleo de ferrita.

Las características principales de las ferritas se pueden resumir:

- 1) Alta resistividad
- 2) Amplio rango de frecuencias de trabajo
- 3) Bajas pérdidas con alta permeabilidad
- 4) Alta estabilidad con el tiempo y la temperatura
- 5) Amplia selección de materiales
- 6) Gran variedad de formas de núcleos
- 7) Bajos coste y peso
- 8) Baja conductividad térmica
- 9) Fragilidad y poca resistencia mecánica
- 10) Saturan a bajas densidades de flujo

Las ferritas son adecuadas para una extensa gama de aplicaciones y presentan muchas ventajas frente a cualquier otra alternativa de diseño. Además se demuestra la fiabilidad, uniformidad y reproducibilidad de sus características, y la precisión y estabilidad de sus dimensiones hacen posible ofrecer por primera vez procedimientos de diseño prácticos, sensiblemente simplificados de los procedimientos clásicos de diseño, que pueden ahorrar una gran cantidad de horas de trabajo y materiales, consiguiendo al mismo tiempo una notable mejora en la precisión de los resultados.

En transformadores, la elección del grueso del hilo no se hace normalmente teniendo en cuenta la densidad de corriente (calentamiento) sino por la necesidad de obtener una regulación razonable. Debe ponerse de relieve que en muchos casos, un diseño con regulación más bien alta funcionará aceptablemente ya que ni el rendimiento ni el calentamiento son determinantes.

También se ha visto como el tamaño del entrehierro determina la permeabilidad eficaz μ_e , y por tanto determina también el índice de autoinducción AL de un núcleo en particular. El entrehierro ejerce también dos importantes influencias en el comportamiento de la autoinducción de baja energía bobinada en el núcleo:

- Cuanto más grande sea el entrehierro (menor AL), mayor será la estabilidad de la autoinducción con el tiempo y la temperatura.
- Cuanto más grande sea el entrehierro (menor AL), menor será el máximo factor Q obtenible para cualquier autoinducción que se obtenga con el núcleo.

En muchas aplicaciones que requieren simultáneamente elevada estabilidad y elevado factor Q, existe un conflicto de diseño entre estas dos relaciones. Si se añade al conflicto la necesidad de minimizar el tamaño del núcleo, quedan

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

impuestas limitaciones al diseño, y la elección del núcleo adecuado se convierte en una etapa crítica del procedimiento de diseño.

La parte activa (Bobinas y Núcleo), que se utiliza en transformadores va sumergida en líquidos, el tanque debe ser hermético, soportar el vacío absoluto sin presentar deformación permanente, proteger eléctrica y mecánicamente el transformador, ofrecer puntos de apoyo para el transporte y la carga del mismo, soportar los enfriadores, bombas de aceite, ventiladores y los accesorios especiales como equipos de protección y control.



Figura 4.2.- Transformador.

Los accesorios del transformador son un conjunto de partes y dispositivos necesarios en las labores de operación y mantenimiento.

- Tanque conservador: Es un tanque adicional colocado sobre el principal, cuya función es absorber la expansión del aceite debido a los cambios de temperatura por los incrementos de carga.
- Boquillas: son aisladores terminales de las bobinas de alta y baja tensión que se utilizan para atravesar el tanque o la tapa del transformador, o más conocidos como pasa tapas.
- Válvulas: conjunto de dispositivos que se utilizan para el llenado, mantenimiento, vaciado y muestreo del aceite del transformador. Esto último con el fin de conocer la rigidez dieléctrica del mismo.

- Tablero: es un gabinete dentro del cual se encuentran los controles y protecciones de los motores de las bombas de aceite, de los ventiladores, de la calefacción del tablero, del cambiador de derivaciones bajo carga, etc.
- Conectores a tierra: Son unas piezas de cobre soldadas al tanque, donde se conecta el transformador a la red de tierra.
- Placa característica: se instala en un lugar visible del transformador y se graban en ella los datos importantes del transformador.

Los transformadores serán capaces de soportar sin daño en cualquiera de sus derivaciones y en condiciones de servicio, todas las fuerzas electromagnéticas que se desarrollan bajo condiciones de cortocircuito a partir del valor de la corriente transitoria de corto circuito, la cual no debe ser superior a 1.4142K veces la sobre corriente.

La rigidez mecánica de un transformador será en el futuro el factor más importante de su comportamiento.

Hay tres razones para ello:

- 1) Soportar los esfuerzos de los cortocircuitos
- 2) Requisitos sísmicos
- 3) Manipulación durante el transporte

4.1.3.- Diseño Térmico.

Al diseñar el transformador se toma en cuenta el hecho de que su funcionamiento genera calor y que este calor debe ser expulsado para evitar el calentamiento de todo el equipo, que provocaría una disminución de la eficiencia eléctrica del equipo, aumentaría posiblemente el riesgo de sobrecalentamiento y, con ello, el peligro de incendio.

Un transformador suele contener un fluido dieléctrico que sólo en parte es PCB, porque los PCB pueden ser viscosos. La mezcla puede comprender un aceite mineral u otro fluido clorado que no sea PCB, como el triclorobenceno y el tetracloroetileno. Estos compuestos son líquidos y por eso reducen la viscosidad del aceite del transformador. Con ello se facilita la circulación del líquido por los conductos de enfriamiento del transformador, y se eleva así la eficiencia de enfriamiento.

La autoinducción es directamente proporcional a la permeabilidad eficaz μ determinada por el núcleo y su particular entrehierro, y por lo tanto el coeficiente de temperatura dado es también el coeficiente de temperatura de la autoinducción. Se observa que los núcleos con mayor entrehierro tienen un coeficiente de temperatura menor (mayor estabilidad de la autoinducción con la temperatura).

Existe también una pequeña pero observable variación del factor Q con la temperatura. Cada uno de los siguientes factores de pérdidas, afecta al factor Q de la bobina; pérdidas debidas a la resistencia del cobre (incluyendo el "efecto pelicular"), pérdidas por fugas dieléctricas en los devanados, y por tres componentes de pérdidas en el núcleo: histéresis, corrientes parásitas y residuales. Todos estos factores de pérdidas están algo influenciados por las variaciones de la temperatura y por lo tanto afectarán también al factor Q.

Para que no exista calentamiento o pérdidas de potencia excesiva bajo condiciones de carga completa se debe considerar lo siguiente:

- Se elige el material adecuado para el núcleo: cualquiera que este recomendado en el margen de frecuencias de interés.
- Se busca el grupo de núcleos envolventes del material elegido de menor volumen y de ellos se elige el que tenga el mayor valor de AL (entrehierro menor).
- Se determina el número de espiras necesario (N)
- Se comprueba que para que quepa el número de espiras necesario, y el hilo a utilizar no sea demasiado delgado para ser económico. Si el número de espiras cabe se puede hacer una comprobación aproximada del factor Q conseguido con la ayuda de las curvas, también se puede comprobar si el coeficiente de temperatura es lo suficientemente bajo y con ello se completa el diseño.

Se debe tener en cuenta que los valores dados para el coeficiente de temperatura no son esencialmente constantes, sino que están sujetos a tolerancias de fabricación.

Tipo de Enfriamiento:

Cualquiera de las siguientes descripciones o siglas indica la presencia de un fluido distinto del aceite de transformador:

- Enfriamiento líquido natural (LN)
- Enfriamiento líquido natural aire natural (LNAN)
- Enfriamiento natural sintético (SN)

El coeficiente de expansión térmica es una propiedad muy importante en los transformadores que deben trabajar en diferentes condiciones climáticas, la operación misma genera pérdidas de energía en forma de calor. Por lo tanto, pueden generarse notables cambios de temperatura. Por eso es fundamental que el transformador esté diseñado para aceptar cambios de volumen debidos a las variaciones de temperatura.

Un transformador puede estar sellado herméticamente, o bien puede tener un "respiradero", lo que significa que no está completamente sellado y que puede

tener una cámara de expansión para absorber las variaciones de densidad y, por consiguiente, de volumen, en función de la temperatura.

Independientemente de la derivación a la cual estén conectados y en las condiciones de servicio, los transformadores deberán ser capaces de soportar sin daños los efectos térmicos de un cortocircuito en las terminales de cualquier devanado para los siguientes tiempos:

- Dos segundos cuando el valor es 20 veces la corriente nominal
- Tres segundos cuando el valor es inferior o igual a 20 veces el valor nominal
- Para transformadores para más de tres devanados la duración será la que corresponda a la sobre corriente máxima de cualquier devanado.

4.1.4.- Optimización Económica.

Los costos de operación de los transformadores son debidos a la carga y el consumo. Los costos de estas pérdidas son función de los elementos siguientes: la carga (demanda) pico inicial, el factor de carga, el factor de responsabilidad (relación entre la carga del transformador durante el pico de la demanda y la carga máxima diaria del transformador), la tasa de crecimiento de la demanda máxima, la carga pico máxima aceptable antes de requerir el uso de otro transformador para dividir la carga, el costo de la capacidad kVA y el costo de la energía kWh, el tipo y las etapas de enfriamiento especificadas.

Los costos de la seguridad de funcionamiento tienen que ver con los elementos de este concepto, la indisponibilidad, la confiabilidad, el mantenimiento y el soporte logístico del mismo..

La *indisponibilidad* de transformadores requiere del uso de infraestructura adicional, ya sea subestaciones móviles o de capacidad extra en subestaciones existentes. El uso de capacidad extra o de sobrecarga en subestaciones existentes incrementa el margen de riesgo operativo (Una falla tiene como consecuencia un mayor impacto entre los usuarios). El uso de infraestructura adicional, por ejemplo a través de subestaciones móviles, es una política que tiene un costo de capital alto ya que el factor de servicio de estos equipos normalmente es bajo y por otra parte tiene un costo de operación también alto; este último derivado del transporte, la instalación provisional y las pérdidas de la subestación móvil; normalmente, las pérdidas son mayores comparadas con los transformadores fijos, al requerirse que las dimensiones y masa del transformador para el transporte sean más reducidas.

La *confiabilidad* es un elemento que esta ligado con la tasa de fallas y con sus consecuencias. Los transformadores tienen diferentes modos, causas y efectos de falla. Los modos, las causas y los efectos de falla dependen de las condiciones de servicio, los criterios de diseño, los cuidados durante la manufactura y de la forma de uso (operación y mantenimiento). Desde un punto de vista económico, la

confiabilidad esta asociada con el costo de la falla y las consecuencias de la misma.

Por ejemplo, el costo de la reparación o reemplazo del transformador, el costo de los daños consecuenciales; la reinstalación y puesta en servicio, la reposición de equipos adyacentes dañados por las consecuencia de la falla que puede ser un incendio, explosión, etc. Cada modo y causa de falla tiene asociada una tasa y frecuencia de fallas (failure rate) así como un costo específico.

Las acciones requeridas de mantenimiento a su vez dependen de: márgenes y criterios de diseño, prácticas de manufactura y de las condiciones de servicio. Una alta incidencia de fallas a través del transformador y/o condiciones ambientales adversas –críticas– incrementa la frecuencia de la necesidad de ejecutar acciones de mantenimiento. Las prácticas de manufactura poco robustas (pérdida de hermeticidad, fugas, fallas en moto ventiladores, etc.) también contribuyen a un aumento en la frecuencia del mantenimiento, algunas compañías establecen penalizaciones bastante severas en los contratos cuando a causa de esas prácticas se producen, por ejemplo, derrames de aceite.

El *soporte logístico de mantenimiento* tiene más que ver, con las estrategias para llevar a cabo las acciones de mantenimiento. El mantenimiento preventivo tendrá normalmente costos más altos, estos costos estarán asociados con la indisponibilidad del transformador al estar fuera de servicio mientras se ejecutan acciones de mantenimiento programado. Por otra parte, la estrategia de Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad, tendrá costos relacionados con la gestión y la infraestructura requerida para optimizar (minimizar) la indisponibilidad y el tiempo utilizado para ejecutar las acciones de mantenimiento.

Normalmente, el costo de la infraestructura de soporte (vehículos, equipo de prueba, personal, etc.) para el mantenimiento sería un costo fijo distribuido entre los activos a los cuales se le da mantenimiento.

4.2.- Fuerzas Mecánicas en los Devanados Durante un Cortocircuito.

Las consecuencias de las fuerzas mecánicas en los devanados de los transformadores son las siguientes:

- La temperatura de los devanados, abrazaderas, conductores, aislamientos y aceite aumentaran considerablemente, y pueden alcanzar niveles inaceptables.
- La densidad de flujo de dispersión aumentara, provocando un aumento de las corrientes de Foucault en los conductores y calentamiento en las partes metálicas y en la cuba.
- Los bornes, los cambiadores de toma de carga (taps), los empalmes de cable y los transformadores de corriente también estarán expuestos a

mayores esfuerzos potencialmente superiores a los márgenes de diseño y aplicación del transformador.

- La humedad y el contenido de gases en el aislamiento y en el aceite cambiaran ya que la solubilidad del agua en el aceite se incrementan al aumentar la temperatura.
- La disminución de las propiedades mecánicas de las partes metálicas a altas temperaturas puede reducir la capacidad de soportar cortocircuitos.
- La presión acumulada en los bornes puede derivar en un fallo debido a la pérdida de aceite.
- la expansión del aceite podría causar desbordamiento del depósito conservador.
- La interrupción de corrientes elevadas por el cambiador de tomas en carga puede ser peligrosa.
- La sensibilidad de un transformador ante un cortocircuito en su devanado depende de su tamaño. Cuanto mayor es la potencia del transformador se tiene lo siguiente:
 - El flujo de dispersión aumenta.
 - Se incrementan las fuerzas de cortocircuito (las fuerzas dependen del cuadrado de las corrientes).

Cuando un alambre que conduce una corriente eléctrica es colocado en una región donde existe un campo magnético, el conductor experimenta una fuerza.

Sea dl un elemento del alambre ab que conduce una corriente I_A (ab amperes) y m el polo de un magneto de intensidad m . La fuerza que actúa con el elemento dl es:

$$df = \frac{m}{r^2} I_A dl * \text{sen } \theta \text{ ----- (4.1)}$$

Donde:

r : distancia del polo magnético m al elemento dl

θ : ángulo entre la línea que une al polo m con el elemento dl y la tangente a la curva ab en dl

La intensidad de campo magnético en el elemento dl debido al polo m es:

$$H = \frac{m}{r^2} \text{----- (4.2)}$$

Pero ya que la densidad de campo magnético es $B=\mu H$ y $\mu=1$ en el aire, entonces:

$$df = BI_A dl * \text{sen}\theta \text{-----}(4.3)$$

Que puesto en forma vectorial es:

$$d\vec{f} = I\hat{U}_T * \vec{B}dl \text{-----}(4.4)$$

Si el alambre fuera recto, I constante, B fuera uniforme y normal al alambre, entonces, la fuerza sobre el alambre de longitud l sería:

$$\vec{F} = \vec{B}I_A l \text{-----}(4.5)$$

Donde:

F = fuerza en dinas

I_A = corriente de ab en amperes

l = longitud del alambre en cm.

B = densidad de flujo de campo magnético en gauss

La fuerza magnetizante en el espacio entre los devanados es:

$$F_M = \frac{4\pi NI \sqrt{2}}{10} \text{-----}(4.6)$$

Donde:

F_M = fuerza magnetizante (Gilbert)

NI = Amper vueltas por grupo

I = amperes rms en el devanado con N vueltas

N = vueltas por grupo

La reluctancia del camino del flujo magnético es:

$$R = \frac{\alpha}{\mu A} \text{-----(4.7)}$$

Donde:

R = reluctancia

μ = permeabilidad = 1 en aire

α = longitud del camino magnético en cm

A = área del camino del flujo magnético en cm²

El flujo magnético en el espacio entre devanados está dado por:

$$\phi = \frac{F_M}{R} = \frac{1.78 NIA}{\alpha} \text{ (Maxwells) -----(4.8)}$$

La densidad de flujo magnético en el espacio H-L es:

$$B = \frac{\phi}{A} = \frac{1.78 NI}{\alpha} \text{ (Gauss) -----(4.9)}$$

La densidad del flujo del campo en el que se encuentran los devanados varía desde el valor dado por la ecuación de densidad de flujo hasta aproximadamente cero en las fronteras del grupo. Si consideramos una distribución uniforme de vueltas en el devanado, entonces la densidad de flujo promedio es:

$$B_{AV} = \frac{B}{2} = \frac{0.89 NI}{\alpha} \text{-----(4.10)}$$

Sustituyendo esta última ecuación en la fórmula de fuerza, se obtiene la fuerza en libras:

$$F = \frac{2.82 \times 10^{-7} (NI)^2 M_T}{\alpha} \text{ [Lb]-----(4.11)}$$

$$N = \frac{N_T}{n_{HL}} \text{-----(4.12)}$$

Donde:

N = vueltas por grupo, en un diseño balanceado.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

NT = vueltas totales en un devanado

nHL= número de grupos H-L

MT = promedio de vueltas medias de alta y baja tensión.

En condiciones de corto circuito la fuerza entre devanados generalmente conocida como la fuerza de corto circuito horizontal es:

$$F_{HS} = F \left(\frac{100}{\%Z} \right)^2 = \frac{2.82}{10^3} \left(\frac{NI}{\%Z} \right)^2 \frac{M_T}{\alpha} \text{-----(4.13)}$$

Donde:

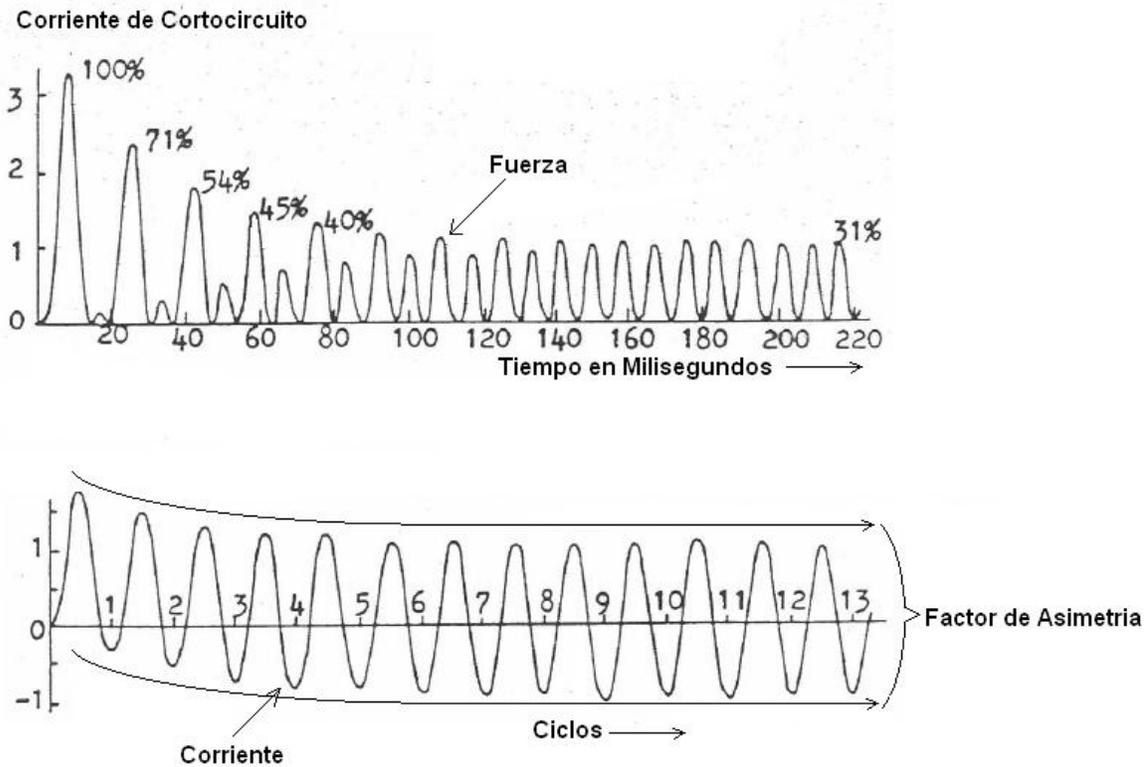
%Z es la impedancia del transformador en por ciento.

F_{HS} Son las Fuerzas Verticales.

Sin conocer la distribución exacta de NI en el sentido axial, las fuerzas verticales pueden ser calculadas bajo la consideración de que las fuerzas totales actúan en los centros eléctricos de los devanados. Si los devanados no están perfectamente alineados axialmente entonces la fuerza entre los centros eléctricos tendrá una componente vertical.

En la práctica, los devanados y núcleo de un transformador de potencia están contenidos dentro de un recipiente cerrado y la dirección de los devanados no son visibles.

4.3.- Corrientes Asimétricas y Factor de Asimetría.



Grafica 4.1.- Corriente Asimétrica y Factor de Asimetría.

La corriente de asimetría es la variación en el ciclo cuando se produce el corto circuito que se va estabilizando con el tiempo, siendo k un factor de asimetría que depende de la relación r/x para el sistema en estudio, por lo tanto el factor k se puede emplear para la relación r/x .

El pico de la corriente asimétrica del primer ciclo, que el transformador debe soportar, debe determinarse como sigue:

$$I_{CC} = kI_{CC} \text{ ----- (4.14)}$$

Donde:

$$k = \left[1 + \left(e^{-\left(\Phi + \frac{\pi}{2}\right) \frac{x}{r}} \right) \text{sen} \Phi \right] \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \right) \text{ ----- (4.15)}$$

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Donde:

e .- es la base de los logaritmos naturales

\emptyset .- $\tan^{-1} (x/r)$, en radianes.

x/r .- Es la relación de reactancia a resistencia, ambas efectivas en corriente alterna y en ohm. Es la impedancia total que limita la corriente de falla para la conexión del transformador cuando ocurre el cortocircuito. Cuando la impedancia del sistema está incluida en el cálculo de la corriente de falla, la relación x/r de la impedancia externa se considera igual a la del transformador, si no se especifica otra cosa.

Para valores de k véase la siguiente tabla.

Valores de k

r/x	x/r	k
0,001	1 000	2,824
0,002	500	2,820
0,003	333	2,815
0,004	250	2,811
0,005	200	2,806
0,006	167	2,802
0,007	143	2,798
0,008	125	2,793
0,009	111	2,789
0,010	100	2,785
0,020	50	2,743
0,03	33,3	2,702
0,04	25	2,662
0,05	20	2,624
0,06	16,7	2,588
0,07	14,3	2,552
0,08	12,5	2,518
0,09	11,1	2,484
0,10	10,0	2,452
0,20	5	2,184
0,3	3,33	1,990
0,4	2,5	1,849
0,5	2	1,746
0,6	1,67	1,669
0,7	1,43	1,611
0,8	1,25	1,568
0,9	1,11	1,534
1,0	1	1,509

NOTA – Los valores k dados en la tabla son aproximados dentro de un 0,7% de los valores calculados por método exacto.

4.4.- Efecto Mecánico y Térmico de un Cortocircuito en Transformadores.

Al ir aumentando las potencias y las tensiones transportadoras, se han hecho más importantes los aspectos térmicos y mecánicos de los transformadores, tanto en términos del control del sobrecalentamiento local como en la necesidad de soportar las fuerzas electrodinámicas producidas por los fallos de cortocircuito en los sistemas eléctricos.

Las elevadas corrientes que circulan en los devanados cuando se produce un cortocircuito traen como consecuencia efectos peligrosos para el transformador.

La primera consecuencia es de tipo térmico, al ser las corrientes de corto circuito varias veces mayor a la corriente nominal del transformador aparecen pérdidas por el efecto joule o pérdidas en el cobre muy superiores a las nominales lo que origina un peligroso aumento de temperatura.

La masa del transformador impide que el aumento de temperatura sea instantáneo ya que tiene que pasar un cierto tiempo desde que empieza el cortocircuito y el calor generado por este eleva la temperatura del transformador a niveles peligrosos, este tiempo de calentamiento es mucho mayor que la constante de tiempo t_{cc} (tiempo de cortocircuito) lo que significa que durante todo este tiempo de calentamiento todas las corrientes que circulan en los devanados del transformador están en su régimen permanente, esto quiere decir que la componente transitoria de las corrientes de corto circuito de los devanados proporciona una cantidad de calor muy pequeña comparada con la necesaria para elevar la temperatura hasta valores peligrosos, y como consecuencia se le puede despreciar y solo tener en cuenta la componente permanente.

El otro efecto peligroso de las corrientes de cortocircuito es el de tipo mecánico, ya que las bobinas de los transformadores son una serie de conductores próximos y que a su vez son recorridas por corrientes, cuando existen dos conductores recorridos por corrientes aparecen entre ellos unas fuerzas (fuerzas de Laplace) que tienden a desplazar o a deformar los devanados, las fuerzas de Laplace surgen de forma instantánea en cuanto circulan las corrientes y alcanzan mayores valores cuando la corriente es mas grande, por lo tanto el caso mas peligroso cuando la corriente de cortocircuito toma su mayor valor instantáneo, es cuando circula la corriente de choque I_{1ch} .

La corriente de choque I_{1ch} es el máximo valor instantáneo que puede alcanzar la corriente que circula por el devanado primario del transformador cuando el corto circuito se produce en las peores condiciones posibles.

4.5.- Modos de Falla Típicos Para Transformadores Tipo Columna y Acorazado.

Las deformaciones en los bobinados pueden dar como resultado fallas debido a daños en la aislación entre espiras, resultando varios cortocircuitos, lo que significa la inmediata finalización de la vida de la máquina.

Se espera que los transformadores sobrevivan un número de cortocircuitos sin fallas, pero una vez que se produce una deformación significativa de los embobinados, la probabilidad de sobrevivir a nuevos cortocircuitos se ven reducida fuertemente debido al incremento de las tensiones electromagnéticas.

Cualquier reducción en la sujeción del bobinado debido a la disminución del aislamiento causado por el envejecimiento incrementará la probabilidad de falla.

Como consecuencia, habrá un riesgo prematuro de falla asociado con el aumento de las corrientes y las temperaturas que puede manifestarse a corto plazo con un daño importante en el transformador, o a largo plazo como un envejecimiento acumulado.



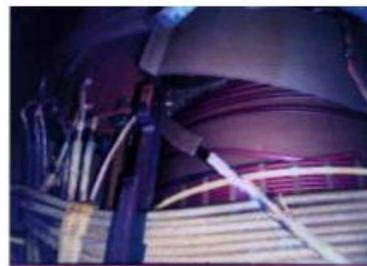
(a)



(b)



(c)

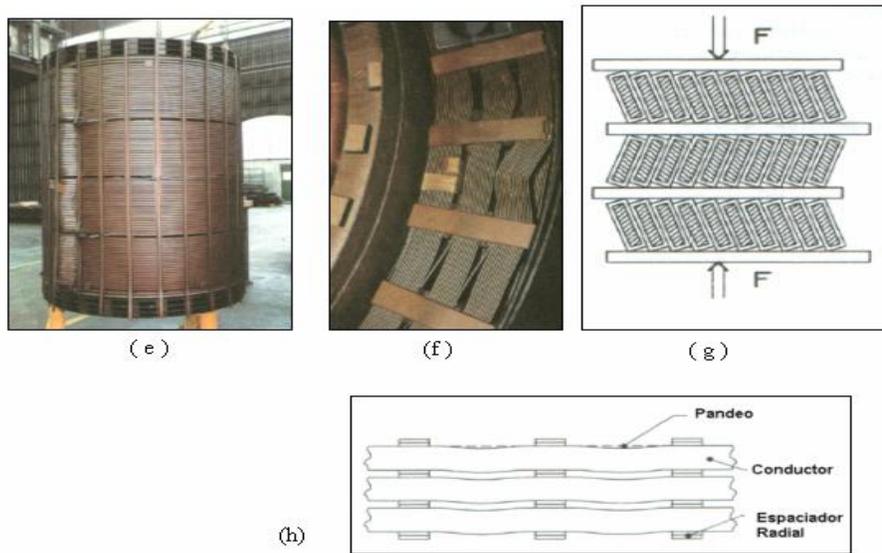


(d)

- a) Desplazamiento entre vueltas por fuerza axial
- b) Deformación de bloques espaciadores por efecto de fuerzas de compresión en devanados tipo acorazado.
- c) Pandeo en conductores por efecto de fuerzas axiales.
- d) Torcimiento de conductores superiores.

Figura 4.2A.- Deformaciones en los Devanados.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).



- e) Falla por pandeo radial
- f) Deformación radial en discos fenómeno de inclinación en conductores por exceso de fuerza axial.
- g) fenómeno de inclinación en conductores por exceso de fuerza axial.
- h) Pandeo entre espaciadores radiales por efecto de fuerzas axiales

Figura 4.2B.- Deformaciones en los Devanados.

Las fuerzas que aparecen sobre los devanados de un transformador durante un corto circuito tienen dos componentes: radiales y axiales que tiende a comprimir el devanado interior y expandir el devanado exterior. Las fuerzas electromagnéticas tienden a deformar los devanados, de tal forma que se reduce la densidad magnética almacenada en su volumen. En un transformador con dos devanados el devanado interior tiende a reducir su radio y el exterior a aumentarlo. En la dirección axial, los devanados se comprimen, con lo que se reduce su altura.



Transformador Tipo Columnas

Bobina del Transformador Tipo Columnas

Bobina del Transformador Después del Cortocircuito

Figura 4.3.- Cortocircuito en las Bobinas del Transformador.

Protecciones.

Las protecciones tienen el fin común de proteger al transformador, estas se eligen de manera selectiva y se clasifican en protección primaria y protección respaldo, actuando de modo simultáneo al inicio de la falla.

Objetivos: Protección primaria a la línea propia (A-B) y no operar para cortocircuitos externos.

Se denominan protecciones de sobrecorriente a aquellas con selectividad relativa que responden a la corriente del elemento protegido y que operan cuando esa corriente es mayor que cierto valor preestablecido.

Configuración de circuitos primarios de distribución.

- Alimentadores Radiales.
- Alimentadores Tipo Anillo.
- Red Primaria Mallada.

Protección de sobrecorriente.

Ventajas:

- 1) Únicamente se requiere información de corrientes.
- 2) Son simples y económicas.
- 3) Elementos de fase: baja sensibilidad.
- 4) Elementos de tierra: alta sensibilidad.
- 5) Necesitan frecuentemente revisión de ajuste.
- 6) Aplicación: básicamente en líneas radiales.

Dispositivos de protección.

- Fusibles.
- Restauradores automáticos.
- Seccionadores.
- Interruptores de bajo voltaje (Breakers).
- Relevadores de protección.

En la figura 4.4 la corriente secundaria (I_s) del TC es la misma que entra a la bobina de operación del relevador de sobre corriente (I_r).

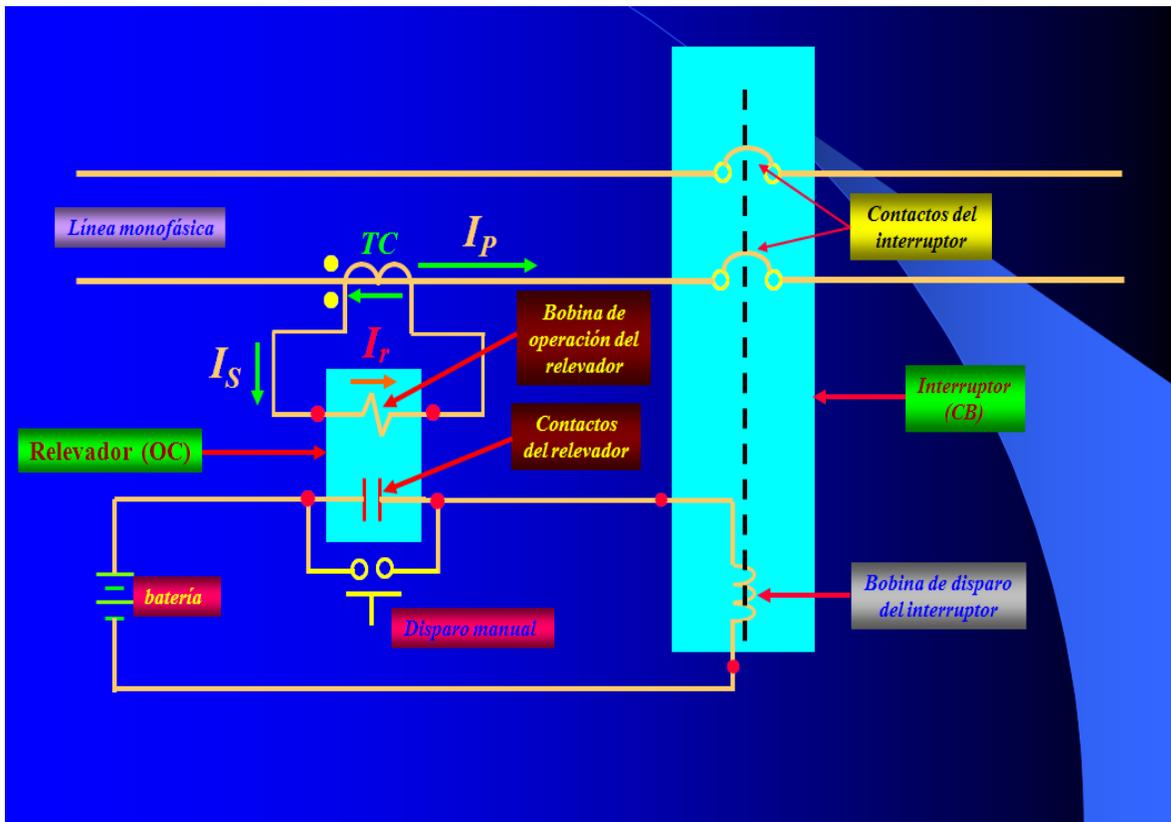


Figura 4.4.- Diagrama esquemático de la aplicación de una protección de sobrecorriente.

Características funcionales de los fusibles.

- Combinan la detección de la falla y la interrupción de la corriente.
- Características de operación T-C extremadamente inversas.
- No pueden interrumpir y restablecer la carga.
- Operación monofásica.
- Necesitan reemplazo después de cada operación.

Características funcionales de los restauradores.

- Combinan la detección de la falla, interrupción de la corriente y restablecimiento (recierre).
- La secuencia de operación incluye tres o cuatro disparos y dos o tres recierres.
- Diferentes características T-C, en la misma secuencia de operación.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Otras características funcionales de los restauradores:

- Elemento de falla a tierra adicional.
- Capacidad de interrumpir y reconectar la carga.
- Versión monofásica y trifásica.

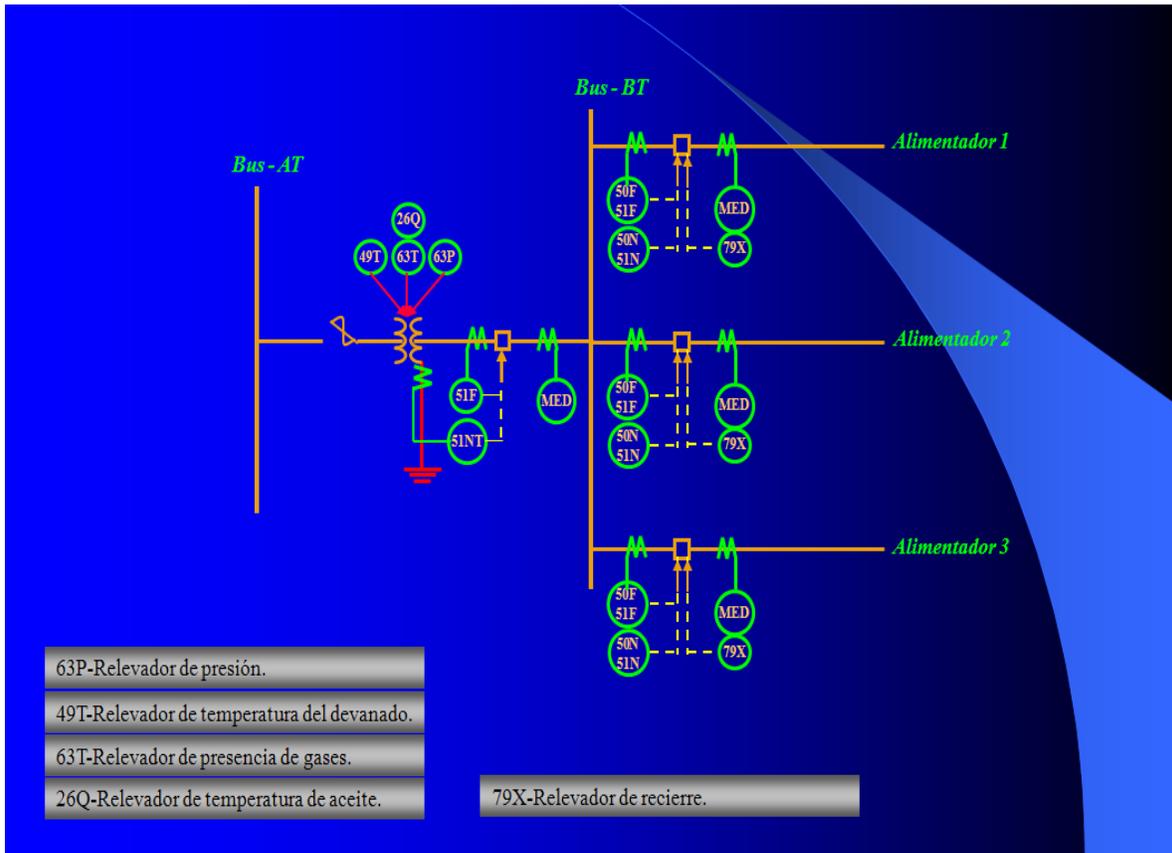


Figura 4.5.- Esquema de protección en Subestación con transformador menor de 10 MVA.

Clasificación de restauradores.

- Monofásicos o trifásicos.
- Con Control Hidráulico o Electrónico.
- Interrupción en Vacío o Aceite.

CAPITULO 5

**CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS
MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES TIPO GENERADOR.**

5.1.- Requisitos Normalizados de Cortocircuito para Transformadores (ANSI-IEEE C57.12.00).

V.1.1.- Generalidades

Los transformadores sumergidos en líquido aislante, deben diseñarse y construirse para soportar los esfuerzos mecánicos y térmicos, producidos por cortocircuitos externos. Los cortocircuitos externos deben incluir fallas trifásicas, de una fase a tierra, doble fase a tierra y entre fases en cualquier grupo de terminales. En transformadores con más de dos devanados, se debe considerar el suministro de corriente para recibir una potencia de falla del sistema a través de no más de dos grupos de terminales y sólo en terminales de un valor mayor de 35% de la terminal del devanado de más alta capacidad. Los requerimientos, para otras condiciones de falla, deben ser establecidos explícitamente en las especificaciones del usuario.

V.1.2.- Duración de las pruebas de cortocircuito.

Cuando se lleven a cabo pruebas de cortocircuito, la duración de cada prueba debe ser de 0,25 s, excepto aquella que satisfaga las necesidades de la corriente simétrica de cortocircuito, la cual debe ser hecha con una duración mayor en transformadores. La duración de la prueba más larga, en cada caso, debe ser como sigue:

- 1) Categoría II t= 1,0 s
- 2) Categoría III t= 0,5 s

Tabla de categorías de los transformadores según su capacidad.

Categoría	Capacidad en kVA ¹	
	Monofásico	Trifásico
I ²	5 a 500	15 a 500
II	501 a 1667	501 a 5000
III	1668 a 10000	5001 a 30000
IV	Arriba de 10000	Arriba de 30000

¹ Todas las capacidades en kVA son las mínimas de placa para los devanados principales.

² La categoría I corresponde a transformadores de distribución.

En aplicaciones especiales donde son comunes largos tiempos de falla en servicio, deben establecerse pruebas especiales de larga duración en las especificaciones del usuario. Cuando se lleven a cabo pruebas consecutivas sin permitir un tiempo para enfriamiento de los devanados, debe vigilarse la

temperatura y evitar que se sobrepasen los límites de temperatura para los transformadores bajo condiciones de cortocircuito.

V.1.3.- Magnitud de la corriente de cortocircuito

V.1.3.1.- Categoría II

La corriente simétrica de cortocircuito debe ser calculada utilizando solamente la impedancia del transformador.

V.1.3.2.- Categorías III y IV

La corriente simétrica de cortocircuito debe ser calculada utilizando la impedancia del transformador más la impedancia del sistema, según sea especificada por el usuario.

V.1.3.3.- Devanados estabilizadores

Los devanados estabilizadores utilizados en transformadores trifásicos (devanados en delta sin terminales externas) deben ser capaces de soportar la corriente resultante de cualquiera de las fallas del sistema, tomando en cuenta la forma de conectar el transformador a la red de tierras. El usuario debe proporcionar la capacidad, tensión e impedancia del devanado estabilizador.

V.1.4.- Cálculos de corriente de cortocircuito.

La corriente simétrica de cortocircuito en amperes rmc. Se calcula como sigue:

$$I_{CC} = \frac{I_b}{Z_T + Z_S}$$

Donde:

I_b = Es la corriente base para la derivación seleccionada, en amperes rmc

Z_T = Es la impedancia del transformador para la derivación seleccionada, en por unidad a la misma potencia aparente base usada para I_b

Z_S = Es la impedancia del sistema o de aparatos permanentemente conectados en por unidad a la misma potencia base usada para I_b .

La corriente simétrica de corto circuito (I), en múltiplos de la corriente base se obtiene con la siguiente ecuación:

$$I = \frac{I_{CC}}{I_b}$$

V.1.4.1.- Características del sistema

En las categorías III y IV, para cada juego de terminales del transformador, deben ser especificadas las características del sistema (capacidad de falla del sistema y la relación $X0/X1$). Para terminales conectadas a máquinas rotatorias, debe especificarse la impedancia del equipo conectado.

V.1.4.2.- Limitaciones de corriente

En el caso de que no se puedan cumplir los requisitos de resistencia mecánica del transformador, se puede limitar la corriente de falla por medio de impedancias externas a los devanados principales. Si los requisitos de corriente pueden ser cumplidos, en la propuesta técnica del fabricante, deben especificarse el límite de corriente de falla que soporta el transformador e incorporar esta información en la placa de datos del transformador.

V.1.4.3.- Requisitos especiales a ser considerados para las condiciones de aplicación

Los siguientes aspectos influyen en la capacidad de aguante mecánico de los transformadores y requieren de consideraciones especiales que deben ser explícitamente definidas en las especificaciones del transformador. Estos aspectos están relacionados con la magnitud de la corriente de falla, la duración o la frecuencia de ocurrencia:

- 1) Los transformadores con impedancia extremadamente baja, la cual depende de la impedancia de los aparatos conectados directamente para limitar la corriente de falla.
- 2) Los transformadores susceptibles a sobrecorrientes excesivas, producidas por la conexión del generador al sistema en una condición fuera de sincronía.
- 3) Terminales de transformador conectadas a máquinas rotatorias (tales como motores o condensadores síncronos) que pueden actuar como generador y alimentar corriente al transformador bajo condiciones de falla del sistema;
- 4) Tensión de operación mayor que la nominal mantenida en la(s) terminal(es) no fallada (s) durante condiciones de falla.
- 5) Alcanzar frecuentemente sobrecorrientes ocasionadas por el método de operación o la aplicación particular (por ejemplo transformadores de horno, transformadores de arranque, aplicaciones usando interruptores a tierra para protección con relevadores, transformadores para sistemas de tracción).
- 6) Transformadores auxiliares de estación o transformadores directamente conectados a un generador, que pueden estar sujetos a fallas de duración

prolongada como resultado de los largos tiempos de apertura del interruptor de campo del sistema de excitación de los generadores.

V.2.- Componentes.

Las componentes de los transformadores tales como guías, boquillas, cambiadores de derivación bajo carga, cambiadores de derivación de operación desenergizada, transformadores de corriente y otros, que lleven la corriente de carga en forma continua, deben cumplir con todos los requisitos de V.1.3 y V.1.4. Si no está explícitamente especificado, a los cambiadores bajo carga no se les puede exigir cambiar derivaciones satisfactoriamente bajo condiciones de cortocircuito.

V.3.- kVA Base.

V.3.1.- kVA base de un devanado

Para obtener la capacidad base equivalente en kVA en un transformador sin capacidad auto enfriada, debe aplicarse el factor de multiplicación de la tabla 20 a los kVA máximos de la placa de datos.

V.3.2.- Corriente base de los devanados sin conexión de autotransformador

Para transformadores con dos o más devanados sin conexiones de autotransformador, la corriente base de los devanados se obtiene dividiendo los KVA base del devanado entre los kV nominales del devanado por fase.

V.3.3.- Corriente base de los devanados con conexiones de autotransformador

Para transformadores con dos o más devanados, incluyendo una o más conexiones de autotransformador, la corriente base y los kVA base de cualquier devanado diferente al devanado serie o común, se determinan como se indica a continuación:

- a) La corriente base del devanado serie es igual a los kVA base por fase en la terminal del devanado serie (H), divididos entre la tensión de la mínima derivación de capacidad plena en la terminal del devanado serie (H) en kV línea a neutro;
- b) la corriente base del devanado común es igual a la corriente de línea en la terminal del devanado común (X), menos la corriente de línea en la terminal del devanado serie (H), bajo condiciones de carga, resultando una diferencia fasorial máxima. Todas las condiciones de carga simultáneas indicadas en la placa de datos deben considerarse con objeto de obtener el valor máximo;
- c) las corrientes base son calculadas tomando en cuenta la capacidad autoenfriada o la equivalente usando los factores de multiplicación.

V.3.4.- Corriente base de devanados de un transformador con impedancia extremadamente baja

La corriente base para cada devanado es la corriente máxima que puede conducir ese devanado para cualquier condición de carga indicada en la placa de datos. Las corrientes base son calculadas a partir de la condición de autoenfriamiento o la equivalente usando los factores de multiplicación de la tabla 20.

V.3.5.- Límites de temperatura de transformadores para condiciones de cortocircuito

La temperatura del conductor en los devanados de transformadores bajo las condiciones de cortocircuito, no deben exceder de 250°C para conductores de cobre, o 200°C para conductores de aluminio (EC). Para aleaciones de aluminio se permite una temperatura máxima de 250°C (la aleación de aluminio debe tener propiedades de resistencia al destemple a 250°C equivalentes al aluminio EC a 200°C o para aplicaciones de aluminio EC, donde las características del material totalmente recocido o destemplado satisface los requerimientos mecánicos).

Estos límites de temperatura fueron fijados considerando los siguientes factores:

- a) Generación de gas a partir del líquido aislante o del aislamiento sólido.
- b) E cocido del conductor.
- c) Envejecimiento del aislamiento.

V.4.- Cálculo de la temperatura de los devanados durante un cortocircuito.

La temperatura final del devanado (T_f) al concluir un cortocircuito de duración "t", debe calcularse en base a todo el calor almacenado en el material del conductor y de su aislamiento asociado, conforme a la siguiente formula.

$$T_f = T_k + T_s \left[\left(\frac{W_s}{C} + E + 0.6m \right) + T_s \right]$$

$$m = \frac{W_s t}{C (T_k + T_s)}$$

Todas las temperaturas están en grados Celsius y donde:

Estas ecuaciones son fórmulas aproximadas y su uso debe restringirse a valores de $m=0,6$ o menores.

Para valores de m superiores a 0,6 deben usarse las siguientes fórmulas para mayor exactitud:

$$T_f = T_k + T_s \left[\left(e^{2m} + E (e^{2m} - 1) \right) + 1 \right] + T_s$$

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Donde:

T_k es una constante que para el cobre es 234,5°C y para el aluminio de grado EC es 225°C;

T_s es la temperatura inicial.

- 1) Temperatura ambiente de 30°C, más la elevación promedio de temperatura del devanado, más la tolerancia del punto más caliente recomendado por el fabricante.
- 2) Temperatura ambiente de 30°C, más el límite de elevación del punto más caliente especificado del devanado para el tipo de transformador apropiado; e es la base de los logaritmos naturales.

E son las pérdidas por corrientes parásitas en por unidad, basadas en las pérdidas por resistencia W_s a la temperatura inicial, y se calcula con la siguiente formula:

$$E = E_r \left(\frac{T_k + T_r}{T_k + T_s} \right)^2$$

Donde:

E_r son las pérdidas por corrientes parásitas en por unidad, a la temperatura de referencia;

T_r es la temperatura de referencia, la cual es igual a 20°C de temperatura ambiente más la elevación promedio del devanado;

T_s son las pérdidas por resistencia óhmica del devanado debidas a la corriente del cortocircuito, y calculadas a la temperatura de referencia en Watts por kg de material del conductor:

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

Donde:

W_r son las pérdidas por resistencia ohmica del devanado, debidas a la corriente nominal, y calculadas a la temperatura de referencia en watts;

N es la magnitud del cortocircuito simétrico, en “número de veces” la corriente nominal;

M es la masa del conductor en kilogramos;

C es la capacitancia térmica promedio por cada 0,454 kg del conductor y su aislamiento por vuelta asociado, en watt-segundo sobre grados Celsius-kilogramo. Este valor debe determinarse por iteración de cualquiera de las ecuaciones empíricas siguientes:

$$C = 174 + 0.0225(T_s + T_f) + 110A_i/A_c \quad \text{paracobre.}$$

$$C = 405 + 0.1(T_s + T_f) + 360A_i/A_c \quad \text{paraaluminio.}$$

Donde:

A_i es la sección transversal del aislamiento por vuelta:

$$A_i = A_t - A_c$$

A_t - Es la sección transversal del conductor aislado;

A_c - Es la sección transversal del conductor desnudo.

5.2.- Cálculo de Corrientes Máximas de Cortocircuito.

La corriente máxima de cortocircuito se calcula cuando en el sistema se tiene el mayor número de fuentes de generación operando.

La corriente mínima de cortocircuito, se utiliza para realizar verificaciones del ajuste de protecciones y se obtiene cuando en el sistema se encuentra operando el menor número de fuentes de generación.

Los resultados obtenidos del cálculo de cortocircuito máxima son:

- La corriente de las diferentes componentes de falla.
- Los voltajes después de la falla en todas las barras del sistema eléctrico.

Para el cálculo de cortocircuito es conveniente efectuar las siguientes aproximaciones:

- 1) El generador se modela como una fuente de tensión de valor 1.0 P.U., en serie con su impedancia.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

- 2) Todos los cálculos se deben realizar en por unidad.
- 3) Las cargas se representan por su impedancia equivalente, independiente del nivel de voltaje.
- 4) Todas las barras del sistema tienen un voltaje nominal de 1.0 P.U., respecto a tierra, de forma que no fluyen corrientes de pre falla en la red, pero respecto a la red nodal es cero.
- 5) El sistema eléctrico se analiza como si estuviera en régimen estable.
- 6) Se pueden despreciar todas las conexiones en paralelo desde las barras del sistema al nodo de referencia (neuro) en los circuitos equivalentes que representan a las líneas de transmisión y a los transformadores.

El procedimiento para calcular las corrientes de cortocircuito máxima en un sistema eléctrico consta de los siguientes pasos:

- *Dibujar* el diagrama unifilar con todas las fuentes y todas las impedancias del circuito.
- *Convertir impedancias*, del diagrama en estudio, en valores en base común (sistema por unidad).
- *Combinar impedancias*, reducción del diagrama de impedancias para calcular la impedancia equivalente.
- *Calcular la corriente de cortocircuito*; el paso final es el cálculo de la corriente de cortocircuito, las impedancias de las máquinas rotatorias usadas en el circuito dependen del estudio en cuestión.
- *Calcular las corrientes en los componentes del sistema*.

Debido a la asimetría existente en la corriente de cortocircuito, y al hecho de que la contribución de los motores depende del tiempo transcurrido desde el instante en que se produce la falla, se diferencian las siguientes corrientes de cortocircuito:

- Corrientes momentáneas.
- Corrientes de interrupción.
- Corrientes permanentes.

Corrientes momentáneas.- La corriente momentánea corresponde al valor efectivo de la corriente de cortocircuito generada en el primer ciclo después que ocurrió la falla.

Corrientes de interrupción.- La corriente de interrupción, corresponde al valor efectivo de la corriente de cortocircuito en el intervalo comprendido entre los 1,5 y los 8 ciclos, después de ocurrida la falla.

Corrientes permanentes.- La amplitud de la corriente de cortocircuito permanente I_k , depende del estado de saturación del circuito magnético de los generadores.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

5.3.- Programa de Cálculo y Análisis de Resultados.

Ejemplo: Tenemos un generador conectado a un transformador Δ -Y, los datos del ejemplo a considerar son:

- a) Transformador trifásico a 60Hz, de 345/24KVA
- b) Capacidad máxima 1000MVA
- c) %Z del Transformador= 8% Base OA
- d) %Z del Generador= 18% Base OA
- e) %Z del Sistema=2% Base OA
- f) Relación de reactancia de sec. cero/sec. negativa (X_0/X_1)= 2
- g) Base OA equivalente del Transformador= 0.6

El programa se hizo con la hoja de cálculo de Excel que nos permite calcular el cortocircuito en los cuatro tipos de falla comparando sus resultados para cada variación de la impedancia y viendo su comportamiento en las graficas de cada falla en estudio.

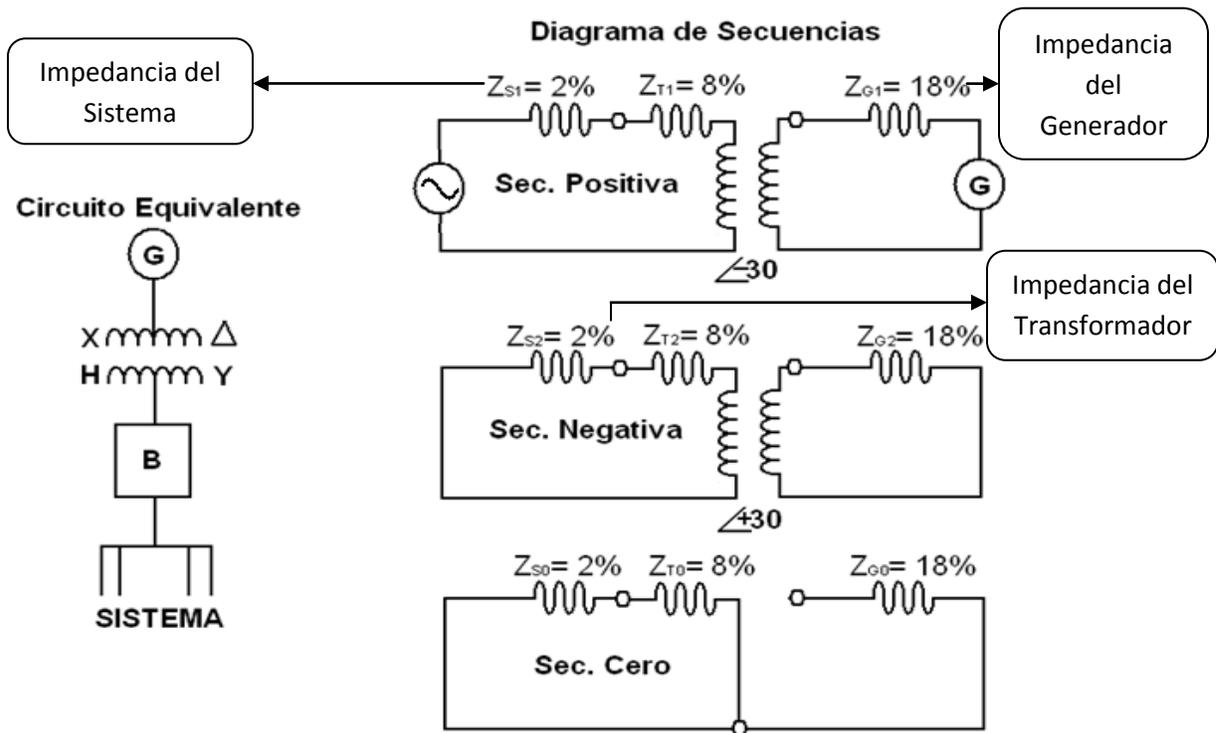
CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR-GENERADOR		
VOLTAJE DE SALIDA EN ALTA DEL TRANSFORMADOR (HV)	345	KV
VOLTAJE DE SALIDA EN BAJA DEL TRANSFORMADOR (LV)	24	KV
IMPEDANCIA BASE DEL TRANSFORMADOR (FOA)	1000	MVA
IMPEDANCIA DEL TRANSFORMADOR	8	%Zr
IMPEDANCIA DEL GENERADOR	18	%Zg
IMPEDANCIA DEL SISTEMA	2	%Zs
ANGULO	30	θ
RELACION DE REACTANCIA DE SECUENCIA CERO/SEC. NEG.	2	X_0/X_1
BASE OA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR	0.6	
BASE FOA (OFAP 1)	1000	MVA
BASE FOA (OFAP 2)	780	MVA
BASE OA (ONAN)	600	MVA
AMPERS BASE OA EN ALTA (HV)	1004.09	A
AMPERS BASE OA	8333.33	A
AMPERS BASE OA EN BAJA (LV)	13888.89	A

Tabla de resultados para cada tipo de falla, basado en los cálculos con sus impedancias como base del Transformador-Generador (GSU).

Tipo de Falla	Falla en la Terminal	Ampers en PU	IT Del Sistema
Trifásica	H	6.41	6436.46
	X	16.67	138885.83
Una Línea a Tierra	H	12.44	12488.65
	X	*	*
Doble Línea a Tierra	H	10.20	10239.19
	X	16.67	138885.83
Línea a Línea	H	5.55	5573.972
	X	16.67	138885.83

H.- Terminal de Salida en Alta Tension
X.- Terminal de Salida en Baja Tension

Cálculo de Falla Trifásica:



Para realizar el cálculo utilizamos los valores de base de la impedancia del Transformador.

Para calcular la falla en la terminal H (alta):

$$I = \left[\left(\frac{100}{Z_{G1} + Z_{T1}} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) \right] = \left[\left(\frac{100}{18 + 8} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) \right] =$$

$$I = 6.41 \text{ P.U. Base OA}$$

Para calcular la falla en la terminal X (baja):

$$I = \left[\left(\frac{100}{Z_{S1} + Z_{T1}} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) \right] = \left[\left(\frac{100}{2 + 8} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) \right] =$$

$$I = 16.67 \text{ P.U. Base OA}$$

Nota: Estos son resultados de las Impedancias base del transformador, Generador y el Sistema en estudio por lo que son tomados como base para la falla Trifásica.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Tablas de Resultados y Graficas Para Falla Trifásica.

Falla Trifásica			
%Z Transformador	I_{TH}	I_{TX}	Unidad
4	7.58	27.78	PU
4.5	7.41	25.64	PU
5	7.25	23.81	PU
5.5	7.09	22.22	PU
6	6.94	20.83	PU
6.5	6.80	19.61	PU
7	6.67	18.52	PU
7.5	6.54	17.54	PU
8	6.41	16.67	PU
8.5	6.29	15.87	PU
9	6.17	15.15	PU
9.5	6.06	14.49	PU
10	5.95	13.89	PU
10.5	5.85	13.33	PU
11	5.75	12.82	PU
11.5	5.65	12.35	PU
12	5.56	11.90	PU

Tipo de Falla

Variaciones de la Impedancia

Impedancia Base de referencia

Variaciones de la Impedancia

Tabla 5.1A.- Resultados del Programa de Cortocircuito Para Falla Trifásica con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Transformador.

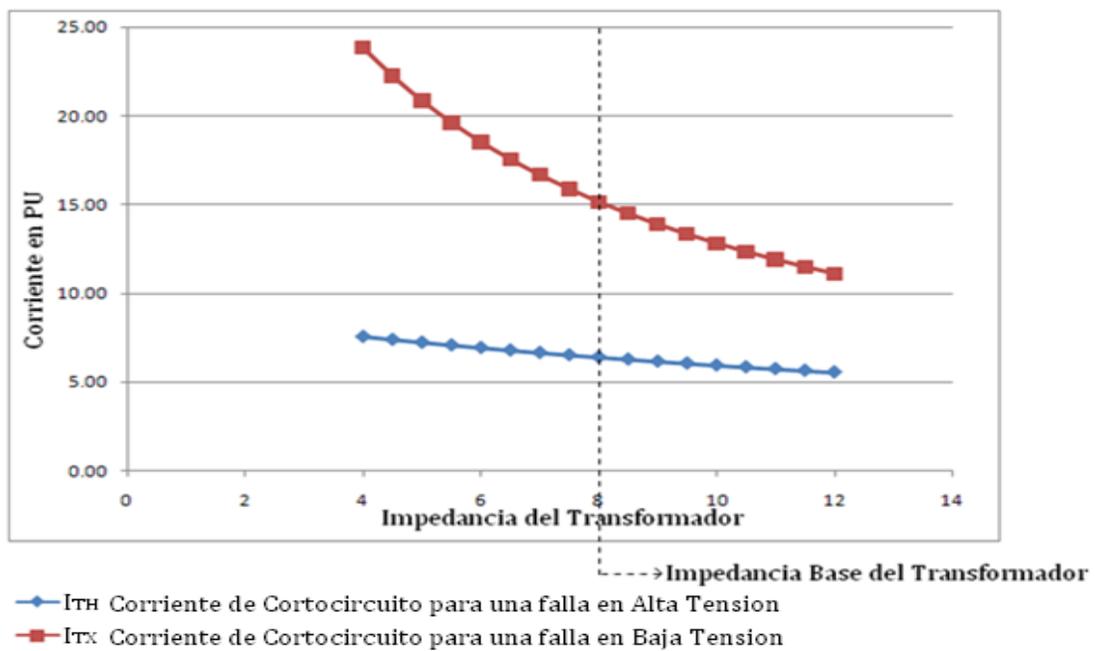
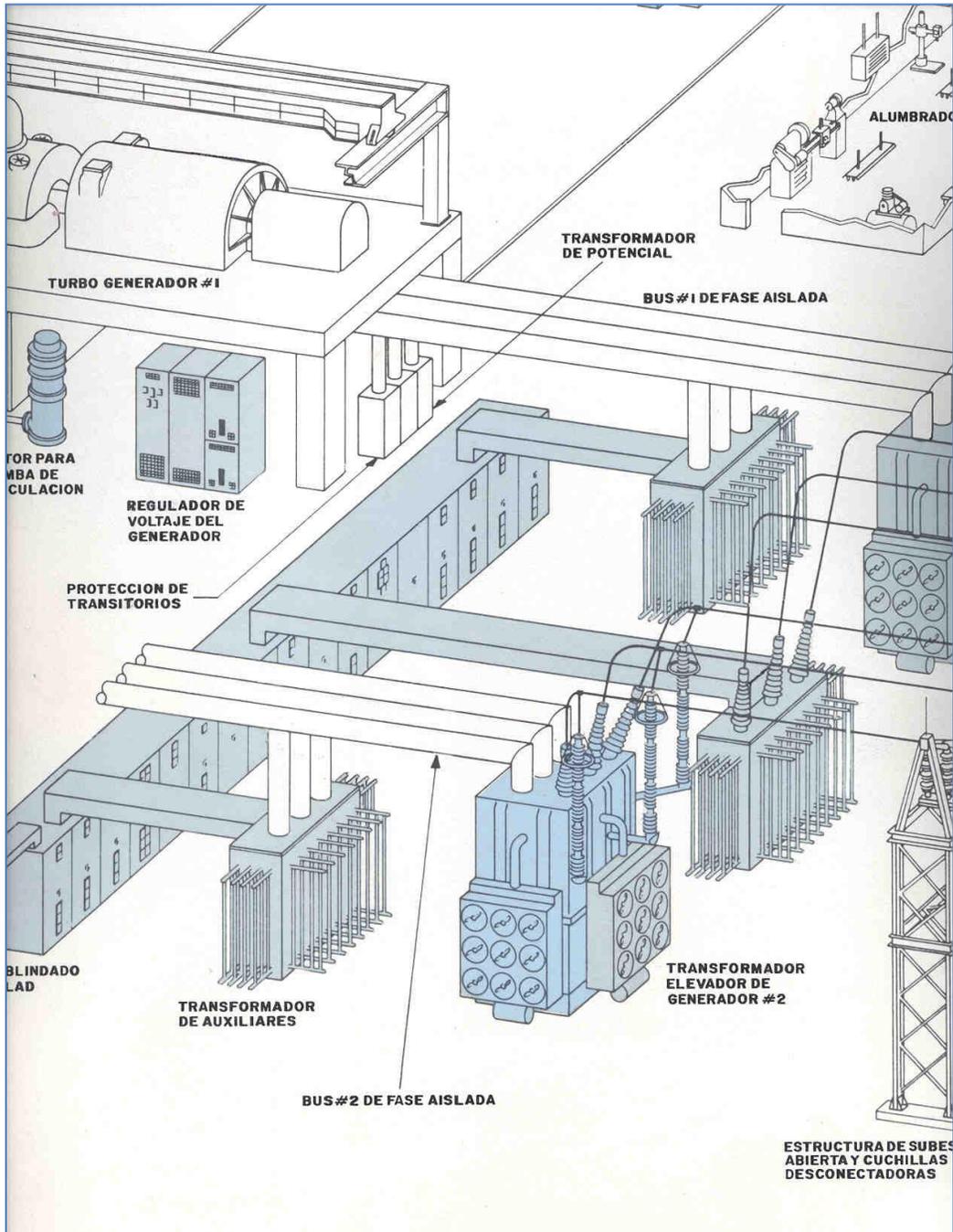


Figura 5.1A. Grafica de la Corriente de Cortocircuito Trifásico con una impedancia base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Transformador. En la grafica se

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

observa que cuando el cortocircuito es en las terminales de baja tensión (I_{Tx}), la magnitud de la corriente es más sensible a la variación en la impedancia del transformador. En esta gráfica también se observa que es más severa una falla en las terminales de baja tensión que en las terminales de AT. Esta es la razón por lo que la práctica común en la subestaciones de generación, normalmente la conexión entre los transformadores de unidad (GSU) y el generador se realiza a través de un bus de fase aislada (ver figura).



CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Falla Trifásica			
%Z del generador	ITH	ITX	Unidad
10	9.26	16.67	PU
11	8.77	16.67	PU
12	8.33	16.67	PU
13	7.94	16.67	PU
14	7.58	16.67	PU
15	7.25	16.67	PU
16	6.94	16.67	PU
17	6.67	16.67	PU
18	6.41	16.67	PU
19	6.17	16.67	PU
20	5.95	16.67	PU
21	5.75	16.67	PU
22	5.56	16.67	PU
23	5.38	16.67	PU
24	5.21	16.67	PU
25	5.05	16.67	PU
26	4.90	16.67	PU

Tabla 5.1B.- Resultados del Programa de Cortocircuito Para Falla Trifásica con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Generador.

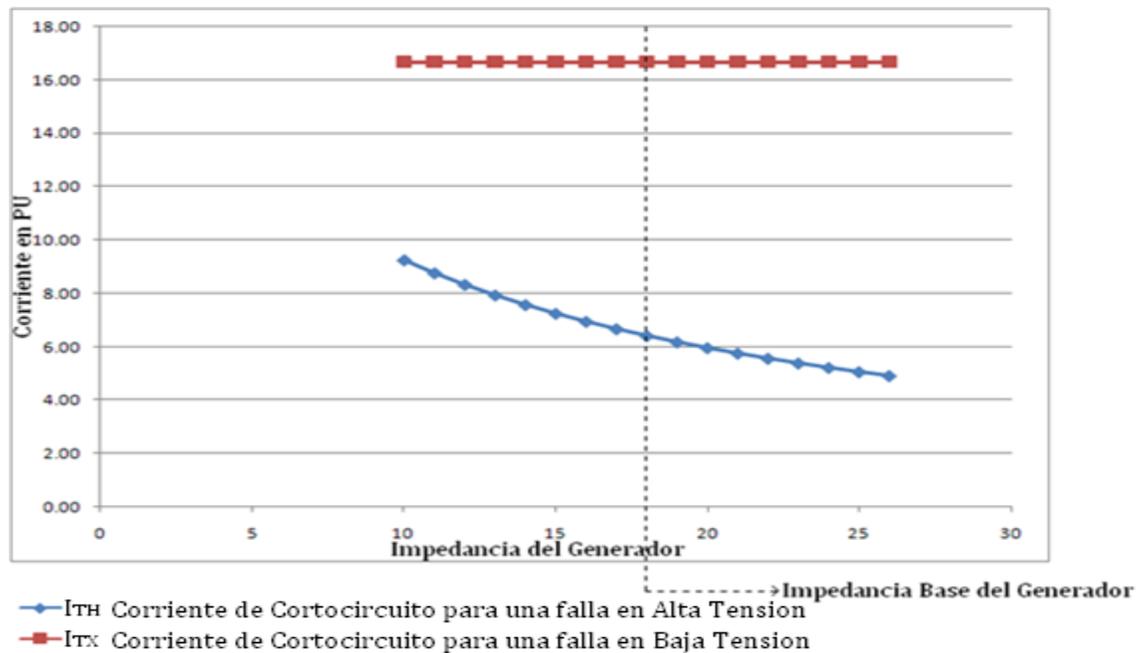


Figura 5.1B. Grafica de la Corriente de Cortocircuito Trifásico con una impedancia base y variaciones en la Impedancia del Generador. En la grafica se observa que para una falla en las terminales de baja tensión (ITX), la corriente de cortocircuito es independiente de la impedancia del generador.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Falla Trifásica			
%Z del Sistema	I_{TH}	I_{TX}	Unidad
0.5	6.41	19.61	PU
1	6.41	18.52	PU
1.5	6.41	17.54	PU
2	6.41	16.67	PU
2.5	6.41	15.87	PU
3	6.41	15.15	PU
3.5	6.41	14.49	PU
4	6.41	13.89	PU
4.5	6.41	13.33	PU
5	6.41	12.82	PU
5.5	6.41	12.35	PU
6	6.41	11.90	PU

Tabla 5.1C.- Resultados del Programa de Cortocircuito Para Falla Trifásica con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Sistema.

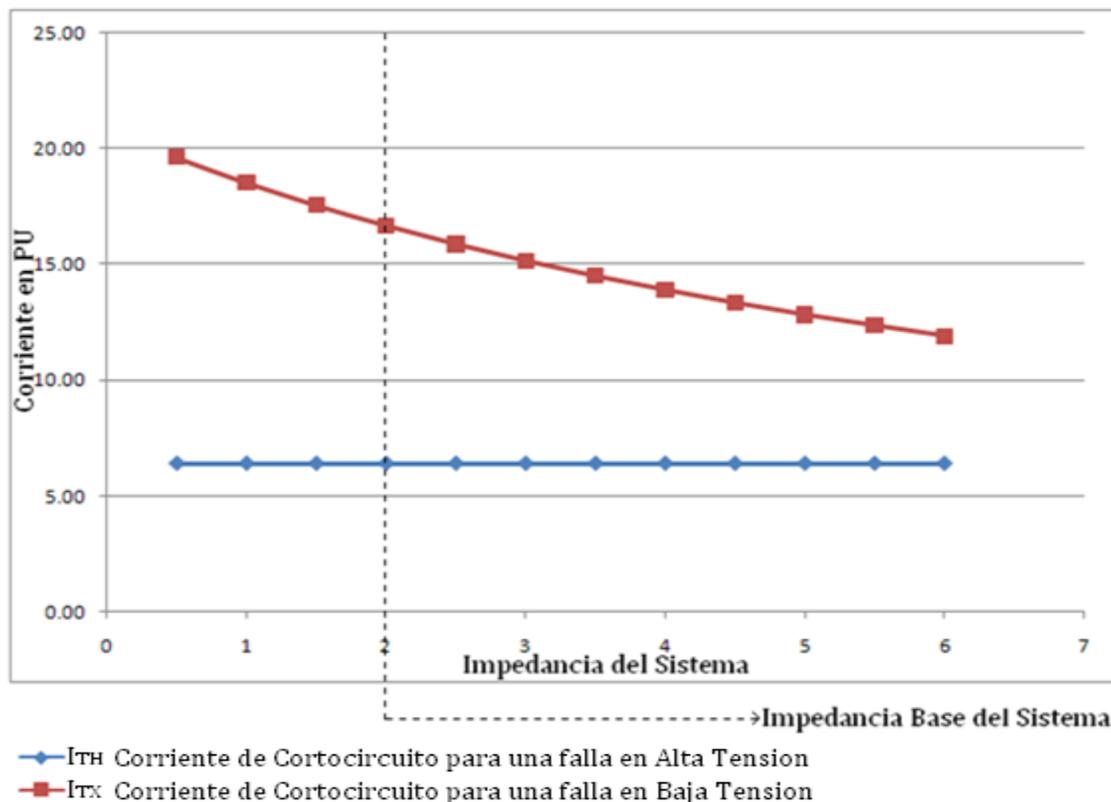


Figura 5.1C.- Grafica de la Corriente de Cortocircuito Trifásico con una impedancia base y variaciones en la Impedancia del sistema. Obsérvese en la grafica que una falla en las terminales de Alta Tensión (I_{TH}), la corriente de cortocircuito es independiente de la impedancia del Sistema.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Cálculo de Esfuerzos Mecánicos en la Falla Trifásica del Transformador.

Para calcular los esfuerzos mecánicos utilizamos la siguiente formula:

$$F_{rad} = 1.256 \frac{NI^2}{H_w} \pi dm 10^{-6} \text{ (Newton)}$$

Donde:

Frad= Fuerzas de repulsión en las bobinas (Newton)

N= Numero de vueltas en las bobinas (AT y BT)

I= Corriente de cortocircuito en las bobinas (Amper)

Hw= Altura de las bobinas (m)

dm= Diámetro medio de las bobinas (m)

Ejemplo: Para calcular las fuerzas de repulsión de las bobinas del lado de alta y baja tensión anexamos los siguientes datos:

- a) Numero de vueltas en la bobina de Alta Tensión 1640.
- b) Numero de vueltas en la bobina de Baja Tensión 120.
- c) Altura de las bobinas 2m.
- d) Diámetro medio de las bobinas 1.8m.

Para calcular la Corriente (I_{cc}) tomamos los valores base del transformador:

CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR-GENERADOR		
VOLTAJE DE SALIDA EN ALTA DEL TRANSFORMADOR (HV)	345	KV
VOLTAJE DE SALIDA EN BAJA DEL TRANSFORMADOR (LV)	24	KV
IMPEDANCIA BASE DEL TRANSFORMADOR (FOA)	1000	MVA
IMPEDANCIA DEL TRANSFORMADOR	8	%Z _T
IMPEDANCIA DEL GENERADOR	18	%Z _G
IMPEDANCIA DEL SISTEMA	2	%Z _S
ANGULO	30	θ
RELACION DE REACTANCIA DE SECUENCIA CERO/SEC. NEG.	2	X ₀ /X ₁
BASE OA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR		0.6
BASE FOA (OFAF 1)	1000	MVA
BASE FOA (OFAF 2)	780	MVA
BASE OA (ONAN)	600	MVA
AMPERS BASE OA EN ALTA (HV)	1004.09	A
AMPERS BASE OA	8333.33	A
AMPERS BASE OA EN BAJA (LV)	13888.89	A

$$I_{cc} = I_{PU} * I_{Base}$$

Calculando I_{base}:

$$I_{BaseLV} = \frac{BaseFOA(OFAF1) * 1000}{3 * Voltaje de salida en Baja Tension}$$

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

CARACTERISTICAS DEL TRANSFORMADOR-GENERADOR		
VOLTAJE DE SALIDA EN ALTA DEL TRANSFORMADOR (HV)	345	KV
VOLTAJE DE SALIDA EN BAJA DEL TRANSFORMADOR (LV)	24	KV
IMPEDANCIA BASE DEL TRANSFORMADOR (FOA)	1000	MVA
IMPEDANCIA DEL TRANSFORMADOR	8	%Z _T
IMPEDANCIA DEL GENERADOR	18	%Z _G
IMPEDANCIA DEL SISTEMA	2	%Z _S
ANGULO	30	θ
RELACION DE REACTANCIA DE SECUENCIA CERO/SEC. NEG.	2	X ₀ /X ₁
BASE OA EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR	0.6	
BASE FOA (OFAF 1)	1000	MVA
BASE FOA (OFAF 2)	780	MVA
BASE OA (ONAN)	600	MVA
AMPERS BASE OA EN ALTA (HV)	1004.09	A
AMPERS BASE OA	8333.33	A
AMPERS BASE OA EN BAJA (LV)	13888.89	A

$$I_{BaseLV} = \frac{1000 * 1000}{3 * 24} = 13888.89 \text{ Amp}$$

$$I_{Base} = I_{BaseLV} * \text{BaseOA del transformador}$$

$$I_{Base} = 1388889 * 0.6$$

$$I_{Base} = 833333 \text{ Amp}$$

Calculando I_{cc} para la Bobina en Alta Tensión.

$$I_{cc} = I_{PU} * I_{Base}$$

$$I_{ccTH} = 6.41 * 833333$$

$$I_{ccTH} = 5341665 \text{ Amp}$$

Corriente de Cortocircuito máxima en la salida de Alta Tensión.

Calculando I_{cc} para la Bobina en Baja Tensión.

$$I_{cc} = I_{PU} * I_{Base}$$

$$I_{ccTX} = 16.67 * 833333$$

$$I_{ccTX} = 13891661 \text{ Amp}$$

Corriente de Cortocircuito máxima en la salida de Baja Tensión.

Aplicando la Formula para la bobina en Alta Tensión:

$$Frad = 1.256 \frac{N_{TH} I^2}{Hw} \pi dm 10^{-6} \text{ (Newton)}$$

$$Frad_{TH} = 1.256 \frac{640 * 5341665^2}{2} \pi * 1.8 * 10^{-6}$$

$$Frad_{TH} = 1661805166 \text{ Newton}$$

Fuerzas de Repulsión en la Bobina de Alta Tensión.

Aplicando la Formula para la bobina en Baja Tensión:

$$Frad = 1.256 \frac{N_{TX} I^2}{Hw} \pi dm 10^{-6} \text{ (Newton)}$$

$$Frad_{TX} = 1.256 \frac{20 * 138916611^2}{2} \pi * 1.8 * 10^{-6}$$

$$Frad_{TX} = 822380196 \text{ Newton}$$

Fuerzas de Repulsión en la Bobina de Baja Tensión.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Tablas de Resultados y Graficas Para Esfuerzos Mecánicos en la Falla Trifásica.

Falla Trifásica				Esfuerzos Mecánicos		
%Z Transformador	I _{TH}	I _{TX}	Unidad	Frad TH	Frad TX	Unidad
4	7.58	27.78	PU	23238198.49	22838413.22	Newton
4.5	7.41	25.64	PU	22207540.44	19455279.99	Newton
5	7.25	23.81	PU	21258864.25	16777229.08	Newton
5.5	7.09	22.22	PU	20330895.87	14611323.38	Newton
6	6.94	20.83	PU	19479732.40	12840442.30	Newton
6.5	6.80	19.61	PU	18701733.80	11380376.52	Newton
7	6.67	18.52	PU	17993502.70	10150405.87	Newton
7.5	6.54	17.54	PU	17298941.99	9104594.79	Newton
8	6.41	16.67	PU	16618051.66	8223801.96	Newton
8.5	6.29	15.87	PU	16001670.98	7453414.90	Newton
9	6.17	15.15	PU	15396938.45	6792454.05	Newton
9.5	6.06	14.49	PU	14852832.86	6213527.35	Newton
10	5.95	13.89	PU	14318514.94	5709603.30	Newton
10.5	5.85	13.33	PU	13841264.82	5258498.36	Newton
11	5.75	12.82	PU	13372103.67	4863820.00	Newton
11.5	5.65	12.35	PU	12911031.52	4513727.73	Newton
12	5.56	11.90	PU	12502982.66	4190784.86	Newton

Frad TH.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Alta Tensión.
 Frad TX.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Baja Tensión.

Tabla 5.1D.- Resultados del Programa de Cortocircuito y Esfuerzos Mecánicos Para Falla Trifásica con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Transformador.

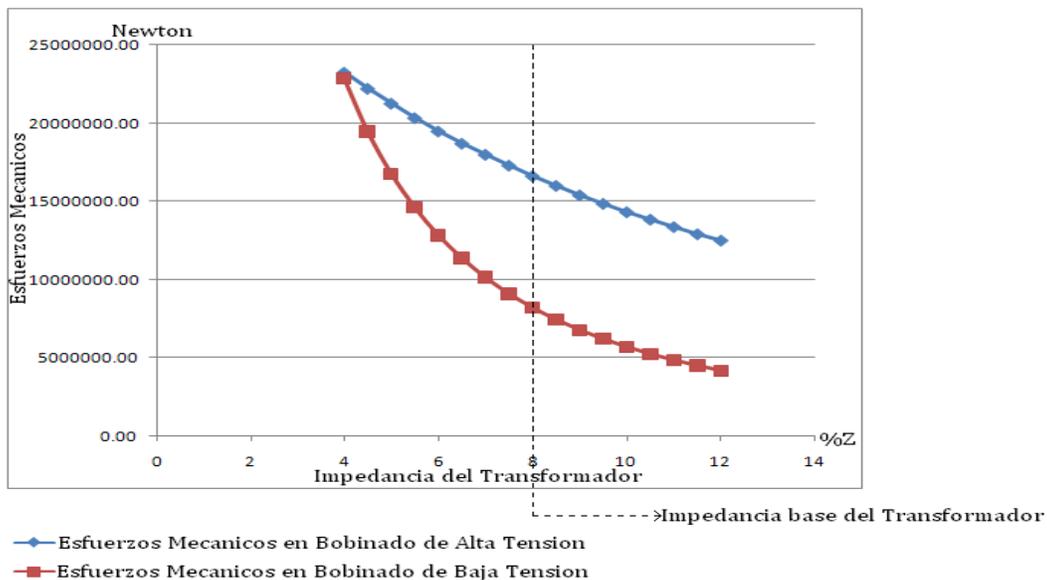


Figura 5.1D.- Grafica de esfuerzos mecánicos para la falla Trifásica con una impedancia base y variaciones en la Impedancia del Transformador. Se observa en la grafica que cuando la impedancia va decreciendo la fuerza de repulsión es mayor en la bobina de baja tensión que en la de alta tensión pero a medida que la impedancia aumenta también la fuerza de repulsión decrece notoriamente, en el caso de la bobina de alta tensión las fuerzas de repulsión decrece en menor intensidad.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Falla Trifásica				Esfuerzos Mecánicos		
%Z del generador	I _{TH}	I _{TX}	Unidad	Frad TH	Frad TX	Unidad
10	9.26	16.67	PU	34680553.40	8223801.96	Newton
11	8.77	16.67	PU	31107365.52	8223801.96	Newton
12	8.33	16.67	PU	28064289.29	8223801.96	Newton
13	7.94	16.67	PU	25497937.40	8223801.96	Newton
14	7.58	16.67	PU	23238198.49	8223801.96	Newton
15	7.25	16.67	PU	21258864.25	8223801.96	Newton
16	6.94	16.67	PU	19479732.40	8223801.96	Newton
17	6.67	16.67	PU	17993502.70	8223801.96	Newton
18	6.41	16.67	PU	16618051.66	8223801.96	Newton
19	6.17	16.67	PU	15396938.45	8223801.96	Newton
20	5.95	16.67	PU	14318514.94	8223801.96	Newton
21	5.75	16.67	PU	13372103.67	8223801.96	Newton
22	5.56	16.67	PU	12502982.66	8223801.96	Newton
23	5.38	16.67	PU	11706541.17	8223801.96	Newton
24	5.21	16.67	PU	10978411.17	8223801.96	Newton
25	5.05	16.67	PU	10314467.26	8223801.96	Newton
26	4.90	16.67	PU	9710826.74	8223801.96	Newton

Frad TH.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Alta Tensión.
 Frad TX.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Baja Tensión.

Tabla 5.1E.- Resultados del Programa de Cortocircuito y Esfuerzos Mecánicos Para Falla Trifásica con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del generador.

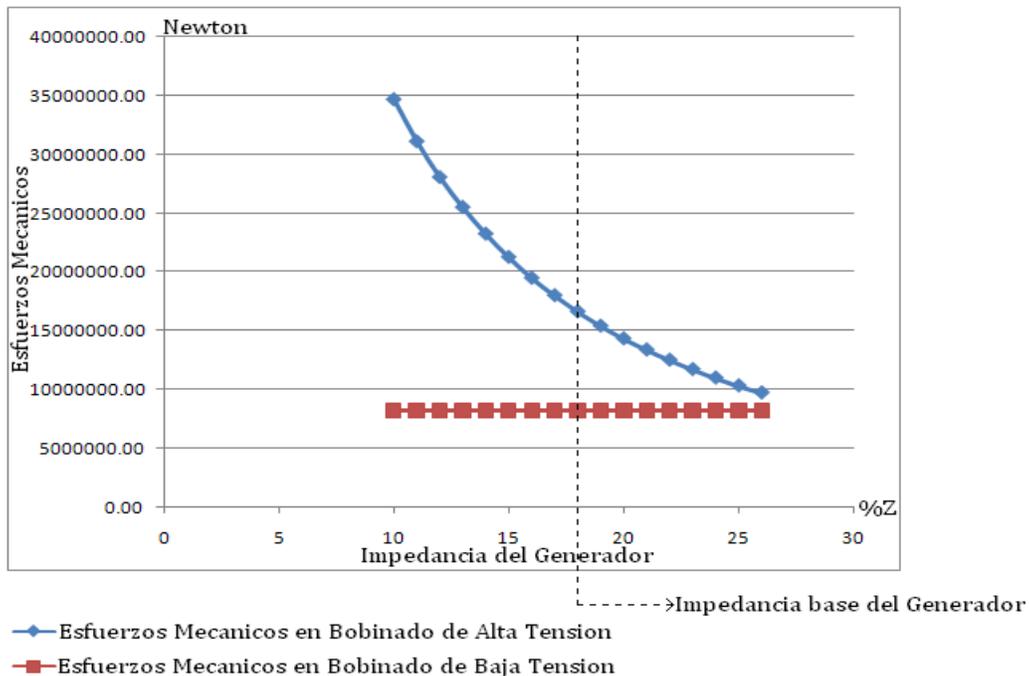
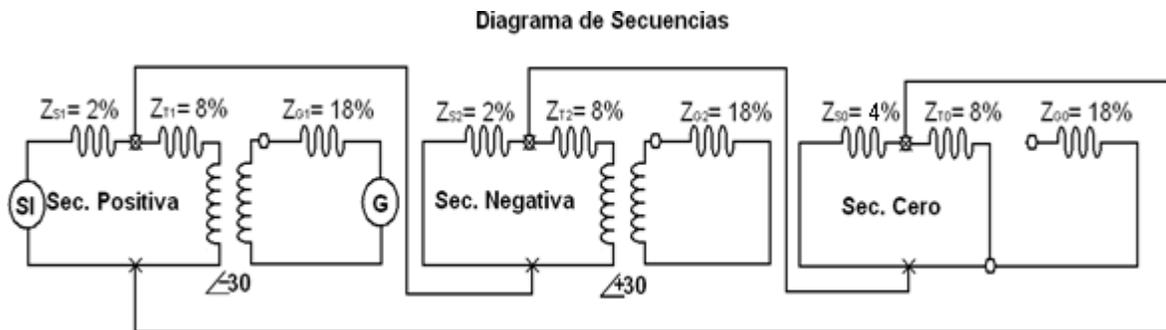


Figura 5.1E.- Grafica de Esfuerzos Mecánicos para la falla Trifásica con una impedancia base y variaciones en la Impedancia del Transformador. En esta grafica se observa que la falla únicamente afecta a las bobinas de alta tensión mientras que las bobinas de baja tensión en el momento que ocurre la falla es independiente de las variaciones de la impedancia.

Cálculo de Falla Monofásica:

Cálculo de Falla Monofásica en la terminal H (alta):



$$Z_1 = Z_2 = Z_{S1} + Z_{T1} + Z_{G1} = 28\%$$

$$Z_0 = Z_{S0} + Z_{T0} = 12\%$$

$$Z_{1P} = Z_{2P} = \left(\frac{Z_{S1} \parallel Z_{T1} + Z_{G1}}{Z_1} \right) = \left(\frac{2 \parallel 8 + 18}{28} \right) = 1.86$$

$$Z_{0P} = \left(\frac{Z_{S0} * Z_{T0}}{Z_0} \right) = \left(\frac{4 * 8}{12} \right) = 2.67$$

$$I_1 = \frac{100}{Z_{1P} + Z_{2P} + Z_{0P}} = \frac{100}{1.86 + 1.86 + 2.67} = 15.67 P.U.$$

$$I_1 = I_2 = I_0$$

$$I_{1T} = I_{2T} = \left(\frac{Z_{S1}}{Z_1} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) = 5.67 \left(\frac{2}{28} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) = 1.87 P.U. \text{ Base OA}$$

$$I_{0T} = \left(\frac{Z_{S0}}{Z_0} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) = 5.67 \left(\frac{4}{12} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) = 8.71 P.U. \text{ Base OA}$$

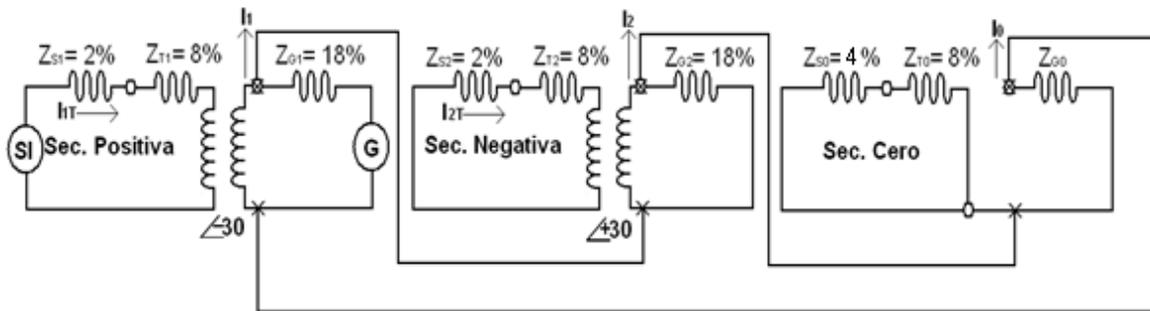
$$I_T = I_{1T} + I_{2T} + I_{0T} = 1.87 + 1.87 + 8.71 =$$

$$I_T = 12.44 P.U. \text{ Base OA}$$

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Cálculo de Falla Monofasica en la terminal X (baja):

Diagrama de Secuencias



$$Z_1 = Z_2 = Z_{S1} + Z_{T1} + Z_{G1} = 28\%$$

$$Z_{1P} = Z_{2P} = \left(\frac{Z_{G1} + Z_{T1} + Z_{S1}}{Z_1} \right) = 6.43 \text{ P.U. Base OA}$$

Nota: El diagrama de secuencia cero es un circuito abierto donde circula una corriente de falla muy pequeña y que no se considera por ser esta cercana a cero y por lo tanto no es considerada en la salida para la corriente de falla en baja tensión.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Tablas de Resultados y Graficas Para Falla Monofásica.

Falla Monofasica						
%Z del Transformador	I_{TH}	I_{TX}	I_{1T}	I_{2T}	I_{0T}	Unidad
4	19.61	*	2.45	2.45	14.71	PU
4.5	18.24	*	2.35	2.35	13.54	PU
5	17.07	*	2.26	2.26	12.55	PU
5.5	16.05	*	2.18	2.18	11.69	PU
6	15.15	*	2.10	2.10	10.94	PU
6.5	14.36	*	2.04	2.04	10.28	PU
7	13.65	*	1.98	1.98	9.70	PU
7.5	13.01	*	1.92	1.92	9.18	PU
8	12.44	*	1.87	1.87	8.71	PU
8.5	11.92	*	1.82	1.82	8.28	PU
9	11.44	*	1.77	1.77	7.90	PU
9.5	11.00	*	1.73	1.73	7.55	PU
10	10.60	*	1.69	1.69	7.23	PU
10.5	10.22	*	1.65	1.65	6.93	PU
11	9.88	*	1.61	1.61	6.66	PU
11.5	9.56	*	1.58	1.58	6.41	PU
12	9.26	*	1.54	1.54	6.17	PU

Tabla 5.2A.- Resultados del Programa de Cortocircuito Para Falla Monofásica con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Transformador.

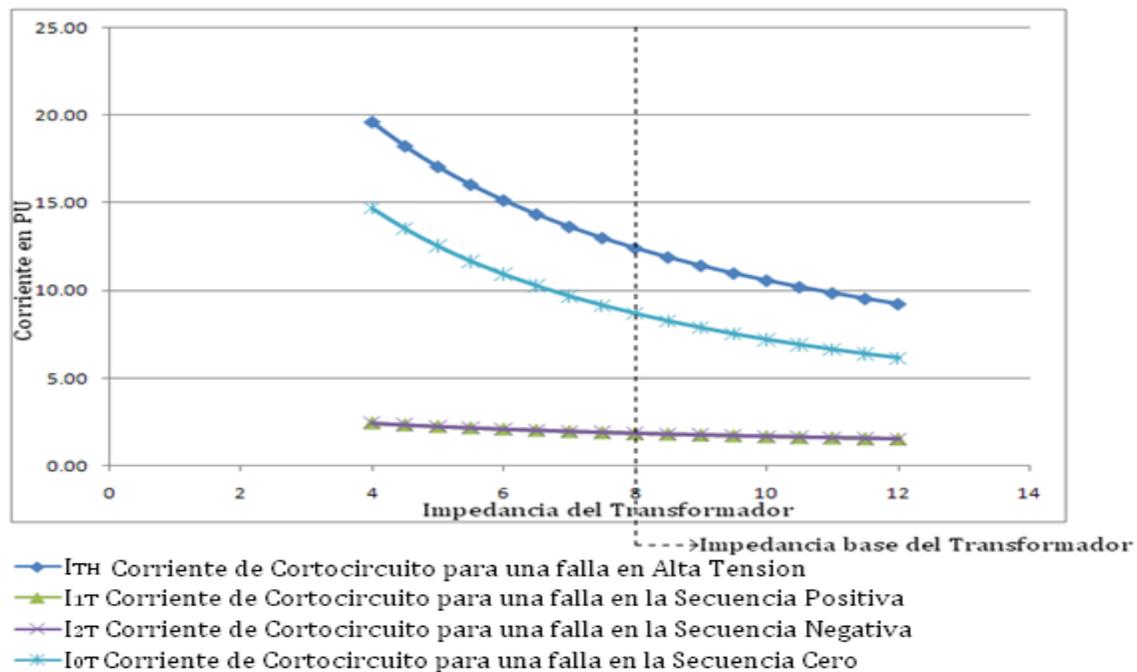


Figura 5.2A.- Grafica de la Corriente de Cortocircuito Monofásico con una impedancia base y variaciones en la Impedancia del Transformador. La grafica muestra que la corriente de corto circuito de secuencia positiva y negativa son iguales y menos sensibles a las variaciones de la impedancia, mientras que la corriente de cortocircuito en alta tensión y de secuencia cero son más grandes y sensibles a la variación de la impedancia, la curva de la corriente de corto circuito de baja tensión no es representativa ya que sus valores son cercanos a cero.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Falla Monofasica					
%Z del Generador	I _{TH}	I _{1T}	I _{2T}	I _{0T}	Unidad
10	14.18	2.66	2.66	8.87	PU
11	13.89	2.53	2.53	8.84	PU
12	13.62	2.40	2.40	8.81	PU
13	13.38	2.29	2.29	8.79	PU
14	13.16	2.19	2.19	8.77	PU
15	12.96	2.10	2.10	8.75	PU
16	12.77	2.02	2.02	8.74	PU
17	12.60	1.94	1.94	8.72	PU
18	12.44	1.87	1.87	8.71	PU
19	12.29	1.80	1.80	8.69	PU
20	12.15	1.74	1.74	8.68	PU
21	12.02	1.68	1.68	8.67	PU
22	11.90	1.62	1.62	8.66	PU
23	11.79	1.57	1.57	8.65	PU
24	11.69	1.52	1.52	8.64	PU
25	11.59	1.48	1.48	8.63	PU
26	11.49	1.44	1.44	8.62	PU

Tabla 5.2B.- Resultados del Programa de Cortocircuito Para Falla Monofásica con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Generador.

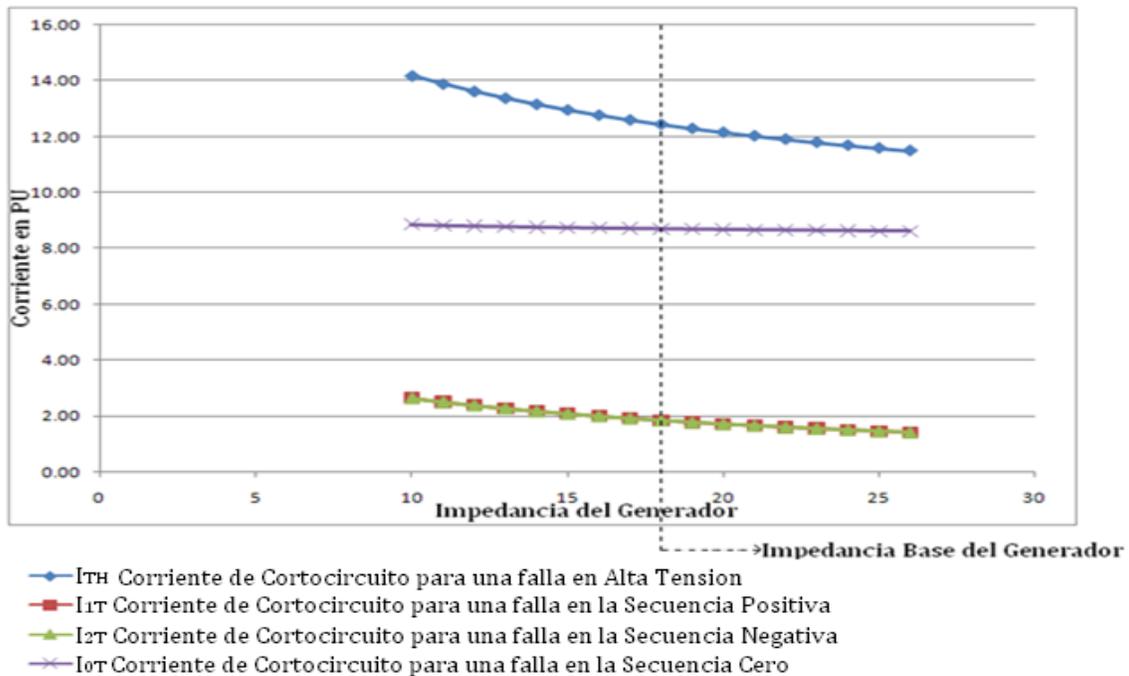


Figura 5.2B.- Grafica de la Corriente de Cortocircuito Monofásico con una impedancia base y variaciones en la Impedancia del Generador. Se observa en la grafica que la corriente de cortocircuito es mas grande en la salida de alta tensión y decrece ligeramente cuando la impedancia aumenta, las corrientes de falla de secuencia positiva y negativa son de igual magnitud y menos sensible a las variaciones de la impedancia, pero la de secuencia cero aunque es más grande la corriente de falla que en las otras dos secuencias permanece casi constante.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Falla Monofasica					
%Z del Sistema	I _{TH}	I _{1T}	I _{2T}	I _{0T}	Unidad
0.5	13.27	1.68	1.68	9.90	PU
1	12.96	1.75	1.75	9.45	PU
1.5	12.68	1.81	1.81	9.06	PU
2	12.44	1.87	1.87	8.71	PU
2.5	12.22	1.91	1.91	8.39	PU
3	12.02	1.96	1.96	8.11	PU
3.5	11.85	2.00	2.00	7.85	PU
4	11.69	2.03	2.03	7.62	PU
4.5	11.54	2.07	2.07	7.41	PU
5	11.41	2.09	2.09	7.22	PU
5.5	11.29	2.12	2.12	7.04	PU
6	11.17	2.15	2.15	6.87	PU

Tabla 5.2C.- Resultados del Programa de Cortocircuito Para Falla Monofásica con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Sistema.

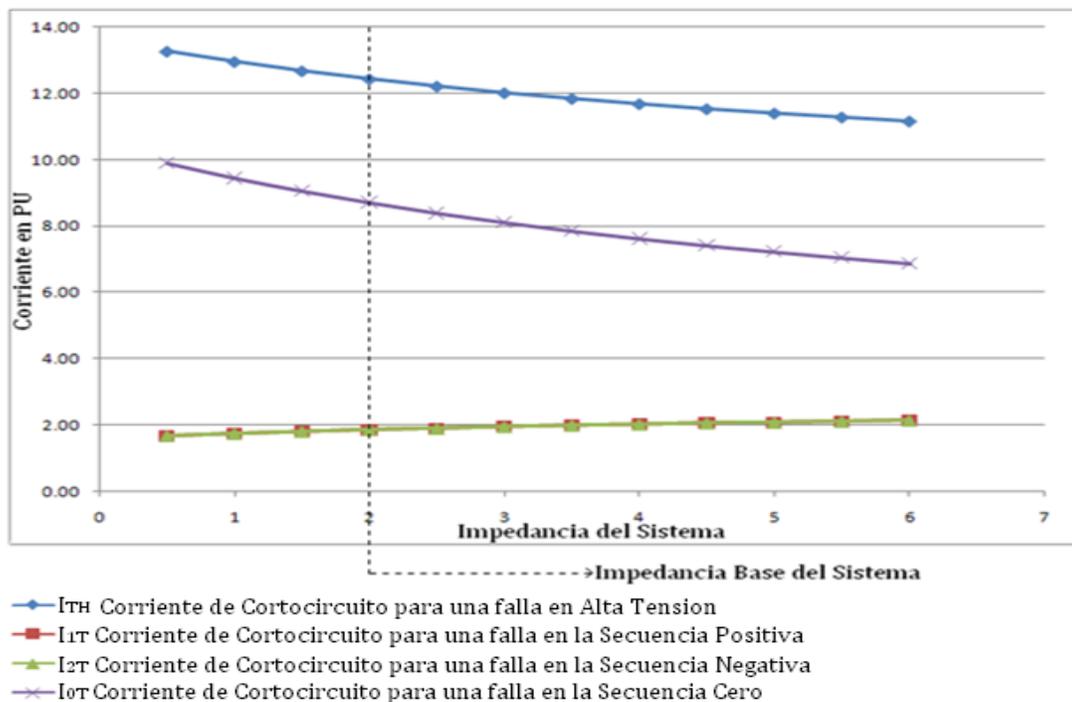


Figura 5.2C.- Grafica de la Corriente de Cortocircuito Monofásico con una impedancia base y variaciones en la Impedancia del Sistema. En la grafica se observa que aunque es mayor la corriente de falla en la salida de alta tensión decrece ligeramente, a diferencia de la secuencia cero que es mas notorio su decrecimiento con la variación de la impedancia del sistema, pero también se observa que la corriente de falla en la secuencia positiva y negativa aumenta ligeramente, contrario a las graficas 5.2A y 5.2B en donde las corrientes de falla de secuencia positiva y negativa disminuyen ligeramente.

Cálculo de Esfuerzos Mecánicos en la Falla Monofásica del Transformador.

Calculando I_{cc} para la Bobina en Alta Tensión.

$$I_{cc} = I_{PU} * I_{Base}$$

$$I_{ccTH} = 12.44 * 833333$$

$$I_{ccTH} = 103666625 \text{ Amp}$$

Corriente de Cortocircuito máxima en la salida de Alta Tensión.

Aplicando la Formula para la bobina en Alta Tensión:

$$Frad = 1.256 \frac{N_{TH} I_{cc}^2}{Hw} \pi dm 10^{-6} (\text{Newton})$$

$$Frad_{TH} = 1.256 \frac{640 * 103666625^2}{2} \pi * 1.8 * 10^{-6}$$

$$Frad_{TH} = 6258997907 \text{ Newton}$$

Fuerzas de Repulsión en la Bobina de Alta Tensión.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Tablas de Resultados y Graficas Para Esfuerzos Mecánicos en la Falla Monofásica.

Falla Monofasica				Esfuerzos Mecanicos		
%Z Transformador	I _{TH}	I _{TX}	Unidad	Frad TH	Frad TX	Unidad
4	19.61	*	PU	155531812.45	*	Newton
4.5	18.24	*	PU	134559298.27	*	Newton
5	17.07	*	PU	117850407.31	*	Newton
5.5	16.05	*	PU	104187140.61	*	Newton
6	15.15	*	PU	92830205.38	*	Newton
6.5	14.36	*	PU	83401320.22	*	Newton
7	13.65	*	PU	75357997.33	*	Newton
7.5	13.01	*	PU	68457122.27	*	Newton
8	12.44	*	PU	62589979.07	*	Newton
8.5	11.92	*	PU	57466739.40	*	Newton
9	11.44	*	PU	52931730.73	*	Newton
9.5	11.00	*	PU	48938360.51	*	Newton
10	10.60	*	PU	45443918.90	*	Newton
10.5	10.22	*	PU	42244078.13	*	Newton
11	9.88	*	PU	39480071.89	*	Newton
11.5	9.56	*	PU	36964073.93	*	Newton
12	9.26	*	PU	34680553.40	*	Newton

Frad TH.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Alta Tensión.
 Frad TX.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Baja Tensión.

Tabla 5.2D.- Resultados del Programa de Cortocircuito y Esfuerzos Mecánicos Para Falla Monofásica con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Transformador.

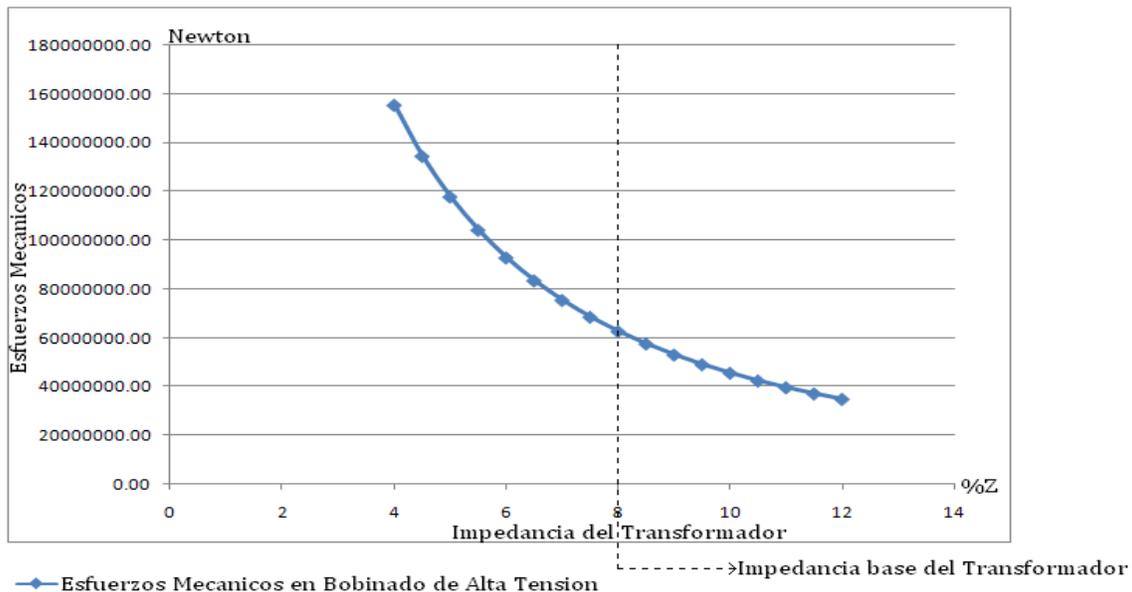


Figura 5.2D.- Grafica de Esfuerzos Mecánicos para falla Monofásica con una impedancia base y variaciones en la Impedancia del Transformador. En esta grafica se observa que las bobinas de alta tensión son las que resienten las fuerzas de repulsión y son más sensibles a la variación de la impedancia.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Falla Monofasica				Esfuerzos Mecanicos		
%Z Generador	I _{TH}	I _{TX}	Unidad	Frad TH	Frad TX	Unidad
10	14.18	*	PU	81323583.47	*	Newton
11	13.89	*	PU	78031245.16	*	Newton
12	13.62	*	PU	75027117.39	*	Newton
13	13.38	*	PU	72406286.18	*	Newton
14	13.16	*	PU	70044787.84	*	Newton
15	12.96	*	PU	67931944.90	*	Newton
16	12.77	*	PU	65954713.80	*	Newton
17	12.60	*	PU	64210364.59	*	Newton
18	12.44	*	PU	62589979.07	*	Newton
19	12.29	*	PU	61089674.54	*	Newton
20	12.15	*	PU	59705810.95	*	Newton
21	12.02	*	PU	58434990.93	*	Newton
22	11.90	*	PU	57274059.77	*	Newton
23	11.79	*	PU	56220105.44	*	Newton
24	11.69	*	PU	55270458.58	*	Newton
25	11.59	*	PU	54328900.70	*	Newton
26	11.49	*	PU	53395431.81	*	Newton

Frad TH.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Alta Tensión.

Frad TX.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Baja Tensión.

Tabla 5.2E.- Resultados del Programa de Cortocircuito y Esfuerzos Mecánicos Para Falla Monofásica con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Generador.

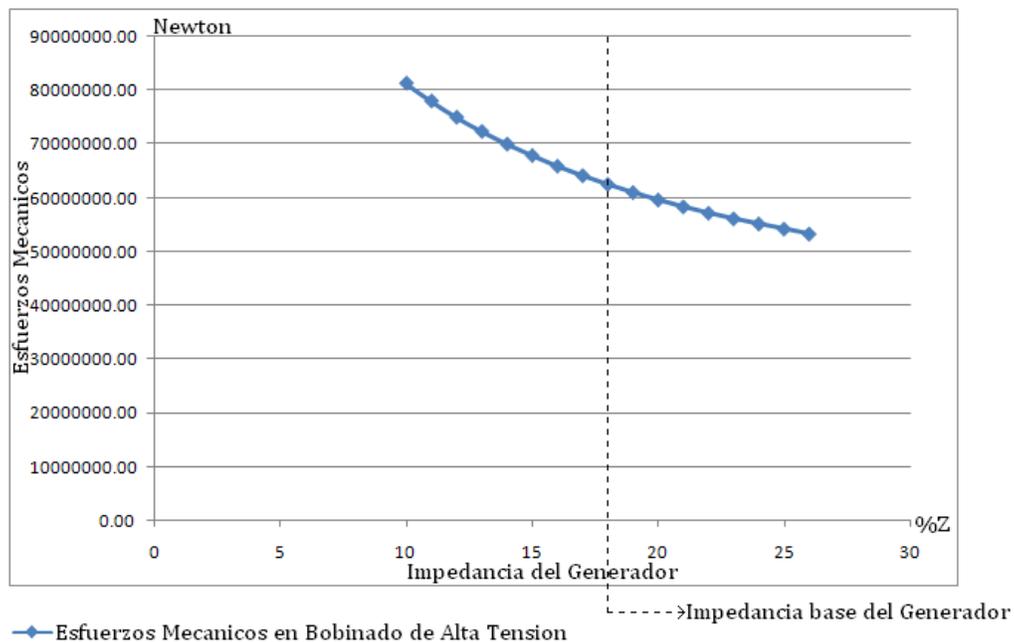
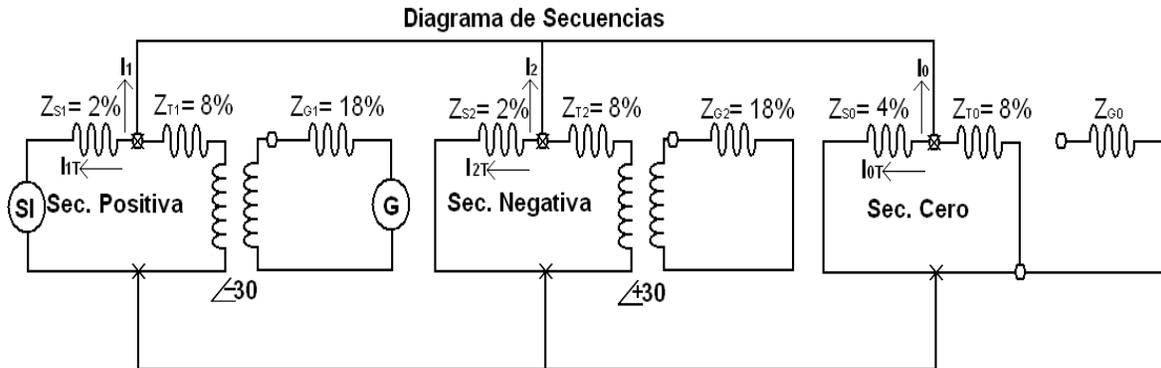


Figura 5.2E.- Grafica de Esfuerzos Mecánicos en las Bobinas para falla Monofásica con una impedancia base y variaciones en la Impedancia del Generador. Se observa en la grafica que aunque es la bobina de alta tensión la que es afectada por los esfuerzos mecánicos está sometido a fuerzas de repulsión muy grandes y son menos sensibles a la variación de la impedancia.

Cálculo de Falla Doble Línea a Tierra:

Cálculo de Falla Doble Línea a Tierra en la Terminal H (alta):



$$Z_1 = Z_2 = Z_{S1} + Z_{T1} + Z_{G1} = 28\%$$

$$Z_0 = 12\%$$

$$Z_{1P} = Z_{2P} = \left(\frac{Z_{S1} \cdot (Z_{T1} + Z_{G1})}{Z_1} \right) = \left(\frac{2 \cdot (8 + 18)}{28} \right) = 1.86$$

$$Z_{0P} = \left(\frac{Z_{S0} \cdot Z_{T0}}{Z_0} \right) = \left(\frac{4 \cdot 8}{12} \right) = 2.67$$

$$a = -0.5 + 0.866j = 1 \angle 120^\circ$$

$$a^2 = -0.5 - 0.866j = 1 \angle 240^\circ$$

$$I_1 = \frac{100}{Z_{1P} + \frac{Z_{2P} \cdot Z_{0P}}{Z_{2P} + Z_{0P}}} = \frac{100}{1.86 + \frac{1.86 \cdot 2.67}{1.86 + 2.67}} = 33.84 P.U.$$

$$I_2 = -I_1 \cdot \frac{Z_{0P}}{Z_{0P} + Z_{2P}} = -33.84 \cdot \frac{2.67}{2.67 + 1.86} = -19.95 P.U.$$

$$I_0 = -I_1 \cdot \frac{Z_{2P}}{Z_{0P} + Z_{2P}} = -33.84 \cdot \frac{1.86}{2.67 + 1.86} = -13.89 P.U.$$

$$I_{1T} = I_1 \cdot \frac{Z_{S1}}{Z_1} \cdot \frac{1000}{600} = 33.84 \cdot \frac{2}{28} \cdot \frac{1000}{600} = 4.03 P.U. \text{ Base OA}$$

$$I_{2T} = I_2 \cdot \frac{Z_{S2}}{Z_2} \cdot \frac{1000}{600} = -19.95 \cdot \frac{2}{28} \cdot \frac{1000}{600} = -2.38 P.U. \text{ Base OA}$$

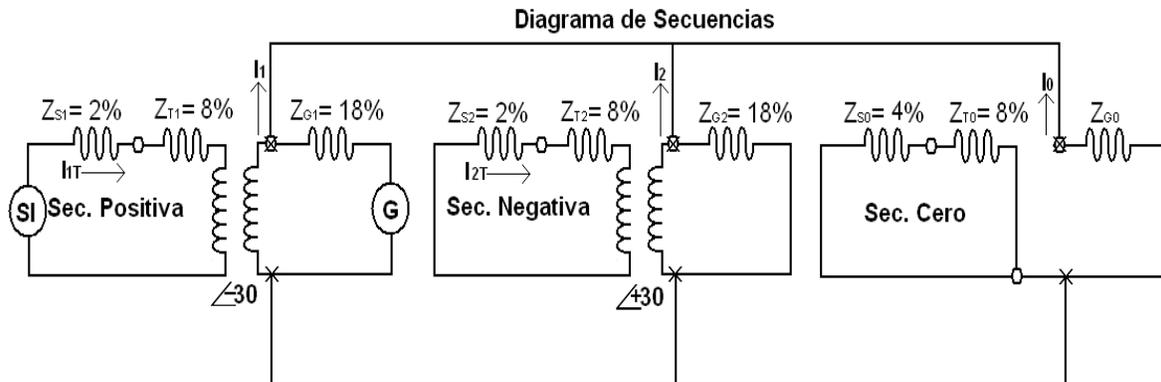
$$I_{0T} = I_0 \cdot \frac{Z_{S0}}{Z_0} \cdot \frac{1000}{600} = -13.89 \cdot \frac{4}{12} \cdot \frac{1000}{600} = -7.72 P.U. \text{ Base OA}$$

$$I_T = I_{1T} a^2 + I_{2T} a + I_{0T}$$

$$I_T = \left[4.03 \angle -0.5 - 0.866j \right] + \left[-2.38 \angle -0.5 + 0.866j \right] + \left[7.72 \right]$$

$$I_T = -10.19 \text{ P.U. Base OA}$$

Cálculo de Falla Doble Línea a Tierra en la Terminal X (baja):



$$Z_{1P} = Z_{2P} = \left(\frac{Z_{G1} \angle 30^\circ + Z_{T1} + Z_{S1}}{Z_1} \right) = \left(\frac{2 + 2}{28} \right) = 6.43$$

$$a = -0.5 + 0.866j = 1 \angle 120^\circ$$

$$a^2 = -0.5 - 0.866j = 1 \angle 240^\circ$$

$$I_1 = \frac{100}{Z_{1P} + Z_{2P}} = \frac{100}{6.43 + 6.43} = 7.78 \text{ P.U.}$$

$$I_2 = -I_1 = -7.78$$

$$I_{1T} = a^2 \angle 30^\circ \left(\frac{Z_{G1}}{Z_1} \right) \left(\frac{1000}{600} \right)$$

$$I_{1T} = \left[-0.5 - 0.866j \right] \left[7.78 \angle 30^\circ \right] \left(\frac{2}{28} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) = 8.33 \angle 270^\circ \text{ P.U. Base OA}$$

$$I_{2T} = a \angle -30^\circ \left(\frac{Z_{G1}}{Z_1} \right) \left(\frac{1000}{600} \right)$$

$$I_{2T} = \left[-0.5 + 0.866j \right] \left[7.78 \angle -30^\circ \right] \left(\frac{2}{28} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) = -8.33 \angle 90^\circ \text{ P.U. Base OA}$$

$$I_T = I_{1T} + I_{2T} = 8.33 \angle 270^\circ - 8.33 \angle 90^\circ$$

$$I_T = 16.67 \text{ P.U. Base OA}$$

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Tablas de Resultados y Graficas Para Falla Doble Línea a Tierra.

Falla Doble Línea a Tierra						
%Z del Transformador	ITH	ITX	I1T	I2T	I0T	Unidad
4	16.81	27.78	4.98	-2.60	-14.29	PU
4.5	15.43	25.64	4.82	-2.58	-12.92	PU
5	14.30	23.81	4.68	-2.56	-11.79	PU
5.5	13.35	22.22	4.56	-2.54	-10.84	PU
6	12.53	20.83	4.44	-2.51	-10.03	PU
6.5	11.83	19.61	4.33	-2.48	-9.34	PU
7	11.22	18.52	4.22	-2.44	-8.73	PU
7.5	10.68	17.54	4.12	-2.41	-8.20	PU
8	10.20	16.67	4.03	-2.38	-7.73	PU
8.5	9.77	15.87	3.95	-2.34	-7.31	PU
9	9.38	15.15	3.86	-2.31	-6.93	PU
9.5	9.03	14.49	3.78	-2.28	-6.59	PU
10	8.70	13.89	3.71	-2.24	-6.28	PU
10.5	8.41	13.33	3.64	-2.21	-6.00	PU
11	8.14	12.82	3.57	-2.18	-5.74	PU
11.5	7.89	12.35	3.50	-2.15	-5.51	PU
12	7.65	11.90	3.44	-2.12	-5.29	PU

Tabla 5.3A.- Resultados del Programa de Cortocircuito Para Falla Doble Línea a Tierra con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Transformador.

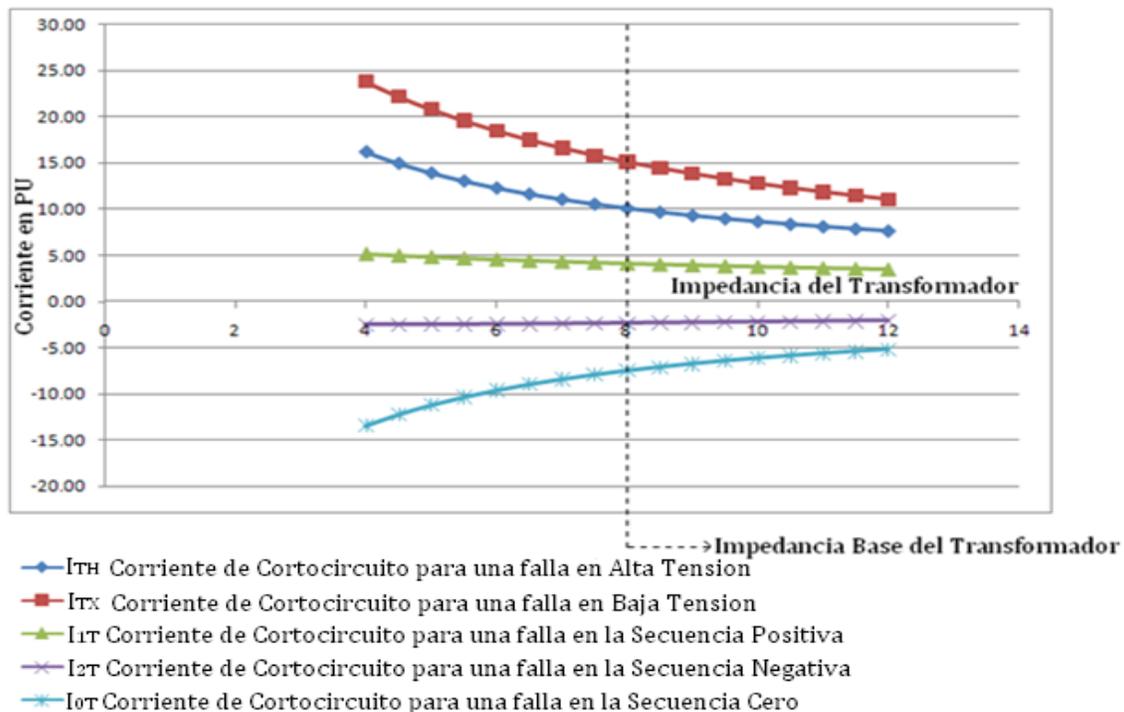


Figura 5.3A.- Grafica de la Corriente de Cortocircuito Doble Línea a Tierra con una Impedancia Base y variaciones en la impedancia del Transformador. En esta grafica las corrientes de falla parecen formar un embudo donde la corriente de cortocircuito en baja tensión (ITX) y la de secuencia cero (I0T) son casi iguales pero de signo contrario, por lo que si un transformador tiene una impedancia muy grande, las cinco corrientes de falla serán iguales en cierto momento en que ocurra la falla.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Falla Doble Línea a Tierra						
%Z del Generador	I_{TH}	I_{TX}	I_{1T}	I_{2T}	I_{0T}	Unidad
10	12.02	16.67	5.80	-3.46	-7.79	PU
11	11.69	16.67	5.50	-3.27	-7.78	PU
12	11.40	16.67	5.23	-3.11	-7.77	PU
13	11.14	16.67	4.98	-2.96	-7.76	PU
14	10.91	16.67	4.76	-2.82	-7.75	PU
15	10.71	16.67	4.55	-2.69	-7.74	PU
16	10.52	16.67	4.37	-2.58	-7.74	PU
17	10.35	16.67	4.19	-2.47	-7.73	PU
18	10.20	16.67	4.03	-2.38	-7.73	PU
19	10.06	16.67	3.89	-2.29	-7.72	PU
20	9.93	16.67	3.75	-2.20	-7.72	PU
21	9.81	16.67	3.62	-2.13	-7.71	PU
22	9.71	16.67	3.50	-2.06	-7.71	PU
23	9.61	16.67	3.39	-1.99	-7.70	PU
24	9.52	16.67	3.28	-1.92	-7.70	PU
25	9.43	16.67	3.18	-1.87	-7.70	PU
26	9.35	16.67	3.09	-1.81	-7.69	PU

Tabla 5.3B.- Resultados del Programa de Cortocircuito Para Falla Doble Línea a Tierra con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Generador.

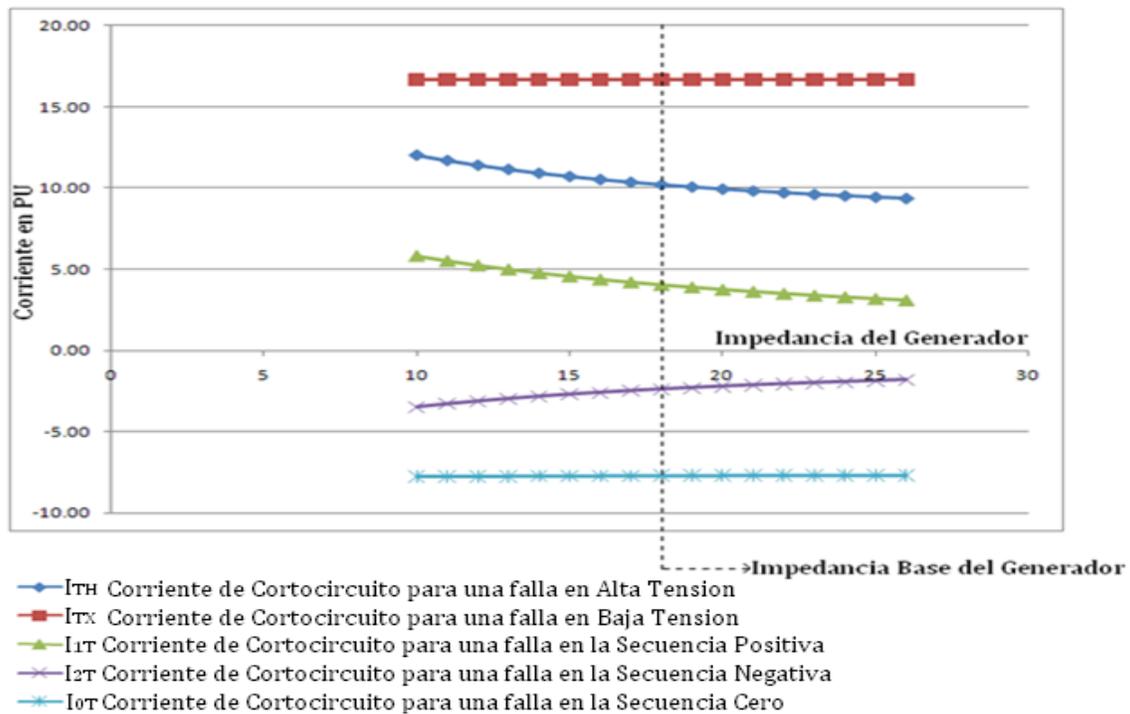


Figura 5.3B.- Grafica de la Corriente de Cortocircuito Doble Línea a Tierra con una Impedancia Base y variaciones en la impedancia del Generador. En la grafica se observa que la corriente de cortocircuito en baja tensión (I_{TX}) y la de secuencia cero (I_{0T}) son independientes de la impedancia del generador mientras las de alta tensión (I_{TH}), secuencia negativa (I_{2T}) y secuencia positiva (I_{1T}) disminuyen ligeramente cuando la impedancia aumenta.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Falla Doble Línea a Tierra						
%Z del Sistema	I_{TH}	I_{TX}	I_{1T}	I_{2T}	I_{0T}	Unidad
0.5	10.45	19.61	3.90	-2.51	-8.16	PU
1	10.36	18.52	3.95	-2.46	-8.01	PU
1.5	10.28	17.54	3.99	-2.42	-7.86	PU
2	10.20	16.67	4.03	-2.38	-7.73	PU
2.5	10.12	15.87	4.07	-2.34	-7.60	PU
3	10.06	15.15	4.11	-2.30	-7.48	PU
3.5	9.99	14.49	4.14	-2.27	-7.37	PU
4	9.93	13.89	4.17	-2.24	-7.27	PU
4.5	9.88	13.33	4.20	-2.21	-7.17	PU
5	9.82	12.82	4.23	-2.18	-7.08	PU
5.5	9.77	12.35	4.26	-2.15	-6.99	PU
6	9.73	11.90	4.28	-2.13	-6.91	PU

Tabla 5.3C.- Resultados del Programa de Cortocircuito Para Falla Doble Línea a Tierra con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Sistema.

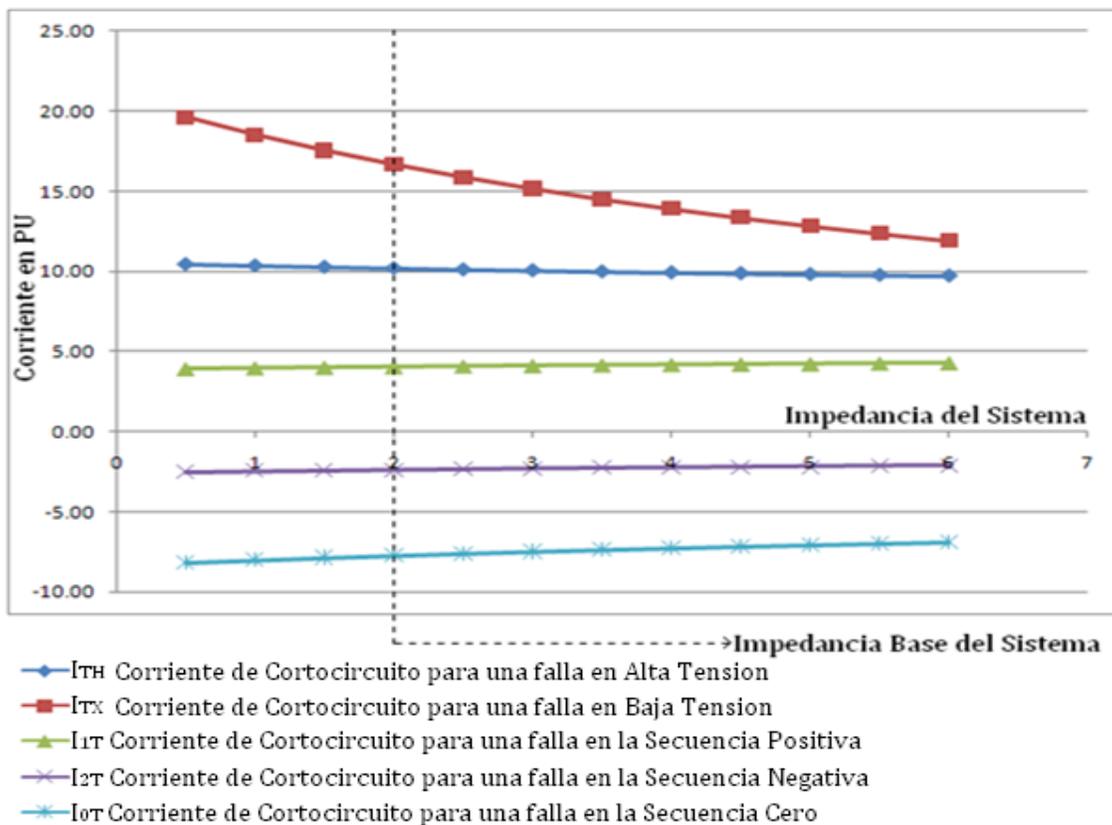


Figura 5.3C.- Grafica de la Corriente de Cortocircuito Doble Línea a Tierra con una Impedancia Base y variaciones en la impedancia del Sistema. En la grafica se observa que la corriente de corto circuito en baja tensión (I_{TX}) es más sensible a la variación de la impedancia, mientras las cuatro corrientes de falla restantes ligeramente varían con el aumento de la impedancia, pero también se observa que cuando la impedancia aumenta la corriente de cortocircuito de secuencia positiva (I_{1T}) aumenta ligeramente.

Cálculo de Esfuerzos Mecánicos en la Falla Doble Línea a Tierra del Transformador.

Calculando I_{cc} para la Bobina en Alta Tensión.

$$I_{cc} = I_{PU} * I_{Base}$$

$$I_{ccTH} = 10.20 * 833333$$

$$I_{ccTH} = 85000Amp$$

Corriente de Cortocircuito máxima en la salida de Alta Tensión.

Calculando I_{amp} para la Bobina en Baja Tensión.

$$I_{cc} = I_{PU} * I_{Base}$$

$$I_{ccTX} = 16.67 * 833333$$

$$I_{ccTX} = 138916611Amp$$

Corriente de Cortocircuito máxima en la salida de Baja Tensión.

Aplicando la Formula para la bobina en Alta Tensión:

$$Frad = 1.256 \frac{N_{TH} I_{cc}^2}{H_w} \pi dm 10^{-6} (Newton)$$

$$Frad_{TH} = 1.256 \frac{640 * 85000^2}{2} \pi * 1.8 * 10^{-6}$$

$$Frad_{TH} = 4207890106Newton$$

Fuerzas de Repulsión en la Bobina de Alta Tensión.

Aplicando la Formula para la bobina en Baja Tensión:

$$Frad = 1.256 \frac{N_{TX} I_{cc}^2}{H_w} \pi dm 10^{-6} (Newton)$$

$$Frad_{TX} = 1.256 \frac{20 * 138916611^2}{2} \pi * 1.8 * 10^{-6}$$

$$Frad_{TX} = 822380196Newton$$

Fuerzas de Repulsión en la Bobina de Baja Tensión.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Tablas de Resultados y Graficas Para Esfuerzos Mecánicos en la Falla Doble Línea a Tierra.

Falla Doble Línea a Tierra				Esfuerzos Mecánicos		
%Z Transformador	IT _H	IT _X	Unidad	Frad TH	Frad TX	Unidad
4	16.81	27.78	PU	114287694.66	22838413.22	Newton
4.5	15.43	25.64	PU	96293261.73	19455279.99	Newton
5	14.30	23.81	PU	82705829.27	16777229.08	Newton
5.5	13.35	22.22	PU	72081958.32	14611323.38	Newton
6	12.53	20.83	PU	63498897.89	12840442.30	Newton
6.5	11.83	19.61	PU	56602229.10	11380376.52	Newton
7	11.22	18.52	PU	50915470.28	10150405.87	Newton
7.5	10.68	17.54	PU	46132453.32	9104594.79	Newton
8	10.20	16.67	PU	42078901.06	8223801.96	Newton
8.5	9.77	15.87	PU	38605854.81	7453414.90	Newton
9	9.38	15.15	PU	35585225.51	6792454.05	Newton
9.5	9.03	14.49	PU	32979156.70	6213527.35	Newton
10	8.70	13.89	PU	30612764.52	5709603.30	Newton
10.5	8.41	13.33	PU	28605927.74	5258498.36	Newton
11	8.14	12.82	PU	26798646.22	4863820.00	Newton
11.5	7.89	12.35	PU	25177815.81	4513727.73	Newton
12	7.65	11.90	PU	23669381.84	4190784.86	Newton

Frad TH.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Alta Tensión.
 Frad TX.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Baja Tensión.

Tabla 5.3D.- Resultados del Programa de Cortocircuito y Esfuerzos Mecánicos Para Falla Doble Línea a Tierra con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Transformador.

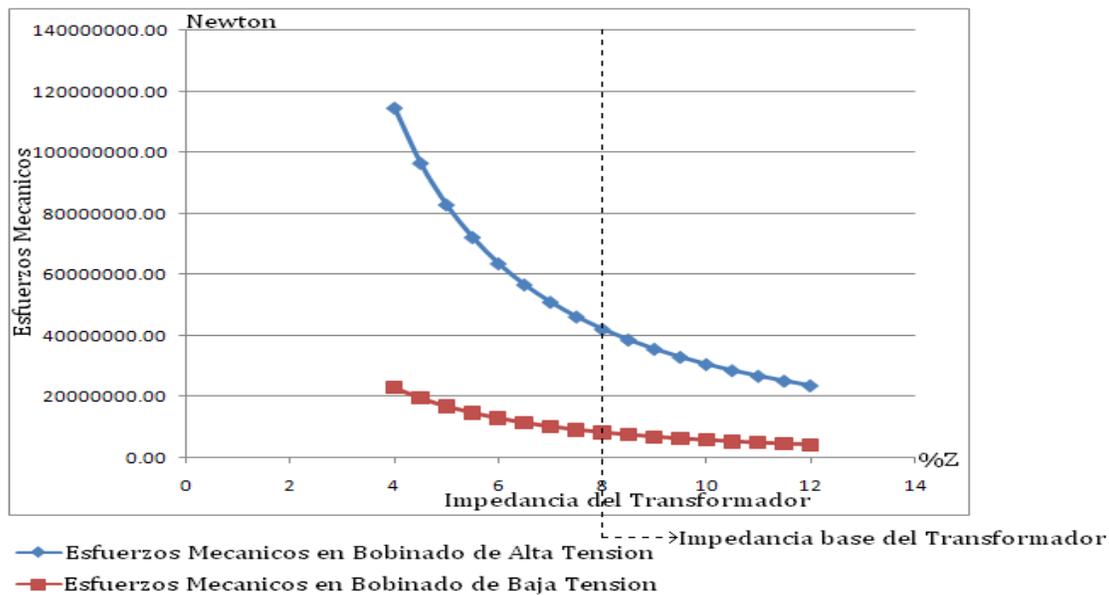


Figura 5.3D.- Grafica de Esfuerzos Mecánicos en las Bobinas para falla Doble Línea a Tierra con una Impedancia Base y variaciones en la impedancia del Transformador. La grafica muestra que las bobinas de alta tensión del transformador sufren enormes esfuerzos mecánicos cuando tiene una impedancia pequeña, contrariamente las bobinas de Alta tensión ligeramente varían las fuerzas de repulsión con la variación de impedancias.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Falla Doble Línea a Tierra				Esfuerzos Mecánicos		
%Z Generador	I _{TH}	I _{TX}	Unidad	Frad TH	Frad TX	Unidad
10	12.02	16.67	PU	58434990.93	8223801.96	Newton
11	11.69	16.67	PU	55270458.58	8223801.96	Newton
12	11.40	16.67	PU	52562225.89	8223801.96	Newton
13	11.14	16.67	PU	50191991.44	8223801.96	Newton
14	10.91	16.67	PU	48140827.02	8223801.96	Newton
15	10.71	16.67	PU	46391988.41	8223801.96	Newton
16	10.52	16.67	PU	44760561.43	8223801.96	Newton
17	10.35	16.67	PU	43325615.90	8223801.96	Newton
18	10.20	16.67	PU	42078901.06	8223801.96	Newton
19	10.06	16.67	PU	40931721.17	8223801.96	Newton
20	9.93	16.67	PU	39880678.88	8223801.96	Newton
21	9.81	16.67	PU	38922619.47	8223801.96	Newton
22	9.71	16.67	PU	38133134.52	8223801.96	Newton
23	9.61	16.67	PU	37351738.55	8223801.96	Newton
24	9.52	16.67	PU	36655398.25	8223801.96	Newton
25	9.43	16.67	PU	35965610.04	8223801.96	Newton
26	9.35	16.67	PU	35357965.47	8223801.96	Newton

Frad TH.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Alta Tensión.

Frad TX.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Baja Tensión.

Tabla 5.3E.- Resultados del Programa de Cortocircuito y Esfuerzos Mecánicos Para Falla Doble Línea a Tierra con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Generador.

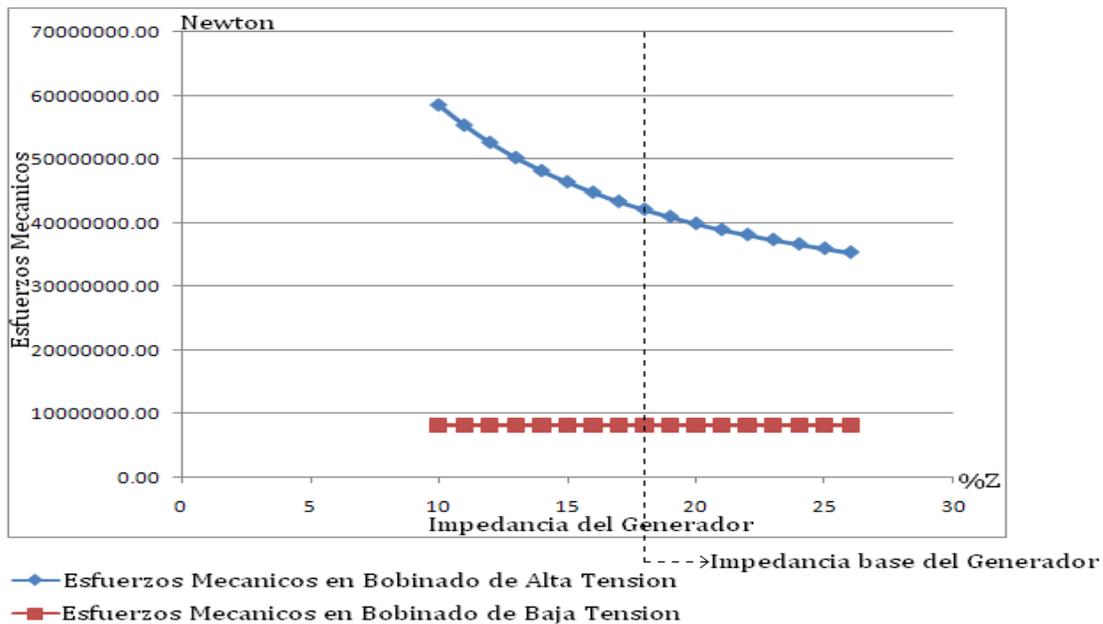
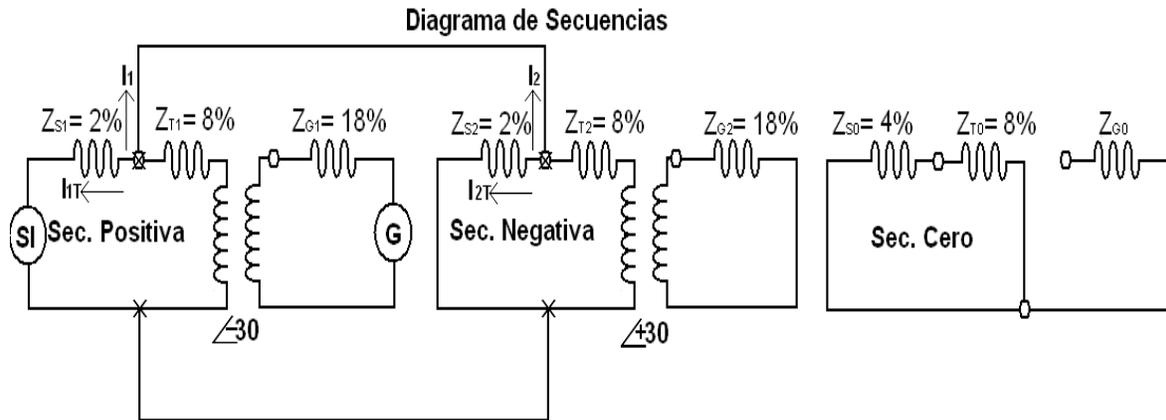


Figura 5.3E.- Grafica de Esfuerzos Mecánicos en las Bobinas para falla Doble Línea a Tierra con una Impedancia Base y variaciones en la impedancia del Transformador. La grafica muestra que en el momento que ocurre la falla las fuerzas de repulsión son más grandes en el bobinado de alta tensión y menos sensible a la variación de la impedancia, mientras la bobina en baja tensión su fuerza de repulsión permanece constante a la variación de la impedancia.

Cálculo de Falla Línea a Línea.

Cálculo de Falla Línea a Línea en la terminal H (alta):



$$Z_1 = Z_2 = Z_{S1} + Z_{T1} + Z_{G1} = 28\%$$

$$Z_{1P} = Z_{2P} = \left(\frac{Z_{S1} \cdot (Z_{T1} + Z_{G1})}{Z_1} \right) = \left(\frac{2 \cdot (8 + 18)}{28} \right) = 1.86$$

$$a = -0.5 + 0.866j = 1 \angle 120^\circ$$

$$a^2 = -0.5 - 0.866j = 1 \angle 240^\circ$$

$$I_1 = \frac{100}{Z_{1P} + Z_{2P}} = \frac{100}{1.86 + 1.86} = 26.88 \text{ P.U.}$$

$$I_2 = -I_1 = -26.88$$

$$I_{1T} = \angle_1 \left(\frac{Z_{S1}}{Z_1} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) = \angle 6.88 \left(\frac{2}{28} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) = 3.20 \text{ P.U. Base OA}$$

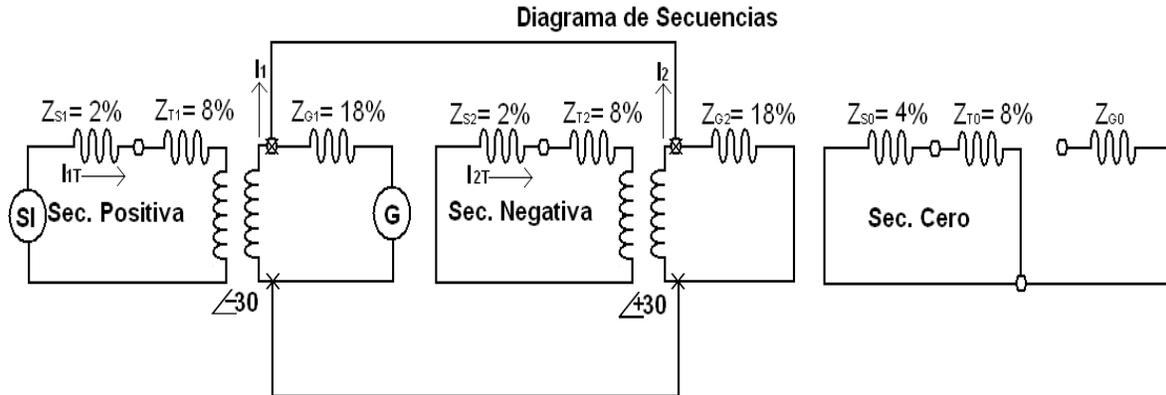
$$I_{2T} = -3.20 \text{ P.U. Base OA}$$

$$I_T = I_{1T} a^2 + I_{2T} a = \angle 3.20 \angle -0.5 - 0.866j \angle - \angle 3.20 \angle -0.5 + 0.866j \angle$$

$$I_T = -5.54j = -5.54 \text{ P.U. Base OA}$$

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Cálculo de Falla Línea a Línea en la terminal X (baja):



$$Z_{1P} = Z_{2P} = \left(\frac{Z_{G1} \parallel Z_{T1} + Z_{S1}}{Z_1} \right) = \left(\frac{2 + 2}{28} \right) = 6.43$$

$$a = -0.5 + 0.866j = 1 \angle 120^\circ$$

$$a^2 = -0.5 - 0.866j = 1 \angle 240^\circ$$

$$I_1 = \frac{100}{Z_{1P} + Z_{2P}} = \frac{100}{6.43 + 6.43} = 7.78 \text{ P.U.}$$

$$I_2 = -I_1 = -7.78$$

$$I_{1T} = I_1 \angle 30^\circ \left(\frac{Z_{G1}}{Z_1} \right) \left(\frac{1000}{600} \right)$$

$$I_{1T} = (-0.5 - 0.866j) \cdot 7.78 \angle 30^\circ \left(\frac{2}{28} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) = 8.33 \angle 270^\circ \text{ P.U. Base OA}$$

$$I_{2T} = I_2 \angle -30^\circ \left(\frac{Z_{G1}}{Z_1} \right) \left(\frac{1000}{600} \right)$$

$$I_{2T} = (-0.5 + 0.866j) \cdot 7.78 \angle -30^\circ \left(\frac{2}{28} \right) \left(\frac{1000}{600} \right) = -8.33 \angle 90^\circ \text{ P.U. Base OA}$$

$$I_T = I_{1T} + I_{2T} = 8.33 \angle 270^\circ - 8.33 \angle 90^\circ$$

$$\mathbf{I_T = 16.67 \text{ P.U. Base OA}}$$

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Tablas de Resultados y Graficas Para Falla Línea a Línea.

Falla línea a Línea					
%Z del Transformador	I_{TH}	I_{TX}	I_{1T}	I_{2T}	Unidad
4	6.56	27.78	3.79	-3.79	PU
4.5	6.41	25.64	3.70	-3.70	PU
5	6.28	23.81	3.62	-3.62	PU
5.5	6.14	22.22	3.55	-3.55	PU
6	6.01	20.83	3.47	-3.47	PU
6.5	5.89	19.61	3.40	-3.40	PU
7	5.77	18.52	3.33	-3.33	PU
7.5	5.66	17.54	3.27	-3.27	PU
8	5.55	16.67	3.21	-3.21	PU
8.5	5.45	15.87	3.14	-3.14	PU
9	5.35	15.15	3.09	-3.09	PU
9.5	5.25	14.49	3.03	-3.03	PU
10	5.15	13.89	2.98	-2.98	PU
10.5	5.06	13.33	2.92	-2.92	PU
11	4.98	12.82	2.87	-2.87	PU
11.5	4.89	12.35	2.82	-2.82	PU
12	4.81	11.90	2.78	-2.78	PU

Tabla 5.4A.- Resultados del Programa de Cortocircuito Para Falla Línea a Línea con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Transformador. Obsérvese en la tabla que la corriente de cortocircuito de secuencia cero no aparece debido a que la falla línea a línea no involucra el neutro o tierra que es la que representa a la secuencia cero.

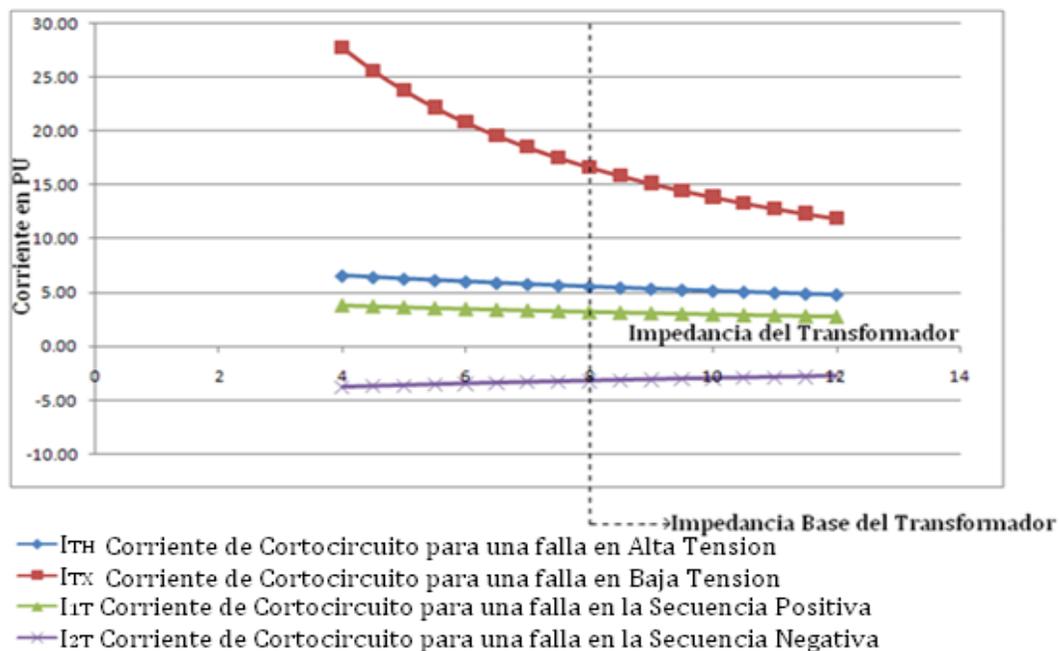


Figura 5.4A.- Grafica de la Corriente de Cortocircuito Línea a Línea con una Impedancia Base y variaciones en la impedancia del Transformador. En la grafica se observa que en el momento que ocurre la falla la corriente de cortocircuito es mayor en baja tensión (I_{TX}) y menos sensible a la variación de impedancias que la de alta tensión (I_{TH}), pero también se observa que las corrientes de corto circuito en la secuencia positiva (I_{1T}) y negativa (I_{2T}) son iguales en magnitud pero con signo contrario.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Falla Línea a Línea					
%Z del Generador	I_{TH}	I_{TX}	I_{1T}	I_{2T}	Unidad
10	8.02	16.67	4.63	-4.63	PU
11	7.60	16.67	4.39	-4.39	PU
12	7.22	16.67	4.17	-4.17	PU
13	6.87	16.67	3.97	-3.97	PU
14	6.56	16.67	3.79	-3.79	PU
15	6.28	16.67	3.62	-3.62	PU
16	6.01	16.67	3.47	-3.47	PU
17	5.77	16.67	3.33	-3.33	PU
18	5.55	16.67	3.21	-3.21	PU
19	5.35	16.67	3.09	-3.09	PU
20	5.15	16.67	2.98	-2.98	PU
21	4.98	16.67	2.87	-2.87	PU
22	4.81	16.67	2.78	-2.78	PU
23	4.66	16.67	2.69	-2.69	PU
24	4.51	16.67	2.60	-2.60	PU
25	4.37	16.67	2.53	-2.53	PU
26	4.25	16.67	2.45	-2.45	PU

Tabla 5.4B.- Resultados del Programa de Cortocircuito Para Falla Línea a Línea con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Generador.

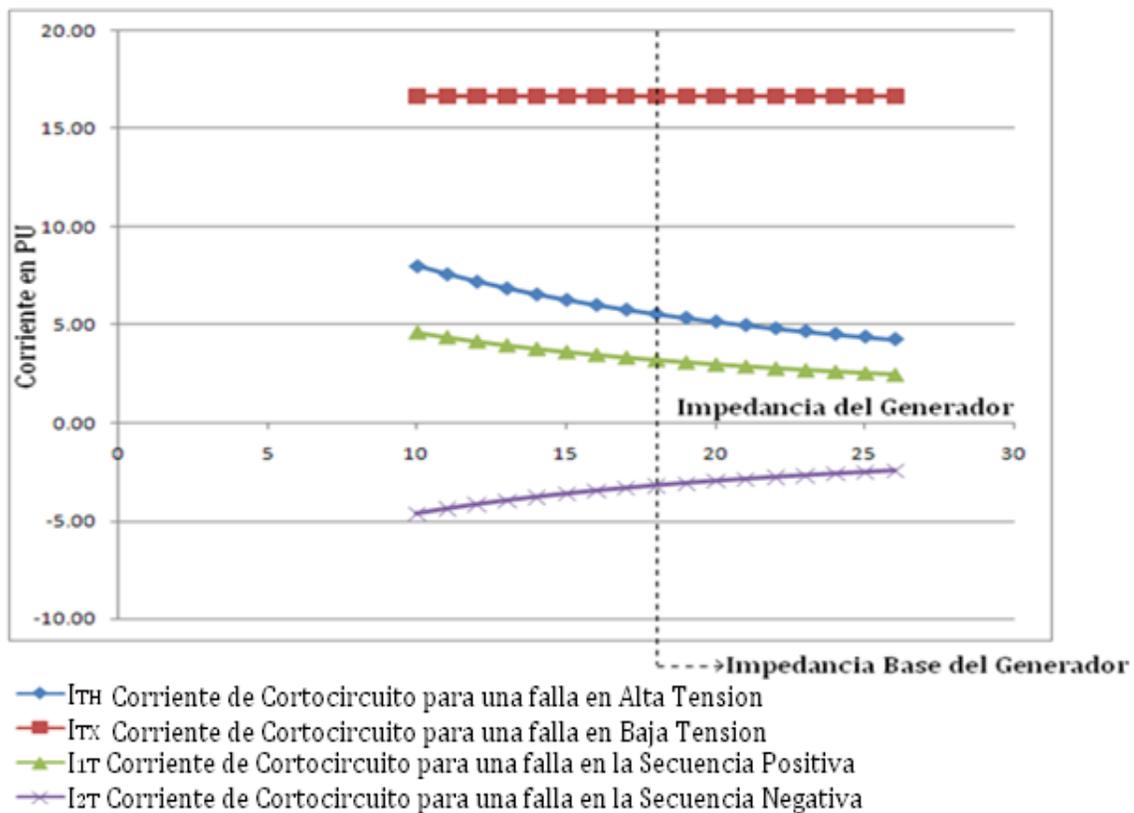


Figura 5.4B.- Grafica de la Corriente de Cortocircuito Línea a Línea con una Impedancia Base y variaciones en la impedancia del Generador. En la grafica se observa que la corriente de cortocircuito en Baja tension (I_{TX}) es independiente a la variacion de impedancias del generador, pero la corriente en alta tension (I_{TH}) y las de secuencia positiva (I_{1T}) y negativa (I_{2T}) se ven afectadas por la variacion de impedancias.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Falla Línea a Línea					
%Z del Sistema	I_{TH}	I_{TX}	I_{1T}	I_{2T}	Unidad
0.5	5.55	19.61	3.21	-3.21	PU
1	5.55	18.52	3.21	-3.21	PU
1.5	5.55	17.54	3.21	-3.21	PU
2	5.55	16.67	3.21	-3.21	PU
2.5	5.55	15.87	3.21	-3.21	PU
3	5.55	15.15	3.21	-3.21	PU
3.5	5.55	14.49	3.21	-3.21	PU
4	5.55	13.89	3.21	-3.21	PU
4.5	5.55	13.33	3.21	-3.21	PU
5	5.55	12.82	3.21	-3.21	PU
5.5	5.55	12.35	3.21	-3.21	PU
6	5.55	11.90	3.21	-3.21	PU

Tabla 5.4C.- Resultados del Programa de Cortocircuito Para Falla Línea a Línea con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Sistema.

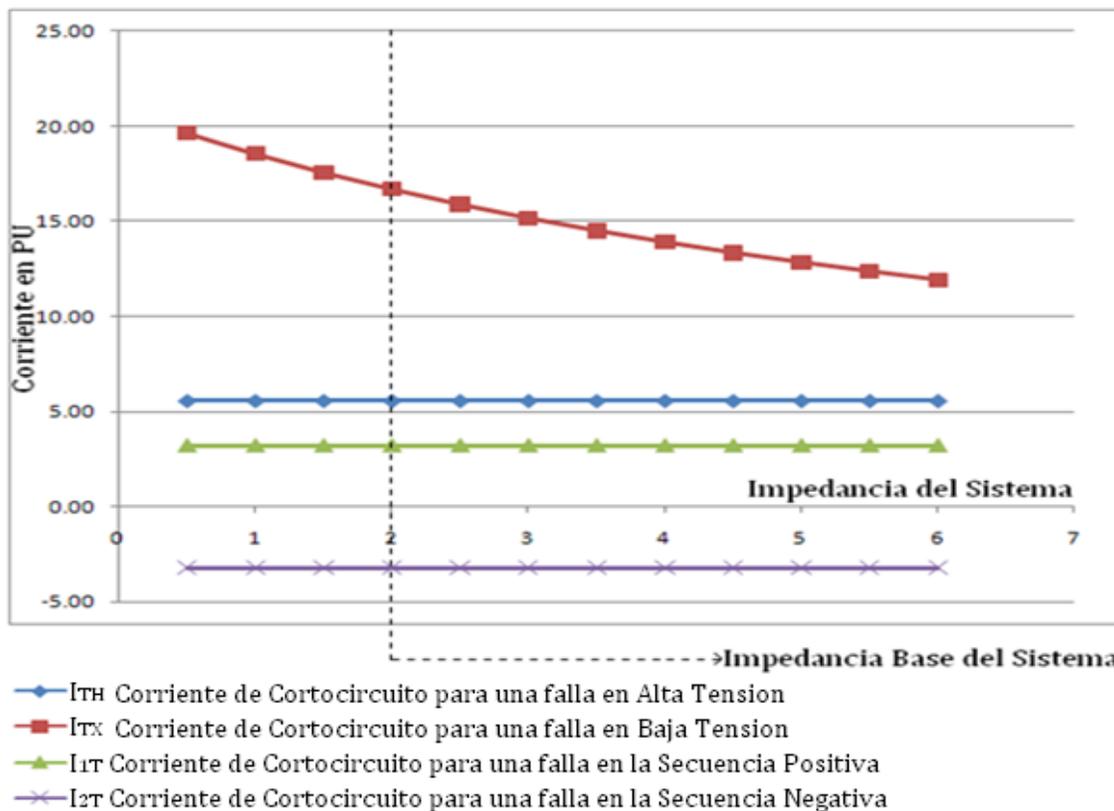


Figura 5.4C.- Grafica de la Corriente de Cortocircuito Línea a Línea con una Impedancia Base y variaciones en la impedancia del Sistema. En esta grafica a diferencia de la grafica 5.2B la corriente de cortocircuito en baja tensión (I_{TX}) es la única afectada y es poco sensible a la variación de impedancias del sistema, las demás permanecen sin variaciones.

Cálculo de Esfuerzos Mecánicos en la Falla Línea a Línea del Transformador.

Calculando I_{cc} para la Bobina en Alta Tensión.

$$I_{cc} = I_{PU} * I_{Base}$$

$$I_{ccTH} = 5.55 * 833333$$

$$I_{ccTH} = 4624998 \text{ Amp}$$

Corriente de Cortocircuito máxima en la salida de Alta Tensión.

Calculando I_{amp} para la Bobina en Baja Tensión.

$$I_{cc} = I_{PU} * I_{Base}$$

$$I_{ccTX} = 16.67 * 833333$$

$$I_{ccTX} = 13891661 \text{ Amp}$$

Corriente de Cortocircuito máxima en la salida de Baja Tensión.

Aplicando la Formula para la bobina en Alta Tensión:

$$Frad = 1.256 \frac{N_{TH} I_{cc}^2}{Hw} \pi dm 10^{-6} \text{ (Newton)}$$

$$Frad_{TH} = 1.256 \frac{640 * 4624998^2}{2} \pi * 1.8 * 10^{-6}$$

$$Frad_{TH} = 1245804834 \text{ Newton}$$

Fuerzas de Repulsión en la Bobina de Alta Tensión.

Aplicando la Formula para la bobina en Baja Tensión:

$$Frad = 1.256 \frac{N_{TX} I_{cc}^2}{Hw} \pi dm 10^{-6} \text{ (Newton)}$$

$$Frad_{TX} = 1.256 \frac{20 * 13891661^2}{2} \pi * 1.8 * 10^{-6}$$

$$Frad_{TX} = 822380196 \text{ Newton}$$

Fuerzas de Repulsión en la Bobina de Baja Tensión.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Tablas de Resultados y Graficas Para Esfuerzos Mecánicos en la Falla Línea a Línea.

Falla Doble Línea a Tierra				Esfuerzos Mecánicos		
%Z Transformador	I _{TH}	I _{TX}	Unidad	Frad TH	Frad TX	Unidad
4	6.56	27.78	PU	17404907.69	22838413.22	Newton
4.5	6.41	25.64	PU	16618051.66	19455279.99	Newton
5	6.28	23.81	PU	15950831.71	16777229.08	Newton
5.5	6.14	22.22	PU	15247575.34	14611323.38	Newton
6	6.01	20.83	PU	14608747.73	12840442.30	Newton
6.5	5.89	19.61	PU	14031194.19	11380376.52	Newton
7	5.77	18.52	PU	13465288.78	10150405.87	Newton
7.5	5.66	17.54	PU	12956774.73	9104594.79	Newton
8	5.55	16.67	PU	12458048.34	8223801.96	Newton
8.5	5.45	15.87	PU	12013154.16	7453414.90	Newton
9	5.35	15.15	PU	11576348.96	6792454.05	Newton
9.5	5.25	14.49	PU	11147632.74	6213527.35	Newton
10	5.15	13.89	PU	10727005.51	5709603.30	Newton
10.5	5.06	13.33	PU	10355357.08	5258498.36	Newton
11	4.98	12.82	PU	10030503.44	4863820.00	Newton
11.5	4.89	12.35	PU	9671231.16	4513727.73	Newton
12	4.81	11.90	PU	9357378.53	4190784.86	Newton

Frad TH.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Alta Tensión.
 Frad TX.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Baja Tensión.

Tabla 5.4D.- Resultados del Programa de Cortocircuito y Esfuerzos Mecánicos Para Falla Línea a Línea con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Transformador.

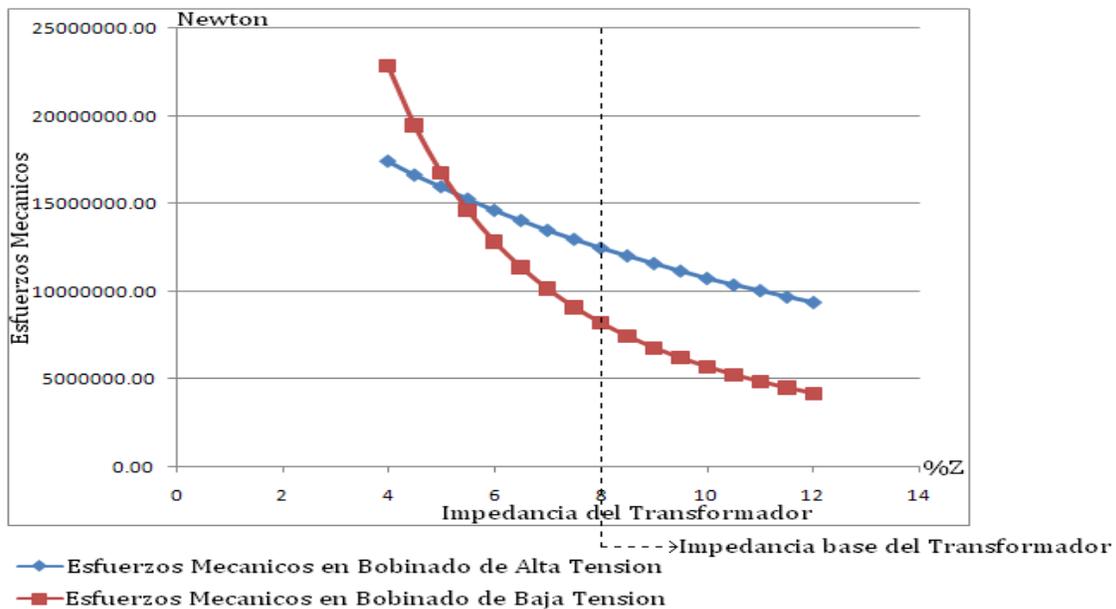


Figura 5.4D.- Grafica de Esfuerzos Mecánicos en las bobinas del Transformador para la falla Línea a Línea con una Impedancia Base y variaciones en la Impedancia del Transformador. La grafica muestra que cuando la impedancia del transformador es cercana a seis las fuerzas de repulsión son iguales en ambas bobinas, pero conforme la impedancia aumenta las fuerzas de repulsión son menores en la bobina de baja tensión debido a su mayor sensibilidad.

CÁLCULO DE CORRIENTES DE CORTOCIRCUITO Y ESFUERZOS MECÁNICOS EN TRANSFORMADORES DE POTENCIA TIPO GENERADOR (GSU).

Falla Doble Línea a Tierra				Esfuerzos Mecánicos		
%Z Generador	I _{TH}	I _{TX}	Unidad	Frad TH	Frad TX	Unidad
10	8.02	16.67	PU	26014338.21	8223801.96	Newton
11	7.60	16.67	PU	23360989.28	8223801.96	Newton
12	7.22	16.67	PU	21083292.83	8223801.96	Newton
13	6.87	16.67	PU	19088751.30	8223801.96	Newton
14	6.56	16.67	PU	17404907.69	8223801.96	Newton
15	6.28	16.67	PU	15950831.71	8223801.96	Newton
16	6.01	16.67	PU	14608747.73	8223801.96	Newton
17	5.77	16.67	PU	13465288.78	8223801.96	Newton
18	5.55	16.67	PU	12458048.34	8223801.96	Newton
19	5.35	16.67	PU	11576348.96	8223801.96	Newton
20	5.15	16.67	PU	10727005.51	8223801.96	Newton
21	4.98	16.67	PU	10030503.44	8223801.96	Newton
22	4.81	16.67	PU	9357378.53	8223801.96	Newton
23	4.66	16.67	PU	8782858.36	8223801.96	Newton
24	4.51	16.67	PU	8226538.40	8223801.96	Newton
25	4.37	16.67	PU	7723727.08	8223801.96	Newton
26	4.25	16.67	PU	7305364.77	8223801.96	Newton

Frad TH.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Alta Tensión.

Frad TX.- Fuerzas de Repulsión en las Bobinas de Baja Tensión.

Tabla 5.4E.- Resultados del Programa de Cortocircuito y Esfuerzos Mecánicos Para Falla Línea a Línea con una Impedancia Base como Referencia y Variaciones en la Impedancia del Generador.

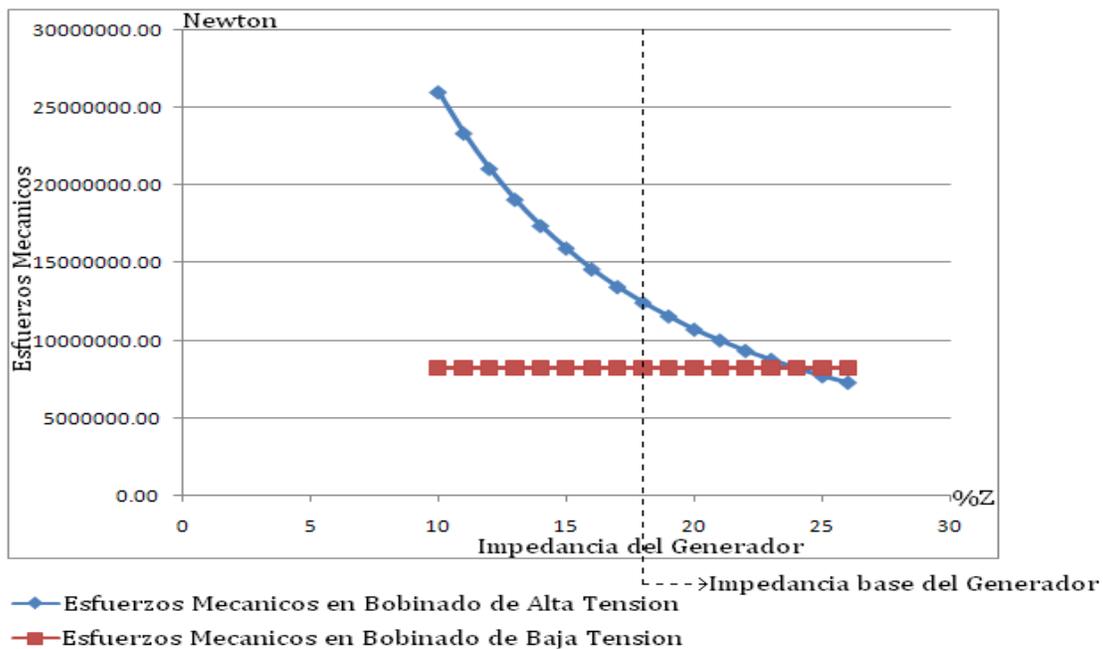


Figura 5.4E.- Gráfica de Esfuerzos Mecánicos en las bobinas del Transformador para la falla Línea a Línea con una Impedancia Base y variaciones en la Impedancia del Generador. Obsérvese que la bobina de baja tensión no tiene variaciones en sus fuerzas de repulsión ya que es totalmente independiente a las variaciones de la impedancia, mientras las bobinas de alta tensión son las que tienen variaciones lo que demuestra que al momento de la falla en el lado del generador los esfuerzos mecánicos son mas severos cuando la impedancia va decreciendo.

CONCLUSIONES.

El estudio del comportamiento del sistema generador-transformador ante condiciones de cortocircuito, utilizando el método de componentes simétricas, nos permitió analizar de una manera simple y dinámica los diferentes tipos de falla; por ejemplo para el caso de la falla trifásica obtuvimos que cuando la falla se presenta en el lado de alta tensión, la corriente alcanza 6.41 p.u. lo cual nos indica que es 6.41 veces la corriente nominal del devanado, la cual resultaría de 6435 Amp. en el devanado de alta y 88458 Amp. aproximadamente en el devanado de baja tensión. Dichas corrientes al circular por los devanados generan fuerzas electromagnéticas, las cuales son proporcionales al cuadrado de esta corriente y producen enormes esfuerzos mecánicos que deben tomarse en consideración durante la etapa de diseño es estos importantes equipos.

El expresar las cantidades en por unidad (p.u.) nos ayudo a reducir de una manera eficiente los cálculos durante la realización del programa y presentación de los resultados ya que de otro modo hubieran sido cantidades grandes y engorrosas. Al realizar el modelo aplicando las redes de secuencia fue posible analizar el problema de una manera separada para cada uno de los casos analizados, facilitando el análisis.

Con ayuda de las graficas de la corriente de falla en función de los parámetros del sistema, fue posible observar de una manera rápida y eficiente el comportamiento de las diferentes fallas.

Con base a los valores de corrientes calculadas por las metodologías enunciadas es posible determinar los valores de cortocircuito, de ahí la importancia del programa que se desarrolló ya que con este tipo de valores como datos de entrada, los diseñadores pueden estimar la magnitud de las fuerzas esperadas de cortocircuito y de este modo diseñar correctamente los devanados de los transformadores de potencia para que cumplan con los requisitos de normatividad vigentes y las condiciones de operación.

El uso de herramientas computacionales simplifica e incrementan la eficiencia de los cálculos de ingeniería, para el caso particular de este trabajo, el programa desarrollado en Excel resultó ser muy útil para la resolución del problema abordado. Por otra parte la metodología aplicada se enfocó al caso de un sistema Generador-Transformador (GSU), sin embargo, esta metodología puede emplearse a un problema de mayor complejidad sin mayores dificultades.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Análisis de sistemas de potencia.
 - a. William D. Stevenson, Jr.
 - b. John J. Grainer.
2. Elements of Power System Analysis.
 - a. William D. Stevenson, Jr.
3. Fundamentos de Protección de Sistemas Eléctricos.
 - a. Gilberto Enríquez Harper.
4. Guía Práctica para el Cálculo de Instalaciones Eléctricas.
 - a. Gilberto Enríquez Harper.
5. Maquinas Eléctricas.
 - a. S. Chapman, Ed. Mc Graw Hill
6. Protecciones Eléctricas.
 - a. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola.
7. Transformadores de distribución (Teoría, cálculo, construcción y pruebas. Tercera edición. Ed. Reverte. México 2008). Pérez Pedro, Avelino.
8. <http://www.foxitsoftware.com>: Cálculo de Corrientes de Cortocircuito
9. [http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen:Campo magnetico.pn](http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen:Campo_magnetico.pn)
10. [http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen:El transformador de potencia.pn](http://es.wikipedia.org/wiki/Imagen:El_transformador_de_potencia.pn)
11. Esfuerzos Mecánicos en Transformadores de Potencia: Industrias IEM
12. Introducción al Cortocircuito: Schneider Electric.
13. Short Circuit Duty of Power Transformers: Transformadores ABB, Thomas Fogelberg.
14. Transformadores y Subestaciones: Transformadores ABB.
15. Transformador Acorazado: Transformadores ABB