



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ESTIMACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR EN TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Alumno: Antonio Javier Montes Martínez

Tutor: Prof. D. Ignacio Pérez Guerrero
Dpto: Ingeniería Eléctrica

Junio, 2016



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Electricidad

Don IGNACIO PÉREZ GUERRERO, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado:
ESTIMACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR EN TRANSFORMADORES
TRIFÁSICOS, que presenta ANTONIO JAVIER MONTES MARTINEZ, autoriza su
presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, JUNIO DE 2016

El alumno:

ANTONIO JAVIER MONTES MARTINEZ

Los tutores:

IGNACIO PÉREZ GUERRERO

Índice

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.

1.1. CONTEXTO DEL PROYECTO	2
1.2. OBJETIVO DEL TRABAJO FIN DE GRADO.....	2
1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	3

Capítulo 2. COMPONENTES SIMETRICAS

2.1. INTRODUCCIÓN.	5
2.2. SISTEMAS TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS. CONDICIONES DE DESEQUILIBRIO.	5
2.3. COMPONENTES SIMÉTRICAS.	7
2.4. DESCOMPOSICIÓN DE UN SISTEMA DE VECTORES EN SUS COMPONENTES SIMÉTRICAS.	10

Capítulo 3. NORMATIVA Y ARTICULOS UTILIZADOS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS NECESARIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA

3.1. NORMA UNE-EN-60076-1.....	13
3.2. NORMA UNE-EN-200705 EQUIVALENTE A LA NORMA IEC 60076-8.....	15
3.3. RESUMEN NORMA AMERICANA IEEE C57 12 90.....	35
3.3.1. ENSAYOS DE SECUENCIA HOMOPOLAR RECOMENDADOS POR LA NORMATIVA AMERICANA.....	35
3.3.2. TRANSFORMADORES CON UN SOLO NEUTRO EXTERNO ACCESIBLE (EXCEPTO TRANSFORMADORES EN CONEXIÓN ZIGZAG)	35
3.3.3. TRANSFORMADORES CON DOS NEUTROS EXTERNOS ACCESIBLES (EXCEPTO TRANSFORMADORES EN CONEXIÓN ZIGZAG)	36
3.4. RESUMEN DEL ARTICULO DE INVESTIGACIÓN DE JIALONG WANG	38
3.4.1. INTRODUCCIÓN	39
3.4.2. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE DOS DEVANADOS	40

Capítulo 4. DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS REALIZADOS

4.1.	INTRODUCCIÓN.	47
4.2.	EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO.	47
4.2.1.	FUENTE REGULABLE DE TENSIÓN.	47
4.2.2.	EQUIPOS DE MEDIDA.	48
4.2.3.	TRANSFORMADOR MONOFÁSICO AUXILIAR.	49
4.3.	TRANSFORMADORES A ENSAYAR.	51
4.3.1.	TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE BAJA TENSIÓN DE 5KVA SIN BOBINADO TERCIARIO.	51
4.3.2.	TRANSFORMADOR DE BAJA TENSIÓN DE 5KVA CON BOBINADO TERCIARIO.	52
4.3.3.	TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE BAJA TENSIÓN DE 3KVA CON 3 ARROLLAMIENTOS SECUNDARIOS.	53
4.4.	DESCRIPCIÓN DE LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO.	55
4.4.1.	ESQUEMAS DE CONEXIÓN REALIZADOS EN LOS TRANSFORMADORES CON DEVANADO DE COMPENSACIÓN.	56
4.4.2.	PROCEDIMIENTO DE ENSAYO EN EL TRANSFORMADOR SIN DEVANADO DE COMPENSACIÓN.	58

Capítulo 5. TABLAS Y GRAFICOS REPRESENTATIVOS DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR

5.1.	TRANSFORMADOR TRIFASICO DE BAJA TENSIÓN DE 5KVA SIN BOBINADO DE COMPENSACIÓN.	61
5.2.	TRANSFORMADOR DE BAJA TESIÓN DE 5KVA CON BOBINADO DE COMPENSACIÓN.	63
5.3.	TRASNSFORMADOR TRIFASICO DE BAJA TENSIÓN DE 3KVA CON 3 ARROLLAMIENTOS SECUNDARIOS.	66
5.4.	DATOS REPRESENTATIVOS DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA FACILITADOS POR UN FABRICANTE DE TRASNFORMADORES.	68

Capítulo 6. TIPOS DE PROTECCIONES UTILIES PARA LA PROTECCIÓN DE LOS TRANSFORMADORES TRIFASICOS ANTE LA COMPONENTE HOMOPOLAR

6.1.	PROTECCIÓN DIRECCIONAL DE TIERRA.	71
------	--	----

6.1.1.	MAGNITUDES DE ENTRADA	71
6.1.2.	ÁNGULO CARACTERÍSTICO.....	75
6.1.3.	PRINCIPIOS DE DETECCIÓN.....	77
6.2.	PROTECCIONES DIRECCIONALES DE FASE.....	80
6.2.1.	ÁNGULO DE DERIVACIÓN, ÁNGULO CARACTERÍSTICO	80
6.2.2.	PRINCIPIOS DE DETECCIÓN.....	82
6.3.	PROTECCIÓN DE POTENCIA	82
	BIBLIOGRAFÍA.....	84

Capítulo1

INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO DEL PROYECTO

Los ingenieros eléctricos vemos al transformador desde distintos puntos de vista, según sea nuestra función:

El operador se interesa por el funcionamiento, mantenimiento, y su duración, tratando de que circunstancias de uso no abrevien la vida.

El proyectista de la instalación, lo observa en sus cálculos como un circuito equivalente, produce caídas de tensión, limita corrientes de cortocircuito, debe soportar estados de carga, soportar sobretensiones, y esta visión se transmite con la especificación.

El proyectista del transformador, debe lograr con su dimensionamiento, satisfacer las condiciones fijadas en la especificación, y garantizar la vida útil.

La característica que examinamos es la impedancia del transformador, está sometida a dos intereses contrastantes, que las caídas de tensión sean moderadas (la impedancia debe ser baja), que las corrientes de cortocircuito sean limitadas (la impedancia debe ser elevada), esto no es nada fácil particularmente cuando se pretenden equipos cuya potencia debe ser relativamente grande.

Cuando se examina la caída de tensión normalmente se considera la carga trifásica y equilibrada, condiciones de carga distintas se consideran casos muy particulares, excepcionales.

Cuando se examinan las condiciones de cortocircuito además del caso trifásico, asumen importancia las condiciones de funcionamiento asimétricas (en particular monofásicas).

1.2. OBJETIVO DEL TRABAJO FIN DE GRADO

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado, es determinar la impedancia homopolar en transformadores de potencia trifásicos mediante ensayos en laboratorio.

Para tal fin, se analizaron los transformadores de baja tensión disponibles en el laboratorio, mediante los ensayos correspondientes y con todas las conexiones

disponibles según establecen las normas españolas UNE-EN-60076-1 y UNE-EN-207005 y la norma americana IEEE C57.12.90, además de obtener resultados de transformadores de alta tensión de fabricantes.

1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El Trabajo fin de carrera se estructura del siguiente modo:

En el Capítulo 1 se realiza una pequeña introducción de la importancia de los transformadores en el sistema eléctrico. Se plantean cuáles son los objetivos de este trabajo y cuál es el motivo por el cual se realizara.

En el Capítulo 2 se explica un pequeño resumen de las componentes simétricas y su importancia de su uso para el análisis de los problemas de cortocircuito.

En el Capítulo 3 se realiza una revisión a toda la normativa existente como artículos que han avanzado en este tema de componentes homopolares en transformadores.

En el Capítulo 4 se describen tanto los equipos utilizados para la realización de los ensayos, como el procedimiento para llevarlos a cabo, así como las conexiones utilizadas para la elaboración de los ensayos.

En el Capítulo 5 se representan los resultados obtenidos mediante la realización de los ensayos descritos en el capítulo 4, se compone de tablas con los gráficos representando los valores obtenidos, con una pequeña conclusión sobre los datos reflejados.

En el Capítulo 6 haremos un repaso a las protecciones que actualmente se utilizan para la detección de la protección homopolar.

Capítulo 2

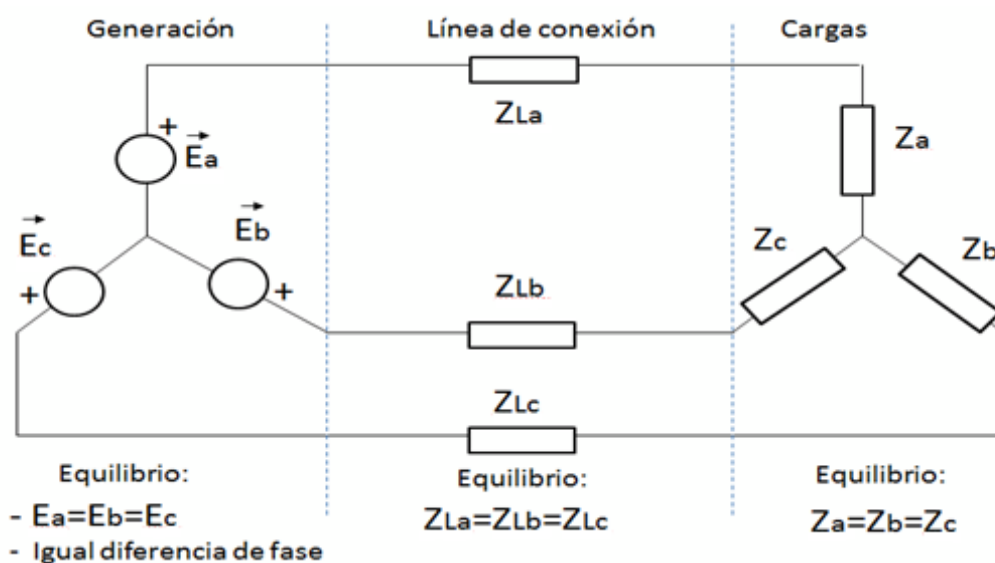
COMPONENTES SIMETRICAS

2.1. INTRODUCCIÓN.

Para el cálculo de circuitos trifásicos desequilibrados que contienen máquinas eléctricas no se suelen utilizar los métodos generales de análisis por la dificultad de determinar las impedancias equivalentes de dichos elementos en condiciones de desequilibrio. Para estos casos se sigue un procedimiento basado en el principio de superposición y denominado método de las componentes simétricas que prueba que un sistema lineal trifásico desequilibrado se puede resolver como suma de tres sistemas equilibrados, sistemas que son denominados componentes simétricas del sistema desequilibrado. Este método, que fue desarrollado por Fostescue, constituye una de las mejores herramientas para tratar estos sistemas desequilibrados.

2.2. SISTEMAS TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS. CONDICIONES DE DESEQUILIBRIO.

Un sistema trifásico está equilibrado cuando cumple una serie de condiciones en los subsistemas de generación, de las cargas y de las líneas de conexión. En la generación, las condiciones de equilibrio se dan si los tres generadores tienen el mismo valor eficaz y además la diferencia de fase entre los distintos fasores es siempre la misma e igual a 120° . En el caso de las cargas y de las líneas de conexión el equilibrio se da cuando las impedancias de las distintas fases son iguales.



El desequilibrio del sistema se produce cuando deja de ser equilibrado cualquier de los subsistemas anteriores. Fundamentalmente se pueden producir dos casos distintos de desequilibrio:

a) Desequilibrio en tensiones: cuando deja de ser equilibrado el sistema de generación de alimentación al sistema trifásico, ver figura 2.1.

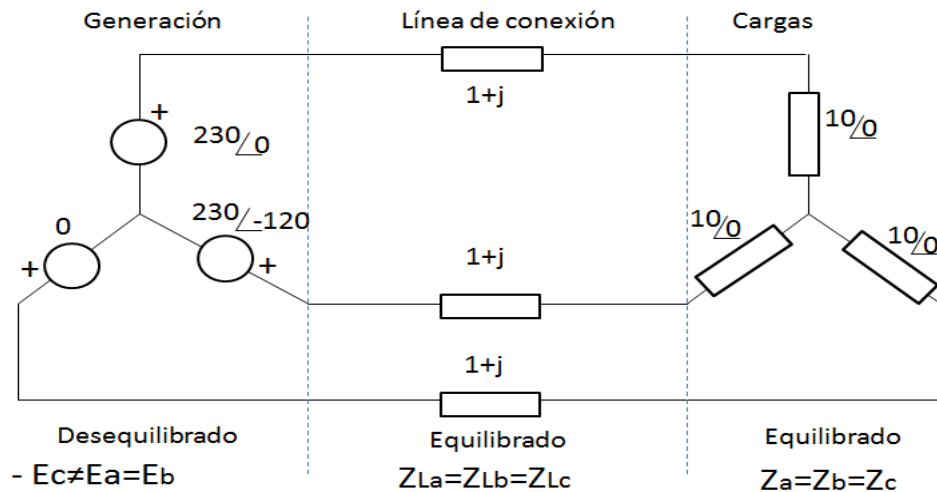


Figura 2.1. Ejemplo de circuito trifásico desequilibrado en tensiones

b) Desequilibrio en impedancias: cuando deja de ser equilibrada la línea de conexión o las cargas, ver figura 2.2.

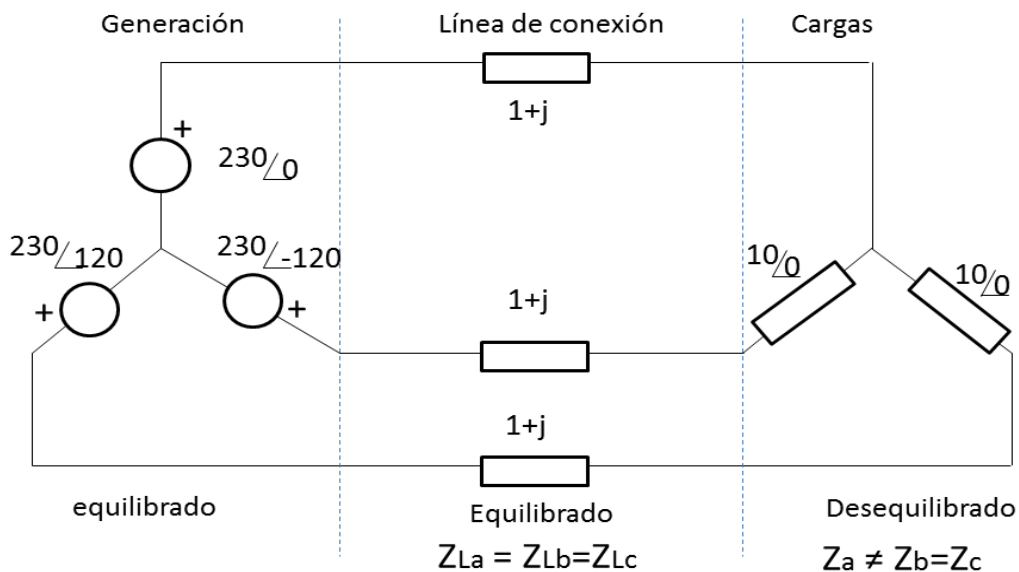


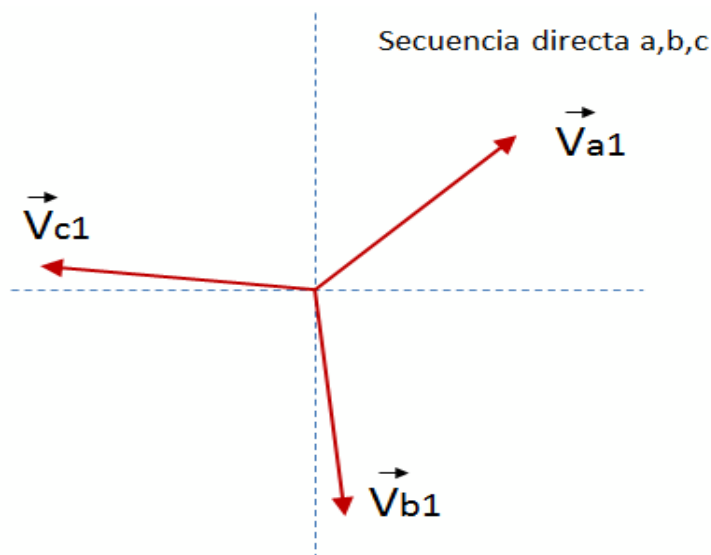
Figura 2.2. Ejemplo de circuito trifásico desequilibrado en impedancias

El desequilibrio en impedancias es el caso que más se presenta y generalmente son desequilibrios producidos por faltas en el sistema tales como cortocircuitos desequilibrados de una o dos fases a tierra o cortocircuito entre dos fases.

2.3. COMPONENTES SIMÉTRICAS.

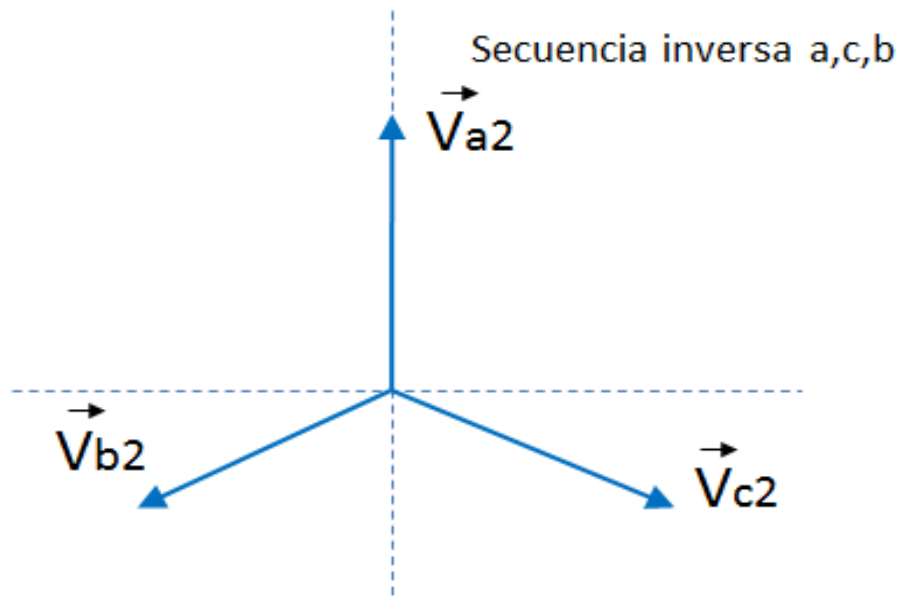
De acuerdo con el Teorema de Fortescue, cualquier sistema trifásico de fasores desequilibrados se puede obtener como suma de tres sistemas de fasores equilibrados, denominadas componentes simétricas, de las siguientes características:

Componentes de secuencia positiva: formado por un sistema equilibrado de fasores de secuencia positiva, secuencia directa, también denominado de secuencia 1.



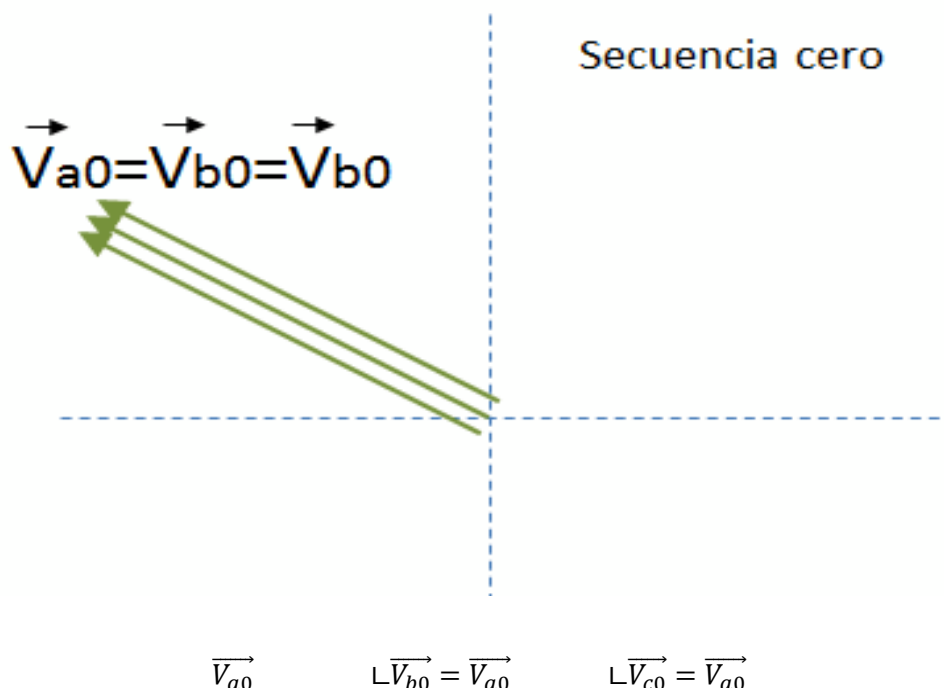
$$\vec{V}_{a1} \quad \angle \vec{V}_{b1} = \vec{V}_{a1} \times 1 \angle -120 \quad \angle \vec{V}_{c1} = \vec{V}_{a1} \times 1 \angle 120$$

Componentes de secuencia negativa: formado por un sistema equilibrado de fasores de secuencia negativa, secuencia inversa, también denominado de secuencia 2.



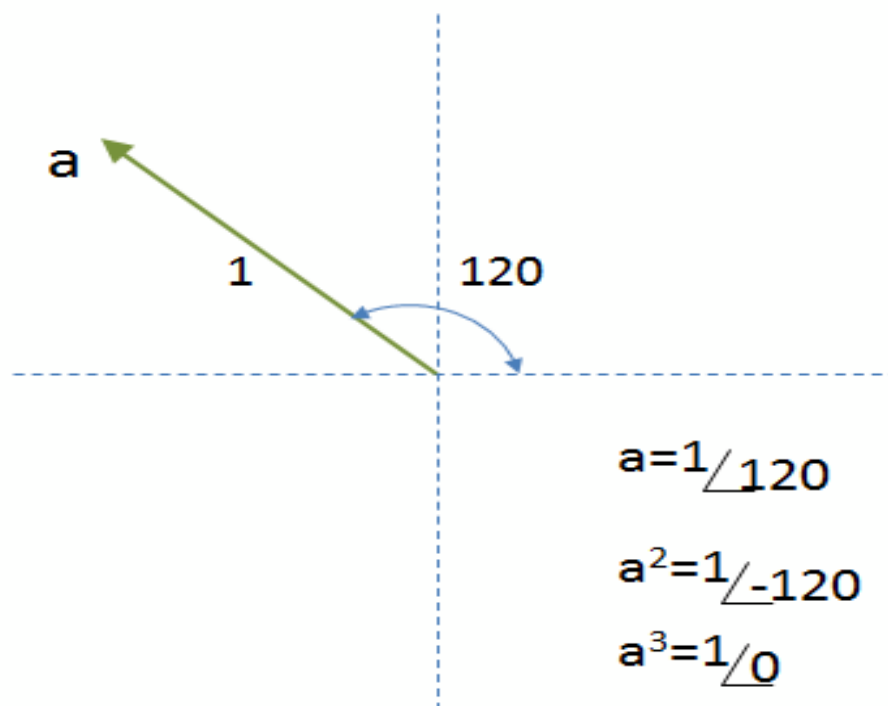
$$\vec{V}_{a2} \quad \angle \vec{V}_{b2} = \vec{V}_{a2} \times 1 \angle 120 \quad \angle \vec{V}_{c2} = \vec{V}_{a2} \times 1 \angle -120$$

Componentes de secuencia homopolar: formado por un sistema equilibrado de fasores de secuencia homopolar, también denominado de secuencia cero, caracterizado por que los tres fasores son iguales, mismo modulo y argumento. Este sistema de fasores, así formado, también es equilibrado ya que los tres tienen el mismo módulo y la diferencia de fases entre cualquiera dos de ellos es la misma e igual a cero.



Vemos que, en los tres sistemas equilibrados planteados, conocida una fase quedan definidas las restantes fases, esto es, conocida la fase V_{a0} , V_{a1} y V_{a2} de los distintos sistemas equilibrados, automáticamente quedan definidas el resto de las fases y por tanto quedan definidas las componentes simétricas. Por este motivo, a los fasores V_{a0} , V_{a1} y V_{a2} se les denomina componentes simétricas básicas.

Si definimos el operador “a” como un vector de módulo 1 y argumento 120; el producto de “ $a \times a = a^2$ ” nos dará un vector de módulo 1 y argumento -120; y el producto de “ $a \times a \times a = a^3$ ” nos dará un vector de módulo 1 y argumento 0.



Utilizando el operador “a”, las componentes simétricas se pueden expresar en función de las básicas de acuerdo a las expresiones recogidas en la tabla 2.1.:

Tabla 2.1.

	Componente fase a simétrica básica	Componente fase b	Componente fase c
Sistema directo	V_{a1}	$V_{b1} = a^2 \times V_{a1}$	$V_{c1} = a \times V_{a1}$
Sistema inverso	V_{a2}	$V_{b2} = a \times V_{a2}$	$V_{c2} = a^2 \times V_{a2}$
Sistema homopolar	V_{a0}	$V_{b0} = V_{a0}$	$V_{c0} = V_{a0}$

2.4. DESCOMPOSICIÓN DE UN SISTEMA DE VECTORES EN SUS COMPONENTES SIMÉTRICAS.

Si sumamos los fasores correspondientes de las tres componentes simétricas obtenemos en general un sistema trifásico de fasores desequilibrados, ver figura 2.3., que se obtienen de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\vec{V}_a = \vec{V}_{a0} + \vec{V}_{a1} + \vec{V}_{a2}$$

$$\vec{V}_b = \vec{V}_{b0} + \vec{V}_{b1} + \vec{V}_{b2} = \vec{V}_{a0} + \vec{V}_{a1} \times a^2 + \vec{V}_{a2} \times a$$

$$\vec{V}_c = \vec{V}_{c0} + \vec{V}_{c1} + \vec{V}_{c2} = \vec{V}_{a0} + \vec{V}_{a1} \times a + \vec{V}_{a2} \times a^2$$

Que puesto en forma matricial quedaría:

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_a \\ \vec{V}_b \\ \vec{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \vec{V}_{a0} \\ \vec{V}_{a1} \\ \vec{V}_{a2} \end{bmatrix}$$

(Fórmula 2.1.)

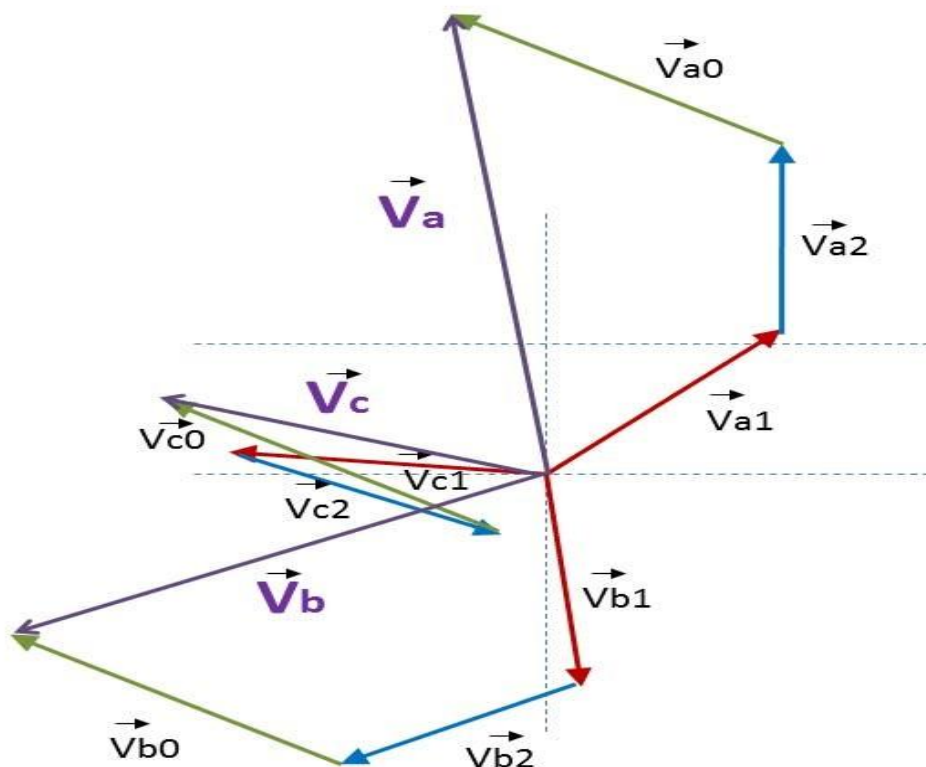


Figura 2.3. Sistema desequilibrado como la suma de tres sistemas equilibrados de secuencia 0, 1 y 2

Conocidos los vectores desequilibrados $\mathbf{V_a}$; $\mathbf{V_b}$; $\mathbf{V_c}$, las incógnitas serían las componentes simétricas básicas $\mathbf{V_{a0}}$; $\mathbf{V_{a1}}$; $\mathbf{V_{a2}}$ que permitirían obtener sus correspondientes sistemas equilibrados. Para ello, multiplicando por la matriz inversa, despejamos en la ecuación (fórmula 2.1.) y se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} \overrightarrow{V_{a0}} \\ \overrightarrow{V_{a1}} \\ \overrightarrow{V_{a3}} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \overrightarrow{V_a} \\ \overrightarrow{V_b} \\ \overrightarrow{V_c} \end{bmatrix}$$

(Fórmula 2.2)

Una vez obtenidas las componentes simétricas básicas, se pueden obtener el resto de las componentes simétricas de acuerdo con las ecuaciones de la tabla 2.1.

De los resultados de la ecuación (fórmula 2.2.) se obtiene que la componente homopolar es un tercio de la suma de los tres vectores desequilibrados. Esto significa que fasores desequilibrados cuya suma sea cero carecen de componente homopolar. Esto ocurre, por ejemplo, con las tensiones de línea de un sistema trifásico desequilibrado y con las corrientes de línea en sistemas de distribución a tres hilos sin neutro de retorno.

Capítulo 3

NORMATIVA Y ARTICULOS UTILIZADOS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS NECESARIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA

3.1. NORMA UNE-EN-60076-1

Se ha respetado el contexto literal para su comprensión así como su nomenclatura.

11.6 Medición de la o las impedancias homopolares en los transformadores trifásicos

La impedancia homopolar se mide a la frecuencia asignada entre los bornes de línea unidos entre si y su borne de neutro de un arrollamiento conectado en estrella o en zigzag. Se expresa en ohmios por fase y se obtiene por la relación $\frac{3U}{I}$, siendo U la tensión de ensayo e I la corriente de ensayo.

Se debe establecer en el informe del ensayo la corriente por fase de ensayo $\frac{I}{3}$.

Se debe asegurar que la corriente en la conexión de neutro es compatible con su capacidad de carga.

En el caso de un transformador con un arrollamiento adicional conectado en triángulo, el calor de la corriente de ensayo debe ser tal que en el arrollamiento conectado en triángulo no sea excesiva, teniendo en cuenta el tiempo de aplicación.

Si no hay un arrollamiento que proporcione amperio-espira de equilibrado en el sistema homopolar, por ejemplo en un transformador conectado en estrella-estrella sin arrollamiento en triángulo, la tensión aplicada no debe superar la tensión fase-neutro en funcionamiento normal. La corriente por el neutro y el tiempo de aplicación se deberían limitar también para evitar temperaturas excesivas en las partes de construcción metálicas.

En el caso de transformadores que tienen más de un arrollamiento con conexión en estrella con neutro accesible, la impedancia homopolar depende de la conexión (véase 3.7.3) y los ensayos a realizar deben ser objeto de acuerdo entre el fabricante y el comprador.

Para autotransformadores y transformadores del tipo YY, hay varias combinaciones de ensayos a realizar.

- AT con BT en circuito abierto;
- AT con BT en cortocircuito;
- BT con AT en circuito abierto;
- BT con AT en cortocircuito.

Para transformadores de tipo YD la impedancia homopolar se mide solamente desde el lado Y

Los autotransformadores con un borne de neutro destinado para conexión a tierra permanente se deben tratar como transformadores normales con dos arrollamientos conectados en estrella. De esta forma, el arrollamiento serie y el arrollamiento común forman juntos un circuito de medida, y el arrollamiento común forma el otro. Las mediciones se realizan con una corriente que no supere la diferencia entre las corrientes asignadas de los lados de baja y alta tensión.

NOTA 1: Donde no hay un arrollamiento que proporcione amperio-espira de equilibrado, la relación entre tensión y corriente es no lineal generalmente. En ese caso, varias mediciones para distintos valores de corriente pueden proporcionar información útil.

NOTA 2: La impedancia homopolar depende de la disposición física de los arrollamientos y de las partes magnéticas y, por lo tanto, las mediciones en diferentes arrollamientos pueden no concordar. En particular, para un transformador con un arrollamiento en zigzag en el que la impedancia homopolar medida entre los bornes de línea unidos entre si y el neutro puede resultar diferente del que se obtiene cuando se aplica un sistema de tensiones trifásico simétrico con un borne de línea conectado al neutro.

NOTA 3: Se puede requerir un ensayo adicional de impedancia homopolar para transformadores con arrollamientos en triangulo que tengan dos conexiones de un vértice accesibles de manera que se pueda configurar un triángulo abierto o cerrado.

NOTA 4: Se dan más indicaciones en la norma IEC 60076-8

3.2. NORMA UNE-EN-200705 EQUIVALENTE A LA NORMA IEC 60076-8

Se ha respetado el contexto literal para su comprensión así como su nomenclatura.

4. PROPIEDADES HOMOPOLARES-CORRIENTE DE CARGA DEL NEUTRO Y CONDICIONES DE DEFECTO A TIERRA, SATURACIÓN MAGNÉTICA Y CORRIENTE DE CONEXIÓN

Este capítulo trata sobre las características de los transformadores trifásicos y de los bancos de transformadores monofásicos en lo que concierne a las condiciones de servicio trifásico desequilibrado.

Existen diferencias que dependen de la geometría del circuito magnético y de la combinación de las conexiones trifásicas de los arrollamientos.

Las condiciones de desequilibrio comprenden las perturbaciones transitorias así como los desequilibrios durante el servicio continuo, dando lugar a:

- pérdida temporal de simetría en las tensiones trifásicas y, consecuentemente, de la simetría de magnetización del núcleo;
- desequilibrio temporal o permanente de corrientes de carga, particularmente de la corriente en el neutro, que afectará a la estabilidad de la tensión, al flujo de dispersión y a la magnetización del núcleo.

4.1. INTRODUCCIÓN DE COMPONENTES SIMÉTRICAS EN REDES TRIFÁSICAS

Se hace una breve presentación, en el apartado 4.1.1, del método analítico clásico llamado “componentes simétricas”, al cual a menudo se hace referencia en el análisis de las redes de distribución de energía. Para ampliar la información sobre éste método y sobre su aplicación, consultar libros de texto del análisis de sistemas de distribución de energía.

Se da una explicación más completa en el apartado 4.1.2, en lo concerniente a los aspectos prácticos de la puesta a tierra de la red a través de los neutros de los transformadores.

4.1.1. Principios y terminología de las componentes simétricas de tensión y corriente. El método convencional- mente aplicado, presupone tensiones y corrientes síncronas y sinusoidales, unidas por elementos de circuito en forma de impedancia o admitancia constante, con valor igual para las tres fases. Estas hipótesis implican que todas las ecuaciones del circuito son lineales, y que los cambios de variables por transformaciones lineales son posibles. Una transformación así permite obtener componentes simétricas.

En el caso de desequilibrio general, las tres tensiones de fase o las corrientes de fase individuales poseen amplitudes desiguales y no están espaciadas de igual manera en el tiempo (no están desfasadas 120 grados eléctricos). La suma de los valores instantáneos puede ser diferente de cero. El esquema de fases es una estrella asimétrica. La suma vectorial de las tres fases no forma necesariamente un triángulo cerrado (suma diferente de cero).

Sin embargo es posible siempre reemplazar las tres variables asimétricas originales por una combinación de las tres componentes simétricas siguientes:

- Una componente directa teniendo un conjunto de tres tensiones o de corrientes totalmente simétrico;
- Una componente inversa teniendo otro conjunto simétrico, pero con una secuencia de fases opuesta;
- Una componente homopolar teniendo el mismo valor vectorial en las tres fases sin rotación de las mismas.

Las dos primeras componentes de cada una tienen suma igual a cero en cada instante. La tercera componente representa el valor residual, la suma diferente de cero de las variables originales y aparece con un tercio en cada fase.

La ventaja del método de las componentes simétricas para el cálculo de las tensiones y corrientes es que, el sistema original de tres ecuaciones interrelacionadas con tres incógnitas es reemplazado por tres ecuaciones monofásicas distintas con una

incógnita para cada componente. Cada ecuación utiliza parámetros de impedancia o admitancia para la componente correspondiente.

Las soluciones de las ecuaciones para las distintas componentes simétricas se superponen comenzando por la última, fase por fase, para obtener las corrientes de las fases y las tensiones simples de la red real.

Los algoritmos para la transformación de las cantidades de la fase original en las componentes simétricas y a la inversa pueden encontrarse en los manuales que tratan de éste método.

4.1.2. Aspectos prácticos. Las propiedades de las componentes tienen las siguientes consecuencias prácticas en lo que concierne a las corrientes y tensiones.

- Las tres corrientes de línea en una red sin retorno de tierra o sin conductor neutro suman cero. Su transformación en componentes simétricas contiene las componentes directas e inversas pero ninguna componente homopolar.
- Las corrientes provenientes de una red con arrollamientos conectados en triángulo poseen esta propiedad.
- Si existe corriente de neutro a tierra o a través de un conductor de neutro (cuarto hilo), entonces la red de corrientes de fase puede tener una componente homopolar. Ésta es una condición normal en redes de distribución de cuatro hilos con cargas monofásicas aplicadas entre fase y neutro. Las líneas de transmisión de alta tensión normalmente no llevan corriente de neutro intencional. En la medida en que la asimetría de carga existe, ésta tiene a menudo el carácter de carga entre dos fases, lo que conlleva una componente inversa, pero no una componente homopolar.
- Una componente homopolar se define como la existente en una fase, y con la misma amplitud, en las tres fases. Una componente homopolar de corriente es, por consiguiente, precisamente un tercio de la corriente del neutro.
- La suma del conjunto de tensiones compuestas que atraviesan un arrollamiento conectado en triángulo es igual a cero, debido a la conexión cerrada, y no contienen ninguna componente de tensión homopolar. Pero en el interior del triángulo, puede circular una corriente homopolar, una corriente

de cortocircuito a lo largo del triángulo, que es inducida por otro arrollamiento (véase el apartado 4.5).

4.2. PARÁMETROS DE IMPEDANCIA PARA LOS COMPONENTES SIMÉTRICOS

Los parámetros de impedancia (o admitancia) de los diferentes elementos de la red pueden ser distintos para las tres componentes. En la práctica, componentes tales como transformadores y reactancias, tienen parámetros iguales para las secuencias positiva y negativa. Para un transformador, se toman los valores medidos durante los ensayos individuales.

Los parámetros homopolares de un transformador, sin embargo, son diferentes. Puede ser que estos transformadores que tienen valores iguales de impedancia directa (positiva) tengan características homopolares desiguales dependiendo del tipo del circuito magnético, de la conexión y posición de los diferentes arrollamientos, de la manera de guiar flujo de dispersión, etc.

En algunos casos, la impedancia homopolar será no lineal. Esto se describe con referencia a las características físicas del transformador en los capítulos siguientes, en los cuales se proporcionan algunas estimaciones cuantitativas a título de recomendación general. Si se requieren evidencias más exactas sobre un transformador específico, las medidas de sus características homopolares pueden llevarse a cabo como un ensayo especial, bajo pedido (véase el apartado 10.7 de la Norma CEI 60076-1).

4.3. ESQUEMA UNIFILAR EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR PARA LOS FENÓMENOS HOMOPOLARES

Los fundamentos del método de las componentes simétricas han sido mencionados en los apartados 4.1, 4.1.1, 4.1.2 y 4.2. Se ha explicado que el análisis de los fenómenos asimétricos, lineales y sinusoidales es tratado bajo la forma de ecuaciones monofásicas simultáneas, una para cada componente. Para las componentes directa (positiva) e inversa (negativa), el transformador se representa con sus impedancias normales en vacío y en cortocircuito, pero para la componente homopolar el esquema es a veces diferente dependiendo del diseño. Puede

encontrarse información cuantitativa sobre los parámetros de la componente homopolar en este apartado.

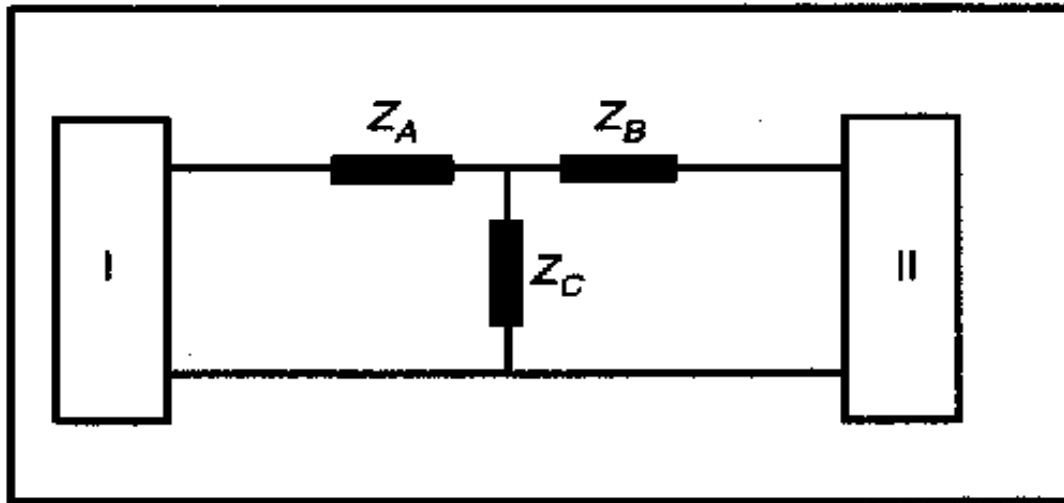


Fig. 8 - Esquema homopolar para un transformador con dos arrollamientos

El esquema equivalente de un transformador trifásico con dos arrollamientos para componentes homopolares se compone de una impedancia en serie y de una rama en derivación. En la figura 8, la suma de los dos elementos de la impedancia en serie Z_A y Z_B es igual a la impedancia normal de cortocircuito para la corriente directa. La subdivisión entre los dos elementos es arbitraria, e incluso puede tomarse un valor igual a cero.

Z_m es una impedancia magnetizante, cuyo orden de magnitud depende del diseño del circuito magnético. Un circuito magnético trifásico con cinco columnas o de tipo acorazado presenta una impedancia magnetizante muy alta para una tensión homopolar dada (véase el apartado 4.4).

En cambio, un núcleo de tres columnas tiene una impedancia magnetizante moderada para una tensión homopolar dada. Esta impedancia es no lineal con el valor de tensión o corriente y varía con el diseño. El flujo de dispersión de las culatas (véase el apartado 4.4) induce un flujo de corrientes parásitas (de Foucault) alrededor de toda la cuba del transformador. Hay una diferencia por consiguiente entre transformadores contruidos con cubas onduladas de chapa delgada de acero y los contruidos con cubas planas de chapa gruesa. Para los transformadores de las cubas de chapa gruesa, la impedancia homopolar por unidad es, en general, del orden de 0,25 a 1,0 cuando la corriente del neutro $3 \times I^0$ es igual a la corriente asignada a los

arrollamientos. La variación general de la impedancia con la corriente se muestra en la figura 9.

Para un transformador nuevo, el fabricante realizará, bajo pedido, una medida de la impedancia homopolar (véanse los apartados 10.1.3 y 10.7 de la Norma CEI 60076-1).

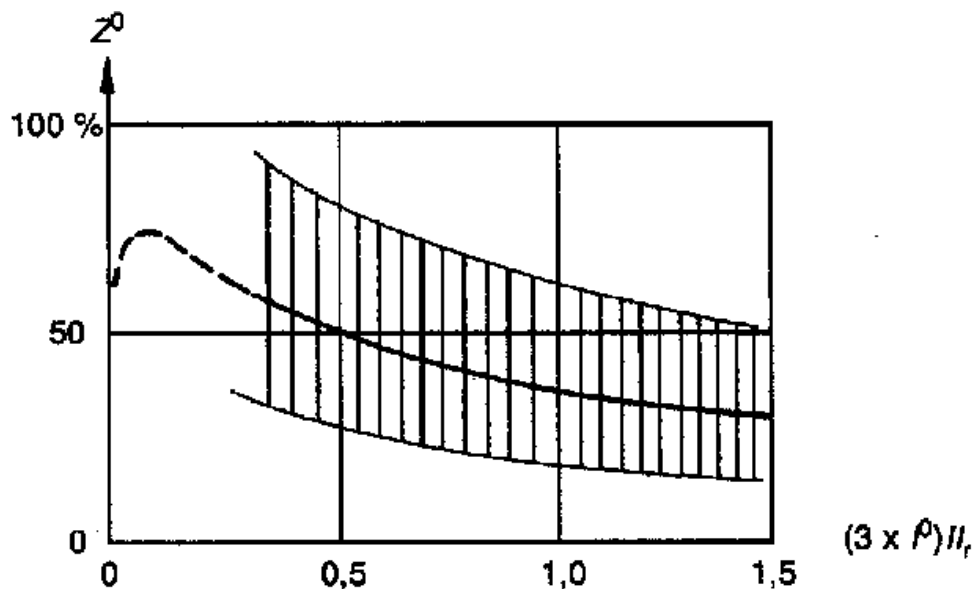


Fig. 9 - Variación de la impedancia magnetizante homopolar en función de la corriente en un transformador de tres columnas sin arrollamiento conectado en triángulo

Las consecuencias para los casos particulares de conexiones del transformador se describen en los apartados 4.3.1 y 4.3.2.

4.3.1. Transformador YNyn sin arrollamiento suplementario conectado en triángulo. Cuando se conectan los dos neutros a sistemas puestos directamente a tierra, la corriente homopolar puede ser transferida entre las redes, encontrándose una baja impedancia en el transformador. Las impedancias de las redes no son, en este caso, mayores que la impedancia en serie del transformador. Con un núcleo magnético de tres columnas, la moderada impedancia magnetizante no es despreciable. Esto disminuye la impedancia efectiva a través del transformador aproximadamente del 90% al 95% de la impedancia directa de cortocircuito. Con un núcleo magnético de cinco columnas o de tipo acorazado, no hay ninguna reducción.

Si el sistema de arrollamientos opuestos no acepta la corriente homopolar, la impedancia de entrada de uno u otro de los arrollamientos es la impedancia

magnetizante, que depende del diseño del núcleo magnético como anteriormente se precisaba.

Si el neutro de la red del arrollamiento opuesto es conectado a tierra a través de un elemento de impedancia Z_n , éste se representa en el esquema homopolar por una impedancia en serie suplementaria igual a $3Z_n$ (véase la figura 10).

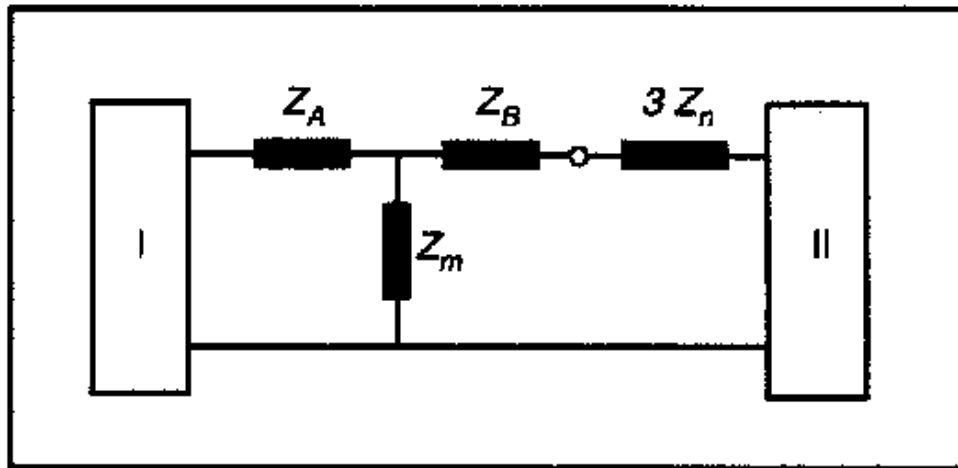


Fig. 10 - Transformador YNyn con impedancia de puesta a tierra del neutro – representación homopolar

4.3.2. Transformador YNyn o YNyn + d. Es una combinación de tres arrollamientos. Existe una configuración en estrella de elementos de impedancia en serie, en combinación con la impedancia magnetizante para la secuencia homopolar. En la figura 11, $Z_A + Z_C$ representa la impedancia de cortocircuito entre el arrollamiento A y el tercer arrollamiento C conectado en triángulo, a través de la cual puede circular la corriente homopolar (véase el apartado 4.5). Esta impedancia es la impedancia de entrada para la corriente homopolar partiendo de la red I hacia el arrollamiento A.

Igualmente, la impedancia para la corriente homopolar de la red II hacia el arrollamiento B es $Z_B + Z_C$.

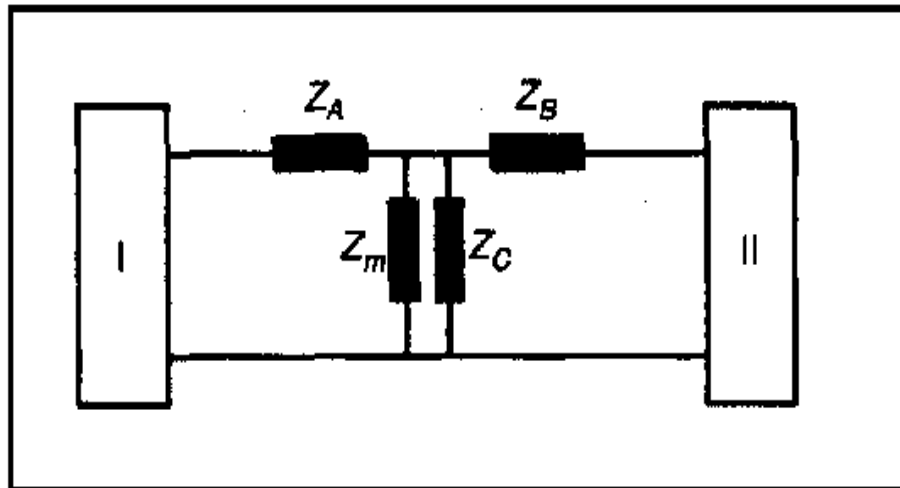


Fig. 11-Transformador YNynd – representación homopolar

La impedancia magnetizante Z_m que también se indica en la figura 11, es despreciada normalmente en los cálculos para esta combinación de arrollamientos. Se acepta que las impedancias homopolares del diagrama difieran ligeramente de los valores medidos con corriente de componente directa. La diferencia depende de la posición de unos arrollamientos con respecto a los otros y normalmente esta diferencia está comprendida entre un 10% y 15%.

4.4. IMPEDANCIA MAGNETIZANTE BAJO CONDICIONES ASIMÉTRICAS – TENSIÓN HOMOPOLAR Y GEOMETRÍA DEL CIRCUITO MAGNÉTICO

Por varias razones, se mantiene bastante bien la simetría de tensiones trifásicas en redes de transporte de energía bajo condiciones de servicio normales y no causa en general ningún problema para el funcionamiento del transformador.

Durante las faltas a tierra asimétricas en la red, el sistema de tensiones entre fase y tierra contiene una componente homopolar. El grado de asimetría depende del método de puesta a tierra de la red. La red se caracteriza por un factor de falta a tierra, el cual es definido como la relación entre la tensión alterna fase-tierra sin defecto durante la falta y la tensión simétrica entre fase-tierra antes de la falta. Esto es importante para la coordinación del aislamiento.

Si las columnas trifásicas de un transformador son sometidas a un sistema de tensiones inducidas que contiene una componente homopolar (donde la suma es

diferente de cero), entonces la reacción depende de la geometría del circuito magnético y de la conexión de los arrollamientos.

En un transformador con circuito magnético de tres columnas (véase la figura 12), las aportaciones de flujo desiguales provenientes de las tres columnas no se anulan en las culatas. Entonces, el flujo homopolar residual se cierra en el exterior del circuito magnético. Esto representa una fuerte reluctancia y una impedancia magnetizante débil para la tensión homopolar. Se da información cuantitativa en el apartado 4.3. El fenómeno de un flujo considerable que sale del circuito magnético y se cierra en el exterior también puede producirse durante las condiciones transitorias de maniobra.

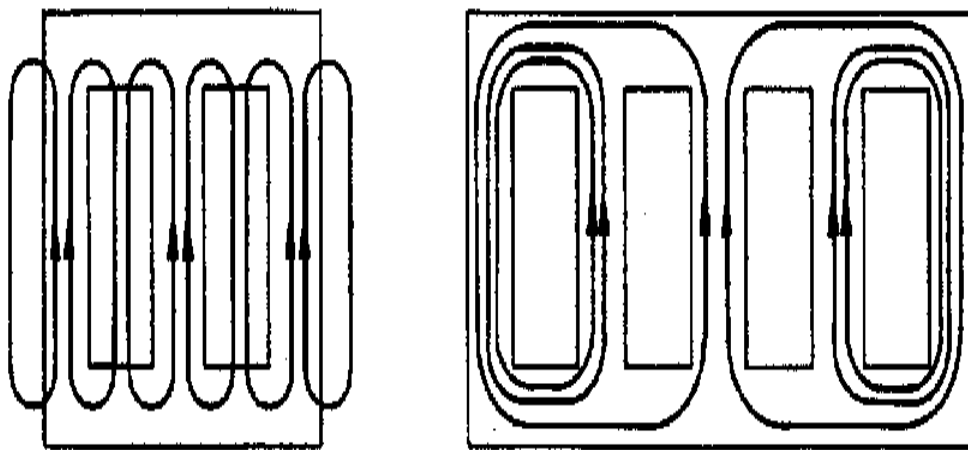


Fig. 12 – Magnetización homopolar de los núcleos de tres y cinco columnas

En un transformador con circuito magnético de cinco columnas (véase la figura 12), las columnas exteriores sin arrollamientos presentan un camino de retorno de baja reluctancia, donde el flujo homopolar puede circular. La impedancia magnetizante correspondiente es alta, como para un flujo de componente directa normal. Lo mismo se aplica para los transformadores trifásicos acorazados, y, por supuesto, para un banco de tres unidades monofásicas separadas.

Sin embargo, la tensión y la corriente homopolar aplicadas también son influenciadas por la conexión trifásica del arrollamiento; véanse los apartados siguientes.

4.5. COMPORTAMIENTO HOMOPOLAR Y ARROLLAMIENTOS CONECTADOS EN TRIÁNGULO

Las tensiones entre fases a través de un arrollamiento conectado en triángulo conducen automáticamente a una suma igual a cero debido a la conexión cerrada del triángulo. Alternativamente, un arrollamiento en triángulo puede ser visto como un cortocircuito en cuanto a componentes homopolares.

La corriente homopolar no puede ser intercambiada entre los tres bornes de un arrollamiento en triángulo y una red externa. Pero una corriente circulante de cortocircuito puede ser inducida desde otro arrollamiento con conexión YN (véase la figura 13). La impedancia homopolar del transformador, vista desde el otro arrollamiento, tiene el carácter de una impedancia de cortocircuito entre el otro arrollamiento y el arrollamiento en triángulo. Para más información, véase el apartado 4.3.

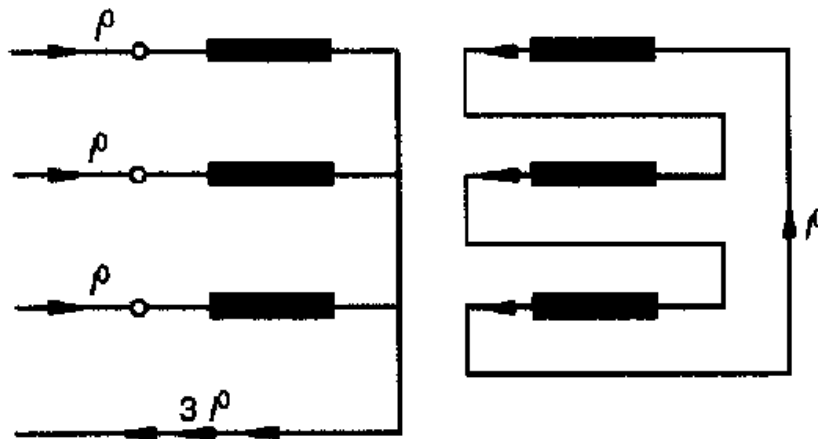


Fig. 13 – Corriente de cortocircuito homopolar inducida en un la arrollamiento conectado en triángulo

4.6. COMPORTAMIENTO HOMOPOLAR Y ARROLLAMIENTOS EN ZIGZAG

En un arrollamiento conectado en zigzag (véase la figura 14), cada columna del transformador lleva parte de arrollamientos de dos fases que tienen sentidos de arrollamiento opuestos. El número de amperios-vuelta de la corriente homopolar es anulado sobre cada columna sin que exista magnetización resultante. La corriente encuentra solo una baja impedancia de cortocircuito asociada con el flujo de dispersión entre las partes de los arrollamientos de la columna (véase también el apartado 4.7.3).

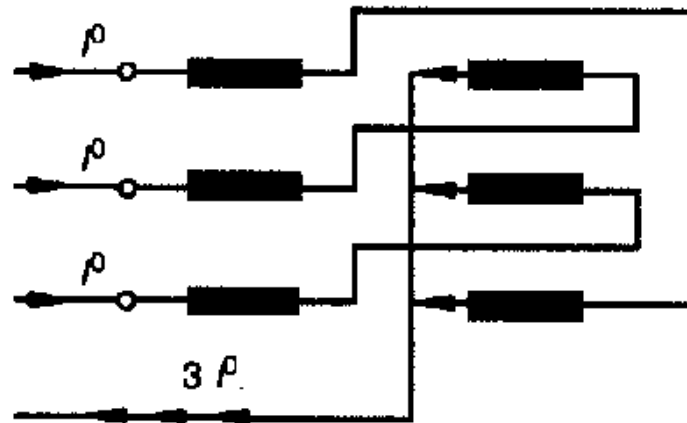


Fig. 14 – Arrollamiento conectado en zigzag equilibrado de manera inherente para la corriente homopolar

4.7. PROPIEDADES DE LAS IMPEDANCIAS HOMOPOLARES PARA DIFERENTES CONEXIONES DEL TRANSFORMADOR

En los apartados anteriores se han descrito las características homopolares de circuitos magnéticos específicos y de los arrollamientos individuales específicos de los transformadores. Este apartado resume las características homopolares de todos los transformadores que tienen combinaciones de arrollamientos habituales.

La tabla 1 indica los valores aproximados de las impedancias homopolares para combinaciones de dos y tres arrollamientos cuando cualquiera de ellos está excitado por una red. Esta tabla es válida para diseños con arrollamientos concéntricos, aquí numerados como (1) – (2) – (3), siendo (1) el arrollamiento más externo. Los símbolos de los arrollamientos en la primera columna están escritos en el mismo orden. No importa conocer cuál es el arrollamiento de alta tensión.

Los apartados siguientes proporcionan otros textos descriptivos.

En la tabla 1, el símbolo YN indica que el neutro del arrollamiento es conectado a tierra directamente o a través de una impedancia baja. El símbolo Y indica que el neutro no está conectado a tierra.

Los valores expresados en porcentaje, cuando se dan, se corresponden con la referencia habitual de impedancia U^2/S .

Algunas conexiones están marcadas con un asterisco (*). En estos casos, las corrientes homopolares en el arrollamiento excitado no están compensadas por

ninguna corriente en los otros arrollamientos. La impedancia homopolar es entonces una impedancia magnetizante de valor relativamente alto o muy alto, en función del circuito magnético.

En todos los demás casos, hay equilibrio de corrientes entre los arrollamientos, y la impedancia homopolar es igual, o muy próxima, a la impedancia de cortocircuito normal entre los arrollamientos considerados.

La tabla indica solamente la contribución del transformador por sí mismo. Las impedancias de redes asociadas son consideradas como despreciables.

Esto significa que, en la representación de los diagramas homopolares, un arrollamiento secundario YN se considera como que tiene sus tres fases cortocircuitadas a tierra.

4.7.1. YNyn o YNauto sin arrollamiento en triángulo. El transformador recibe y transmite la corriente homopolar entre las dos redes, si los neutros están conectados a tierra. Entonces se presenta una impedancia de cortocircuito normal para esa corriente.

Si el neutro de un autotransformador no está conectado a tierra, la transferencia de corriente homopolar es todavía posible, pero con una impedancia diferente.

Si no es posible una transferencia de corriente homopolar proveniente de una red a otra opuesta, entonces el transformador presentará una impedancia magnetizante para esa corriente. Esta impedancia magnetizante es muy elevada en transformadores con núcleos de cinco (5) columnas, en los transformadores tipo acorazados y también en un banco de tres transformadores monofásicos.

Tabla 1 Impedancias homopolares, valores típicos

Símbolo del arrollamiento			Impedancia (%)						Apartados
			Arrollamiento excitado, circuito magnético de tres columnas			Arrollamiento excitado, circuito magnético de cinco columnas o acorazado			
(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	
YN	Y	*	≈ 50	-		$\approx 10^4$	-		4.3, 4.4
Y	YN	*	-	≈ 60		-	$\approx 10^4$		4.3, 4.4
YN	YN		$a_1 z_{12}$	$a_2 z_{12}$		z_{12}	z_{12}		4.7.1
YN	D		$a_1 z_{12}$	-		z_{12}	-		4.7.2
D	YN		-	$a_2 z_{12}$		-			4.7.2
YN	Y	Y*	≈ 50	-	-	$\approx 10^4$	-	-	4.3, 4.4
Y	YN	Y*	-	≈ 60	-	-	$\approx 10^4$	-	4.3, 4.4
Y	Y	YN*	-	-	≈ 70	-	-	$\approx 10^4$	4.3, 4.4
YN	YN	Y	$a_1 z_{12}$	$a_2 z_{12}$	-	z_{12}	z_{12}	-	4.7.1
YN	Y	YN		-	$a_3 z_{13}$	z_{13}	-	z_{13}	4.7.1
Y	YN	YN	-		$a_3 z_{23}$	-	z_{23}	z_{23}	4.7.1
YN	YN	D	$a_1(z_1+z_2R_{23})$	$a_2(z_2+z_1R_{23})$	-	$z_1+z_2R_{23}$	$z_2+z_1R_{23}$	-	4.7.2
YN	D	D	$a_1(z_1+z_2R_{23})$	-	-	$z_1+z_2R_{23}$	-	-	4.7.2
YN	Y	D		-	-	z_{13}	-	-	4.7.2
D	YN	YN	-	$a_2(z_2+z_1R_{23})$	$a_3(z_3+z_1R_{21})$	-	$z_2+z_1R_{23}$	$z_3+z_1R_{21}$	4.7.2
D	YN	Y	-	$a_2 z_{12}$	-	-	z_{12}	-	4.7.2
D	Y	YN	-	-	$a_3 z_{13}$	-	-	z_{13}	4.7.2
D	YN	D	-	$a_2(z_2+z_1R_{23})$	-	-	$z_2+z_1R_{23}$	-	4.7.2

NOTAS

1 z_{12} , z_{13} y z_{23} son las impedancias de secuencia directa de cortocircuito.

2 $z_1 = \frac{z_{12} + z_{13} - z_{23}}{2}$, igualmente para z_2 y z_3 .

3 $z_1 \parallel z_2 = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}$ igualmente para $z_1 \parallel z_3$, $z_2 \parallel z_3$.

4 a_1 , a_2 y a_3 son factores multiplicadores comprendidos en el rango $0,8 < a_i < a_j < 1$.

5 Los aspectos particulares de las propiedades de las impedancias homopolares se dan en los apartados 4.7.1, 4.7.2 y 4.7.3.

6 Las conexiones marcadas con un asterisco (*) indican casos donde la impedancia homopolar es una impedancia magnetizante de valor relativamente alto o muy alto, dependiendo de la naturaleza del circuito magnético.

4.7.2. YNd o Dyn o YNynd o YNyn + d (arrollamiento de estabilización). El transformador presenta una impedancia baja (carácter de impedancia de cortocircuito) para la corriente homopolar proveniente de un sistema conectado a tierra hacia un arrollamiento en estrella yn. La circulación de corriente a lo largo del arrollamiento en triángulo permite compensar los amperios vuelta (véase la figura 15).

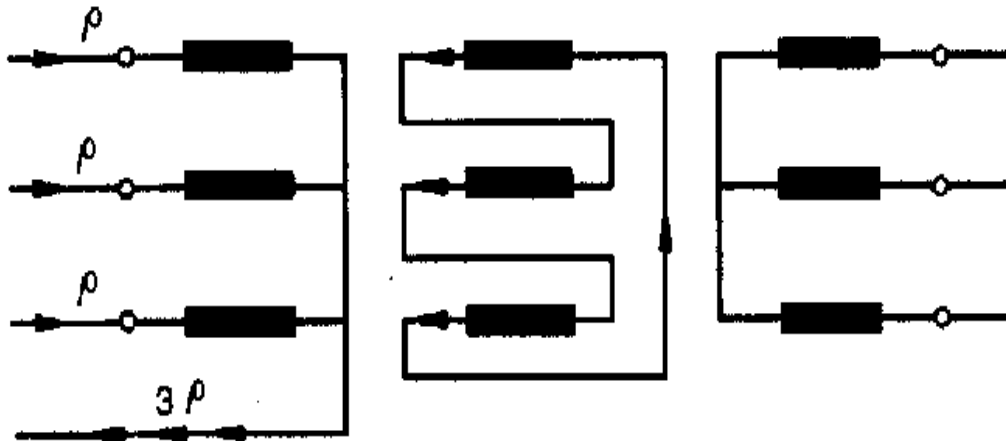


Fig. 15 – Función de un arrollamiento de estabilización

Es por esta razón, que un arrollamiento de estabilización suplementario acoplado en triángulo en un transformador Yy (o en un banco de tres transformadores monofásicos) sirve para reducir la impedancia homopolar de la red conectada y por eso su factor de defecto a tierra (véase el apartado 4.4). Una consecuencia es que la corriente de falta a tierra prevista aumente.

Es importante asegurar que la capacidad de soportar cortocircuitos de un arrollamiento terciario en triángulo o de un arrollamiento de estabilización sea suficiente para la corriente homopolar inducida máxima durante una falta a tierra en cualquiera de las redes conectadas. Alternativamente, se pueden conectar reactancias limitadoras de corriente dentro del triángulo con el fin de reducir la corriente de falta inducida a un valor aceptable.

4.7.3. Yzn o ZNy. El transformador presenta impedancia baja (característica de una impedancia de cortocircuito) para la corriente homopolar proveniente de una red Z. Hay un equilibrio de amperios-vuelta inherente a la corriente homopolar en el interior del propio arrollamiento en zigzag (Z).

Esta es la razón por la cual un transformador dotado de un arrollamiento ZN es utilizado para suministrar punto neutro para la conexión de una impedancia de puesta

a tierra del neutro a un sistema cuando el arrollamiento del transformador principal es un arrollamiento en triángulo. Se hace referencia al transformador conectado en zigzag (Z) bajo el nombre de “transformador de puesta a tierra” o de “bobina de inductancia trifásica de puesta a tierra”; véase la sección 6 de la Norma CEI 60289. La misma función puede obtenerse con una combinación de arrollamientos YNd en el transformador de puesta a tierra.

Si el lado en estrella tiene su neutro conectado a tierra (YNzn), el transformador presenta una impedancia magnetizante en homopolar a partir de ese lado, que es aproximadamente igual que la YNyn anteriormente descrita. El arrollamiento en zigzag que es equilibrado de manera inherente para la corriente homopolar, no puede proporcionar unos amperios- vuelta de compensación para la corriente homopolar en el arrollamiento en estrella opuesto.

4.8. APLICACIÓN DE UNA CARGA HOMOPOLAR CONTINUA (CORRIENTE DE NEUTRO)

Una carga monofásica sobre un transformador trifásico puede ser aplicada bien entre las fases o bien entre una fase y el neutro.

En el primer caso, el sistema de corrientes sobre el primario y el secundario contiene unas componentes directa e inversa, pero no una componente homopolar. La distribución de las corrientes de fase en el lado del primario del transformador depende de la conexión trifásica. No es posible convertir una carga monofásica en simétrica trifásica en el primario mediante una conexión especial del transformador. La carga permitida se refiere a la corriente asignada a los arrollamientos respectivos.

Si la carga está conectada entre fase y neutro del transformador, pueden existir otras restricciones que las dadas por la corriente asignada del arrollamiento. El apartado 8.1 de la Norma CEI 60076-1 requiere que el borne del neutro sea dimensionado siempre para la corriente de falta a tierra y para una corriente de carga en régimen permanente a través del neutro cuando ésta es especificada (es una condición normal para los transformadores de distribución). Se prescribe en el anexo A de la Norma CEI 60076-1 que cualquier solicitud deberá contener información relativa a:

- el método de operación previsto de la red a la cual los arrollamientos del transformador serán conectados, particularmente cuando se especifica un arrollamiento de estabilización;
- cualquier carga no equilibrada prevista.

En línea con lo descrito en los apartados anteriores, un neutro de un arrollamiento secundario puede cargarse en general en régimen permanente como se indica a continuación, en función de las conexiones de los arrollamientos, del diseño del circuito magnético y de la puesta a tierra de la red:

- el neutro del transformador Dyn puede ser cargado con la corriente asignada del arrollamiento;
- un transformador YNyn con los dos neutros puestos a tierra puede ser cargado con la corriente asignada a través de los neutros, suponiendo que la puesta a tierra de la red lo permita (con respecto al desequilibrio de tensiones);
- el neutro de un arrollamiento conectado en zigzag (Z) puede cargarse con la corriente asignada;
- un transformador Yyn + d (transformador suministrado con un arrollamiento de estabilización) puede tener su borne de neutro del secundario cargado con una corriente de valor máximo equivalente a la corriente asignada, siempre que el arrollamiento conectado en triángulo tenga una potencia asignada al menos igual a la tercera parte de la potencia asignada al arrollamiento del secundario. (La corriente de circulación por fase del arrollamiento terciario equilibra la corriente homopolar en el arrollamiento secundario, la cual es, por definición, un tercio de la corriente del neutro);
- en un transformador Yynd con un terciario disponiendo de una capacidad de carga, este terciario funcionará de la misma manera que un arrollamiento de estabilización (véase el caso anterior). Cualquier corriente circulante en el arrollamiento conectado en triángulo se combinará con la corriente de carga externa de ese arrollamiento. (La corriente total puede medirse si hay transformadores de corriente dentro de la conexión en triángulo en el transformador);

- un transformador Yyn sin arrollamiento en triángulo adicional no proporciona un equilibrio definido en las tensiones de fase. (Este caso presupone que el neutro del primario no está puesto a tierra).
- un transformador de distribución con un circuito magnético de tres columnas conectado en Yyn no está en general adaptado para la aplicación de una carga entre fase y neutro. El desequilibrio de tensión puede no ser aceptable, si el neutro lleva más de un 10% de la corriente asignada al arrollamiento. Por consiguiente, se prefieren conexiones mixtas, Dyn o Yzn, para los transformadores de distribución que alimentan redes de cuatro hilos;
- un transformador de tamaño y tensión medios con esta conexión puede llevar aproximadamente el 25% de la corriente asignada durante un período de 2 h hacia una bobina de extinción de arco, además de carga equilibrada plena, sin riesgo térmico. Conviene, sin embargo, que tales requisitos sean confirmados específicamente.

4.9. RELUCTANCIA E IMPEDANCIA MAGNETIZANTE DE UN CIRCUITO MAGNÉTICO, SATURACIÓN EN RÉGIMEN PERMANENTE BAJO TENSIÓN A FRECUENCIA INDUSTRIAL ANORMALMENTE ELEVADA

Un esquema unifilar equivalente de un transformador de potencia contiene un elemento de derivación que representa la corriente de excitación del circuito magnético. En servicio normal, esta corriente es muy baja y despreciable, por ejemplo, para los cálculos de caída de tensión, lo cual justifica el modelo del circuito equivalente (véase el capítulo 7). En otras palabras, la inductancia magnetizante es muy elevada. En términos de características de magnetización, la reluctancia que el flujo magnético encuentra es muy baja, es decir, que el camino del flujo principal es fácilmente magnetizado.

Si una tensión a frecuencia industrial aplicada sobre los arrollamientos de cualquier columna del transformador es anormalmente elevada, el material del núcleo se saturará durante parte de cada semiciclo. Durante las condiciones de saturación, la reluctancia magnética aumenta considerablemente. Una corriente de cresta magnetizante severamente aumentada es absorbida de la fuente de energía.

Durante los fenómenos de saturación del núcleo, hay también una inducción considerable fuera del núcleo, entre el núcleo y el arrollamiento. Esto puede inducir corrientes parásitas (de Foucault) elevadas en las partes metálicas exteriores a los arrollamientos, produciendo un calentamiento local y descargas por contactos involuntarios.

Un fenómeno que puede dar lugar a una saturación local en el transformador es el flujo magnético de dispersión excesivo que se produce durante el paso de una fuerte corriente de sobrecarga. El flujo de dispersión circula entre los arrollamientos, y una parte de este flujo retorna a través del circuito magnético. Además, es probable que en estas condiciones, la tensión de servicio sea igualmente anormal. El resultado combinado puede abocar a fenómenos de saturación imprevistos en ciertas partes del núcleo.

4.10. SATURACIÓN TRANSITORIA, CORRIENTE DE CONEXIÓN

Cuando un transformador es energizado repentinamente con plena tensión de la red, puede producirse un fenómeno de saturación aleatorio, que se denomina habitualmente “corriente de conexión” (véase la figura 16).

En régimen permanente, la integral voltios-tiempo de un semiciclo completo de tensión unidireccional entre dos pasos por cero, aplicada a través de una fase del arrollamiento, corresponde al flujo oscilante desde inducción plena en una dirección hasta plena inducción en la otra dirección.

Inmediatamente después de la energización, sin embargo, se produce un transitorio de perturbación. Dependiendo de la dirección de la remanencia existente en el circuito magnético y del punto de la onda en el que se aplica la tensión, la inducción de flujo transitoria puede alcanzar el límite de saturación del núcleo y puede elevarse por encima de ese valor, antes de que la tensión aplicada cambie de signo. La amplitud de la corriente magnetizante transitoria puede alcanzar cualquier valor de cresta hasta un máximo que puede ser más alto que la corriente asignada y que se aproxima a la corriente de cortocircuito de falta del transformador.

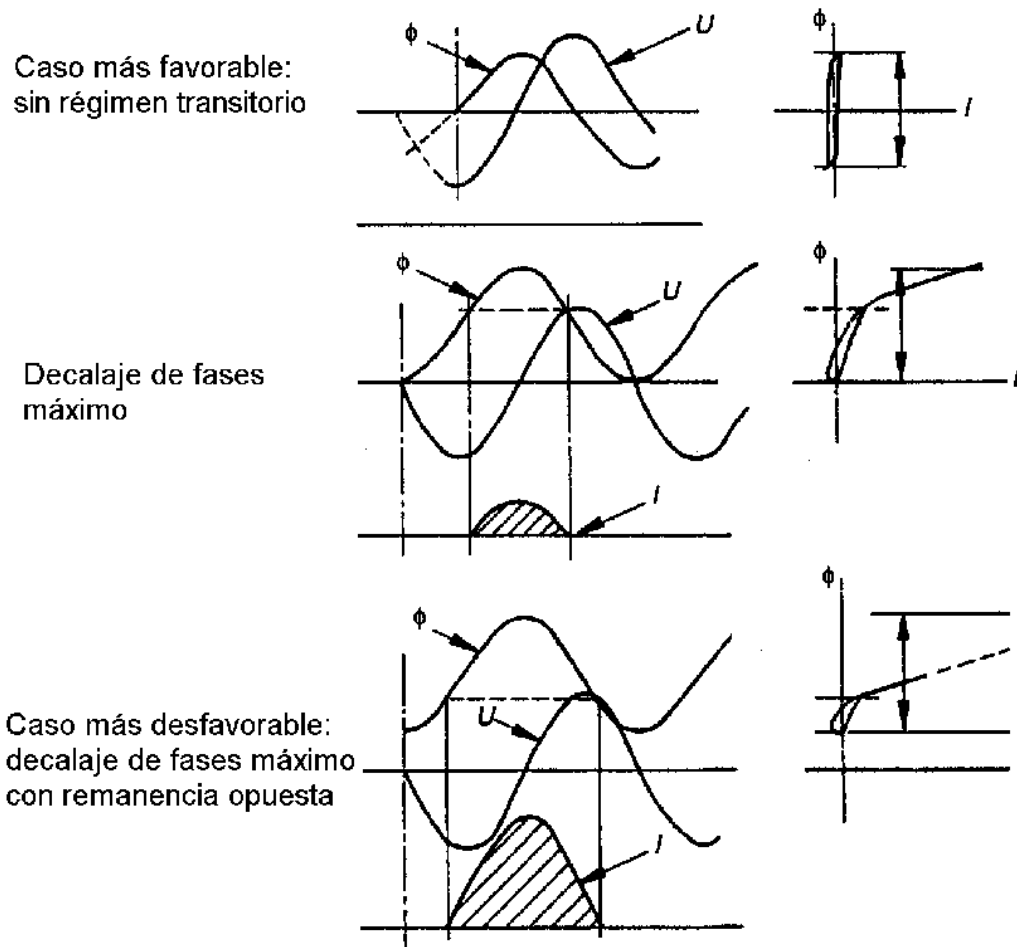


Fig. 16 – Transitorios de conexión

A partir de la descripción del fenómeno, es evidente que se trata de un fenómeno aleatorio que no se produce más que de vez en cuando en varias conexiones. La corriente de conexión de la red aparece con amplitud diferente en diferentes fases. Cuando un arrollamiento conectado en triángulo o en estrella con neutro puesto a tierra es energizado, el fenómeno está ligado a la columna individual mientras, en un arrollamiento en estrella sin neutro puesto a tierra, inicialmente está implicada una combinación de los arrollamientos en serie.

Cuando se presenta una elevada corriente de conexión, está siempre decalada y aparece con amplitudes altas de una polaridad solamente. La corriente de conexión por consiguiente contiene una componente continua que decrece en menos de 1 segundo. El tiempo de decrecimiento es más largo para transformadores que tienen una chapa magnética con pérdidas bajas y tiende a ser superior para los transformadores grandes. Esta componente de corriente continua y los armónicos de rango elevado de la corriente son importantes respecto a los relés de los circuitos de

protección. También pueden causar efectos de saturación en un transformador previamente energizado con el que está conectado en paralelo el transformador que se energiza. El fenómeno es acompañado por un sonido muy fuerte durante varios segundos o incluso minutos, antes de que el zumbido del transformador recupere la normalidad.

El valor extremo probable de corriente de conexión, expresado en múltiplos de la corriente asignada, depende de la inducción de flujo de servicio seleccionada en el diseño del transformador. Se encuentran valores más elevados con las actuales chapas magnéticas que las del pasado. La configuración de los arrollamientos también es importante, por ejemplo, si un arrollamiento interno o externo de un par concéntrico de arrollamientos es conectado en tensión. Un arrollamiento exterior tiene una inductancia aire-núcleo más elevada y absorberá de la red una corriente de conexión inferior.

4.11. CORRIENTE GEOMAGNÉTICA INDUCIDA Y CORRIENTES PARÁSITAS PROVENIENTES DE SISTEMAS DE CORRIENTE CONTINUA

Un sistema de alta tensión de corriente alterna que es puesto a tierra a través de los neutros del transformador presenta un circuito de baja resistencia para la corriente continua o casi continua que circula en la superficie de la tierra.

Las corrientes geomagnéticas inducidas existen principalmente en zonas templadas de la tierra con suelos de grava y alta resistividad. Aparecen como impulsos que varían lentamente (varios minutos) con una amplitud del orden de decenas de amperios en los neutros de los transformadores.

Las corrientes parásitas son corrientes de retorno a tierra de las redes de tracción de corriente continua, sistemas de protección catódica, etc. Pueden alcanzar amplitudes de algunos amperios en el neutro.

Cuando un transformador está sometido a tal corriente continua en el neutro, implica una magnetización de corriente continua en el circuito magnético. La corriente magnetizante pasa a ser fuertemente asimétrica hasta un valor que compensará la corriente continua impuesta. También tiene un alto contenido de armónicos. Estas componentes en corrientes continuas tienen diversas consecuencias.

- El nivel de ruido del transformador aumentará significativamente.
- Los armónicos de corriente pueden causar fallos de actuación y falsos disparos de relés.
- Los armónicos pueden causar sobrecalentamientos considerables debidos a los flujos de dispersión.

La severidad de los fenómenos depende de la capacidad de la corriente continua para magnetizar el circuito magnético y del diseño del mismo.

3.3. RESUMEN NORMA AMERICANA IEEE C57 12 90

3.3.1. ENSAYOS DE SECUENCIA HOMOPOLAR RECOMENDADOS POR LA NORMATIVA AMERICANA

El Standard IEEE C57.12.90 [IEE10] en su apartado 9.5 recoge los ensayos de impedancia de secuencia homopolar que se deben realizar en transformadores trifásicos. El Std IEEE especifica que la tensión y corriente en el ensayo se establecerán del siguiente modo:

- Si el transformador no dispone de conexión en triángulo en alguno de sus arrollamientos, la tensión aplicada no deberá exceder el 30% de la tensión de línea nominal del arrollamiento que esté siendo energizado y la corriente de fase no podrá sobrepasar su valor nominal.
- Si el transformador dispone de conexión en triángulo, la tensión aplicada deberá ser tal que no se sobrepase la corriente de fase nominal de cualquiera de los arrollamientos conectados en triángulo.

A continuación, se describen varios tipos de conexiones de transformadores. Los transformadores que dispongan de conexiones no mencionadas aquí, se ensayarán según determinen las personas responsables del diseño y aplicación del mismo.

3.3.2. TRANSFORMADORES CON UN SOLO NEUTRO EXTERNO ACCESIBLE (EXCEPTO TRANSFORMADORES EN CONEXIÓN ZIGZAG)

El circuito equivalente ante secuencia homopolar para transformadores de este tipo se muestra en la figura 3.1. El arrollamiento 1 tiene el neutro accesible, mientras que los arrollamientos 2, 3 y n no.

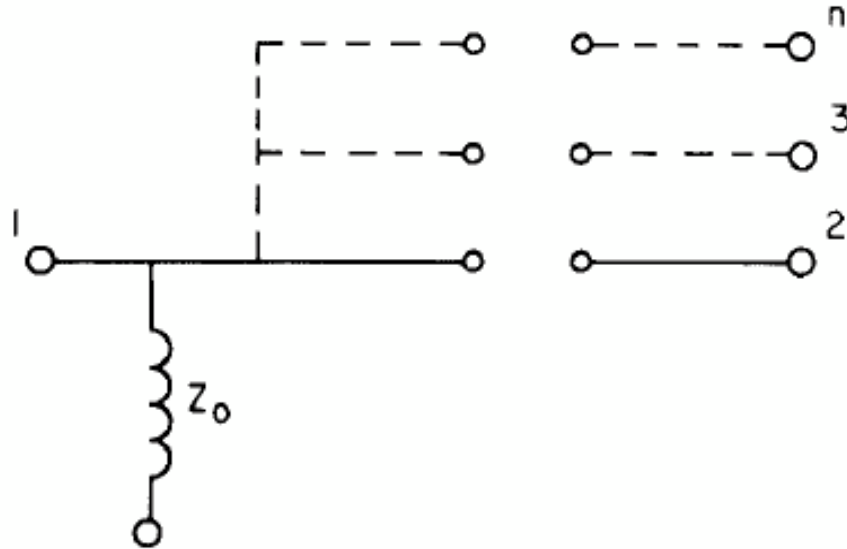


Figura 3.1. Circuito equivalente ante secuencia homopolar para transformadores con un solo neutro accesible.

Se realizará un ensayo de secuencia homopolar en el arrollamiento con el neutro accesible, aplicando una tensión monofásica entre los tres terminales de línea conectados entre sí y el neutro. Los terminales del resto de arrollamientos podrán estar en circuito abierto o cortocircuitados y a tierra.

3.3.3. TRANSFORMADORES CON DOS NEUTROS EXTERNOS ACCESIBLES (EXCEPTO TRANSFORMADORES EN CONEXIÓN ZIGZAG)

La figura 3.2. muestra el circuito equivalente ante secuencia homopolar para este tipo de transformadores. Los arrollamientos 1 y 2 tienen neutro accesible mientras que los arrollamientos 3, 4 y sucesivos no.

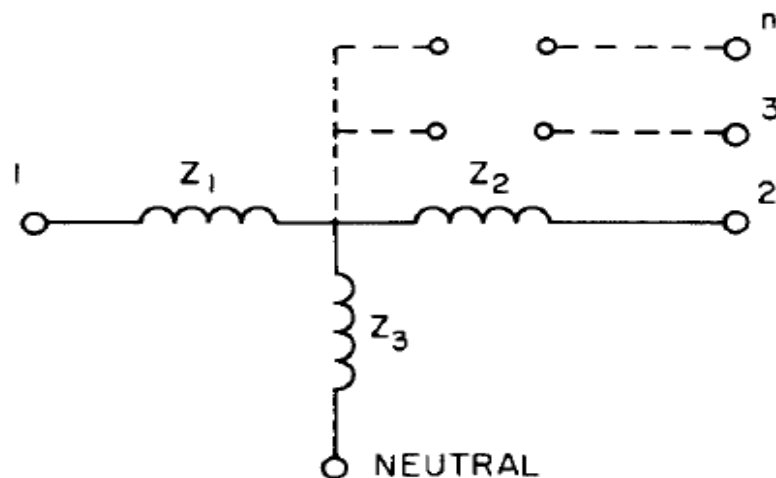


Figura 3.2. Circuito equivalente ante secuencia homopolar para transformadores con dos neutros accesibles

Para determinar el circuito equivalente ante secuencia homopolar se realizarán cuatro ensayos, resultando uno de ellos redundante.

Ensayo 1. Aplicar una tensión monofásica al arrollamiento 1 entre los terminales de línea conectados entre sí y el neutro, dejando el resto de los arrollamientos a circuito abierto. La impedancia de secuencia homopolar medida es representada por Z_{1N0} .

Ensayo 2. Aplicar una tensión monofásica al arrollamiento 1 entre los terminales de línea conectados entre sí y su neutro. El arrollamiento 2 estará cortocircuitado entre los terminales de línea y su neutro, y el resto de arrollamientos pueden estar cortocircuitados o a circuito abierto. La impedancia de secuencia homopolar medida es representada por Z_{1Ns} .

Ensayo 3. Aplicar una tensión monofásica al arrollamiento 2 entre los terminales de línea conectados entre sí y el neutro, permaneciendo el resto de los arrollamientos a circuito abierto. La impedancia de secuencia homopolar medida es representada por Z_{2N0} .

Ensayo 4. Aplicar una tensión monofásica al arrollamiento 2 entre los terminales de línea conectados entre sí y su neutro. Se cortocircuitan los terminales de línea y el neutro del arrollamiento 1 mientras que el resto de arrollamientos se dejan a circuito abierto o se cortocircuitan. La impedancia de secuencia homopolar medida es representada por Z_{2Ns} .

Como indica la norma, el ensayo 4 es redundante respecto del ensayo 2 y su realización no es necesaria; sin embargo, si se lleva a cabo, puede ser usado como comprobación.

$$Z_3 = +\sqrt{Z_{2N0}(Z_{1N0} - Z_{1Ns})} = +\sqrt{Z_{1N0}(Z_{2N0} - Z_{2Ns})} \quad (\text{Fórmula 3.1.})$$

$$Z_2 = Z_{2N0} - Z_3 \quad (\text{Fórmula 3.2.})$$

$$Z_1 = Z_{1N0} - Z_3 \quad (\text{Fórmula 3.3.})$$

El signo + que aparece antes del radical en la ecuación (Fórmula 3.1.) es apropiado para los casos más habituales en los que los arrollamientos 1 y 2 están físicamente adyacentes en el diseño, y no se interpone un arrollamiento en triángulo (3, 4, etc.) entre ellos. Sin embargo, un signo menos puede ser apropiado para aquellos casos en los que un arrollamiento conectado en triángulo (3 ó 4) esté físicamente localizado entre los arrollamientos 1 y 2. Para comprobar si el signo es correcto se deben comparar los resultados con los cálculos durante el diseño.

Cuando Z_{1N} y Z_{2N0} son muy elevados, entonces Z_3 también se aproximará a infinito, y el circuito equivalente queda como se muestra en la figura 3.3.

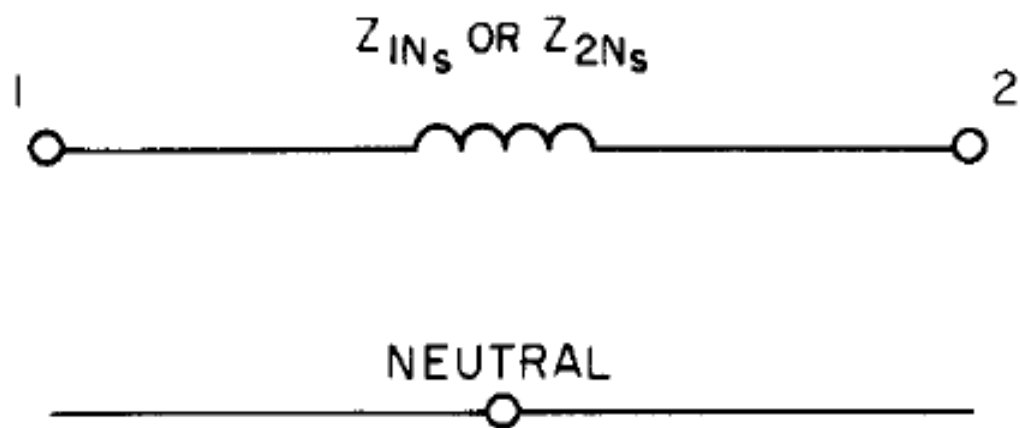


Figura 3.3. Circuito equivalente ante secuencia homopolar para transformadores con dos neutros externos disponibles si Z_{1N0} y Z_{2N0} se aproximan a infinito

Para el caso de los transformadores conectados en estrella-estrella, la impedancia de secuencia homopolar es, en general, una función no lineal de la tensión aplicada, que a su vez puede requerir más de un conjunto de mediciones para caracterizar el comportamiento no lineal.

Lo visto es aplicable al caso de autotransformadores.

El mencionado Std también describe la forma de proceder para el caso de transformadores con un arrollamiento en zigzag, pero no se incluye aquí por no ser de interés para los transformadores utilizados en España.

3.4. RESUMEN DEL ARTICULO DE INVESTIGACIÓN DE JIALONG WANG

TITULO: Zero Sequence Circuit of Three-legged Core Type Transformers

3.4.1. INTRODUCCIÓN

Estimación actual de una avería es esencial en el desarrollo de un esquema de protección adecuado y el establecimiento de los elementos de protección. Circuitos de secuencia positiva, negativa y cero se han desarrollado y utilizado ampliamente en el cálculo de faltas.

En la mayoría de la literatura, los circuitos de secuencia equivalente son aproximados debido a la omisión de la resistencia interna del transformador y la impedancia magnetizante. Rara vez hay ningún problema con la negligencia de la pequeña resistencia interna del transformador en casi todos los cálculos de falla. En situaciones prácticas, es una muy buena aproximación para excluir la gran impedancia de magnetización en positivo y circuitos equivalentes de secuencia negativa. Sin embargo, puede ser necesario un circuito de secuencia cero más preciso, dependiendo tanto de la estructura de núcleo del transformador y las conexiones del bobinado.

En este trabajo se introducirá el tipo de núcleo y estructuras de núcleo de tipo concha y sus trayectorias de flujo magnético.

La impedancia de magnetización es pequeño cuando el núcleo se satura y debe ser incluido en el circuito de secuencia cero en los dos casos siguientes:

- Tipo de núcleo de transformador de tres columnas. No hay un camino de retorno físico a la horquilla inferior del núcleo, y el flujo de secuencia cero tiene que pasar por la alta reluctancia magnética a través del espacio de aire, acero estructural y el tanque. La impedancia magnética, que es inversamente proporcional a la reluctancia magnética, está típicamente en el rango entre 40% y 150%.
- Tipo de núcleo de transformador de cuatro o cinco columnas. La columna lateral de la base generalmente se dimensiona para llevar el flujo de una fase. Cuando el voltaje de secuencia cero se acerca 33% de la tensión nominal o superior, el núcleo comienza a saturar y la impedancia magnética cae dramáticamente.

Tal como se recoge en el estándar IEEE C57.105-1978, la conexión en Y-YG no se recomienda para transformadores trifásicos. Conexión Y-YG es incapaz de proporcionar un estabilizado neutral, y su uso puede resultar en la sobretensión de fase a neutro en uno o dos columnas como resultado de la carga desequilibrada de fase a neutro. Aunque no se ve comúnmente, existen legado o nuevas instalaciones de transformadores Y-YG. El análisis de condición de desequilibrio en el transformador Y-YG no es fácilmente accesible en libros de referencia de uso común. En este trabajo se recopila información sobre la estructura del núcleo del transformador y el análisis de los transformadores de tipo de núcleo de tres columnas. Con el fin de estudiar el transformador Y-YG en la condición desequilibrada, se desarrollará circuito de secuencia cero para conexiones de los transformadores trifásicos comunes. Por un lado de la carga de falla línea a tierra de un transformador tipo de núcleo de tres columnas, la corriente de defecto se puede calcular, o al menos estimar, si la impedancia de secuencia cero de magnetización exacta no se conoce. Para verificar el circuito de secuencia cero desarrollado y la corriente de fallo calculado a partir de ella, una falla de alta impedancia tendrá lugar en el lado de tierra de un transformador de Y-YG trifásico, con el neutro conectado a tierra secundario a través de un resistor. Una simulación de ordenador también se puede utilizar para verificar el cálculo de modo de corriente de defecto para otras situaciones puede ser estimada sin cálculo matemático o la prueba real.

3.4.2. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE DOS DEVANADOS

Para un transformador monofásico de dos devanados, el circuito equivalente se da en la Figura 3.4. R_H y R_L son resistencias de los arrollamientos primario y secundario respectivamente. X_H y X_L son reactancias de fuga de los arrollamientos primario y secundario respectivamente. R_c representa ninguna pérdida de carga (o núcleo) debido al ciclo de histéresis magnética y por corrientes de Foucault. X_M representa la reactancia de magnetización, que varía con el nivel de saturación del núcleo.

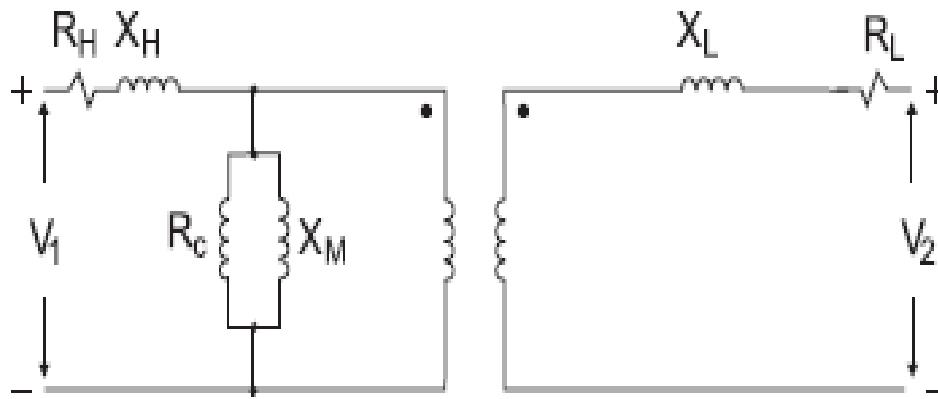


Figura 3.4. Circuito equivalente transformador de dos devanados

Cuando un transformador es en condiciones normales, la reactancia de magnetización es típicamente de al menos el 50 por unidad de valor. R_c es normalmente muy grande por diseño para reducir pérdidas en vacío. Dejar

$$Z_H = R_H + jX_H$$

$$Z_L = R_L + jX_L$$

$$Z_M = R_c + jX_M$$

Z_L puede ser convertido a un valor del lado primario Z_L' por el cuadrado de la relación de transformación. Figura 3.5. ilustra un circuito equivalente simplificado de un transformador monofásico. Por simplicidad, Z_L' se sustituye por Z_L en la figura 3.5. Desde Z_M es mucho mayor en comparación con Z_H y Z_L , Z_M se omite a menudo. Con Z_M se omite, Z_H y Z_L se pueden combinar para ser una impedancia, es decir, $Z = Z_H + Z_L$. Un circuito equivalente más sencillo se da en la Figura 3.6.

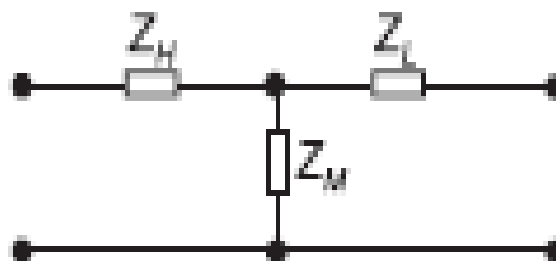


Figura 3.5. Simplificación equivalente transformador monofásico

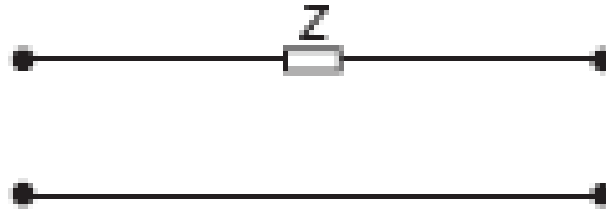


Figura 3.6. Circuito equivalente de transformador monofásico despreciando Z_m

Para un transformador trifásico, de secuencia positiva, negativa y secuencia de redes de secuencia cero son necesarios para el análisis de fallos. Figura 3.6. es bueno para las redes de secuencia positiva y negativa. La secuencia cero red suelen ser diferentes y dependen de la estructura núcleo del transformador y conexiones.

Para la mayoría de la estructura núcleo del transformador y conexiones, la impedancia magnetizante de secuencia cero es muy grande, por lo que el circuito equivalente de secuencia cero se puede considerar un circuito abierto.

Bajo este supuesto, los circuitos equivalentes de secuencia cero se dan en la Figura 3.7. Y sólida a tierra no aparece en la figura 3.7., ya que es un caso especial de la impedancia de puesta a tierra Y con impedancia cero.

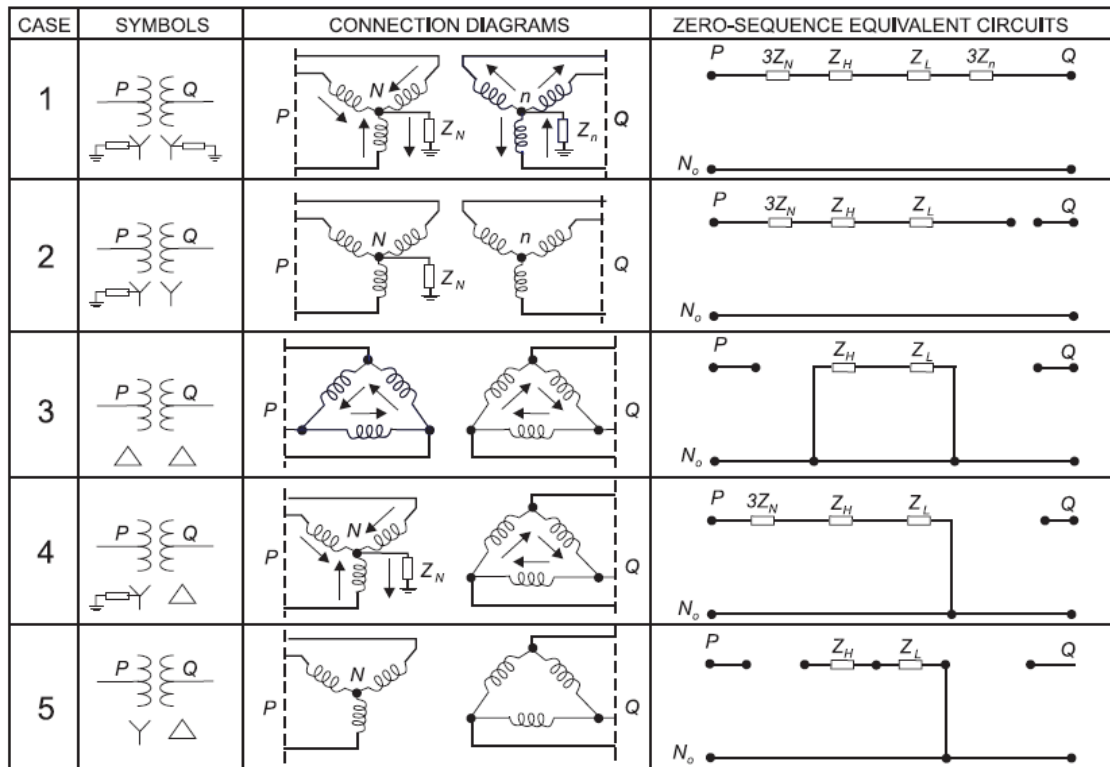


Figura 3.7. Circuito equivalente del transformador ante la secuencia cero considerando infinita Z_M

La omisión de la impedancia de magnetización Z_M es una buena aproximación en la mayoría de los casos, a menos que el núcleo está saturado. Si hay una impedancia de puesta a tierra en una Y es un devanado conectado, la impedancia de puesta a tierra no afecta al circuito de secuencia positiva o negativa ya que la corriente que fluye en la impedancia de puesta a tierra sólo contiene la componente de la secuencia cero.

Para un transformador Y-YG, ya que no hay camino de secuencia cero en el Caso 2 en la Figura 3.7., no habría corriente de secuencia cero. Sin embargo, esta conclusión no puede ser cierto para un tipo de núcleo de tres columnas transformador Y-YG. Como se describe en una sección anterior, para un transformador del tipo de núcleo de tres columnas, la impedancia de secuencia cero es relativamente pequeña y la rama de magnetización no puede ser considerada como un circuito abierto. La impedancia de magnetización bajo de secuencia cero requiere una modificación en el circuito de secuencia cero dados en la Figura 3.7. para Y-YG y YG-YG conectados transformadores de tipo de núcleo de tres columnas.

El circuito equivalente de un transformador de fase se da en la Figura 3.5., también representa el circuito de secuencia cero de un transformador trifásico YG-YG

tres sólidamente conectado a tierra. Para un caso más general de una conexión YG-YG, la impedancia de puesta a tierra se puede combinar con la impedancia de la resistencia y las fugas de bobinado. Dado que la corriente de neutro que fluye en la impedancia de puesta a tierra es tres veces la corriente de secuencia cero, la impedancia de puesta a tierra debe ser multiplicada por tres en el circuito de secuencia cero. Para el diagrama de conexión en el Caso 1 en la Figura 3.7., el circuito de secuencia cero se da en la Figura 3.8., incluyendo el efecto de la impedancia de puesta a tierra.

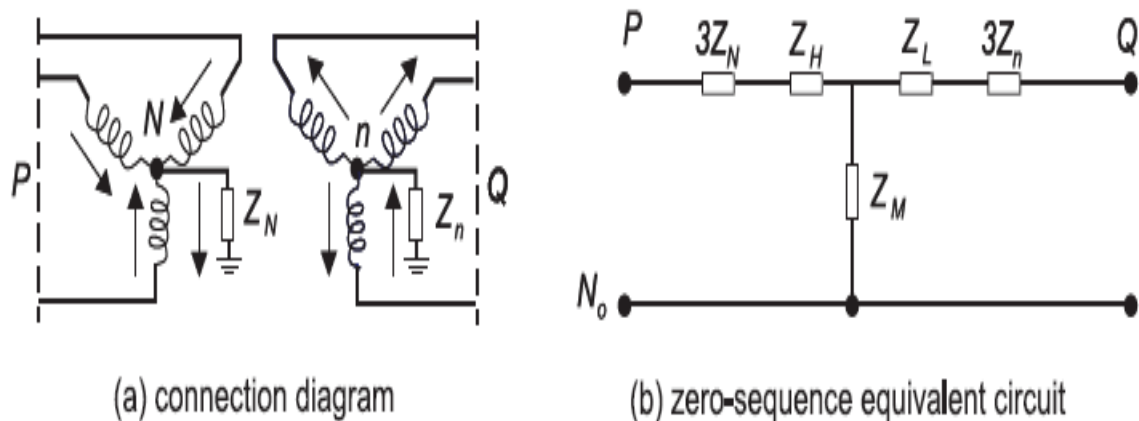


Figura 3.8. Circuito general de secuencia cero para transformadores YG-YG

Para una conexión YG-Delta, la corriente de secuencia cero puede circular libremente en el devanado del triángulo. Mientras que se refiere a la secuencia cero, el transformador actúa como si se cortocircuita si el bobinado está cargado o no. La conexión en triángulo suprime el flujo de secuencia cero, y que en realidad no importa si hay un camino de retorno de flujo o no. Esto explica que, para la conexión YG-Delta, el circuito de secuencia cero, básicamente es el mismo si el transformador es de tipo acorazado o no.

Incluyendo la impedancia magnetizante, los circuitos equivalentes de secuencia cero se dan en la Figura 3.9. para conexiones del bobinado comunes. Es de señalar que la impedancia de magnetización Z_M no está incluido en los circuitos equivalentes de secuencia cero cuando hay una delta conectados bobinado.

CASE	SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CIRCUITS
1			
2			
3			
4			
5			

Figura 3.9. Circuitos equivalentes de secuencia cero

Capítulo 4

DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS REALIZADOS

4.1. INTRODUCCIÓN.

El ensayo se ha llevado a cabo en los laboratorios docentes de la Universidad de Jaén, donde hemos tenido una serie de limitaciones a la hora de los ensayos, ya que para conseguir las tensiones adecuadas como la corriente de aplicación al transformador.

Unos de los problemas ha sido la falta de una fuente que nos proporcionara la corriente nominal del transformador, ya que los pupitres docentes disponibles en el laboratorio tienen una intensidad máxima de 8A, por otro lado lo conseguimos solucionar con la utilización de un transformador monofásico acoplado en serie a la fuente para multiplicar la salida de esta y poder subsanar dicho problema en el ensayo.

4.2. EQUIPOS UTILIZADOS PARA LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO.

Los equipos utilizados para el ensayo son los siguientes, en los cuales se detalla características como una fotografía del mismo:

4.2.1. FUENTE REGULABLE DE TENSION.



Figura 4.1. Fuente de alimentación 230 V- 8A regulable.

Para la alimentación de corriente fija y variable en CA y en CC, con el fin de llevar fácilmente a cabo todas las pruebas en un laboratorio de mediciones eléctricas. Viene completa de botones para encendido, apagado, de emergencia y de protección magnetotérmica diferencial. Conector para la protección de la máxima velocidad de los motores.

Tensiones de:

- variable de CA: 3 x 0 - 430 V, 5 A
3 x 0 - 240 V, 8 A
- fija de CA: 3 x 380 V + N, 16 A
3 x 220 V, 8 A
- variable de CC: 0 - 240 V, 10 A
0 - 225 V, 1 A
- fija de CC: 220 V, 10 A

Alimentación: 3 x 380 V + N, 50/60 Hz

Disponible también para tensión de alimentación de tres fases de 220 V.

4.2.2. EQUIPOS DE MEDIDA.

- Multímetro AMPROBE 33XR-A:



Utilizado para la medición de intensidades y tensiones. Con rango de tensión hasta 1000 V y rango de intensidad hasta 10 A.

Figura 4.2. Multímetro Amprobe 33 XR-A rango 1000V 10A en alterna

- Multímetro Fluke 41B:



Utilizado para para obtener en los ensayos el valor de intensidad, ya que los multímetros AMPROBE su rango solo es de 10 A y como consecuencia no se podía utilizar el multímetro descrito anteriormente, ya que nuestros registros de intensidad se contemplaban en el rango de 1 A hasta 25 A para ello se usaba este multímetro que cuenta con una pinza amperimetrica con un rango de intensidad de hasta 1000 A y mayor exactitud en las mediciones.

Figura 4.3. Multímetro Fluke 41B con pinza amperimetrica.

4.2.3. TRANSFORMADOR MONOFÁSICO AUXILIAR

CARACTERISTICAS TRANSFORMADOR MONOFASICO DIDACTICO TD11

	BOBINA NUMERO	PRINCIPIO	FINAL	TENSIÓN
PRIMARIO	1	P 1-1	P 1-2	110 v
	2	P 2-3	P 2-3	55 V
	3	P 3-5	P 3-6	25 V
	4	P 4-7	P 4-8	110 V
	5	P 5-9	P 5-10	55 V
	6	P 6-11	P 6-12	25 V
TOTAL	6 BOBINAS			380 V
SECUNDARIO	1	S 1-1	S 1-2	110 v
	2	S 2-3	S 2-3	55 V
	3	S 3-5	S 3-6	25 V
	4	S 4-7	S 4-8	110 V
	5	S 5-9	S 5-10	55 V
	6	S 6-11	S 6-12	25 V
TOTAL	6 BOBINAS			380 V
TOTAL	12 BOBINAS			-

- Potencia 1.5 KVA.
- Frecuencia 50 Hz.

Primario y secundario exactamente iguales: comprenden cada uno contiene seis bobinas independientes con las tensiones que se indican a continuación.

- 2 ($100 \div 63.5$) v.
- 2 ($55 \div 31.75$) v.
- 2 ($25 \div 143.5$) v.
- Resistencia primaria 1.98 Ω .
- Resistencia secundario 2 Ω .
- Rendimiento a carga nominal 92%.

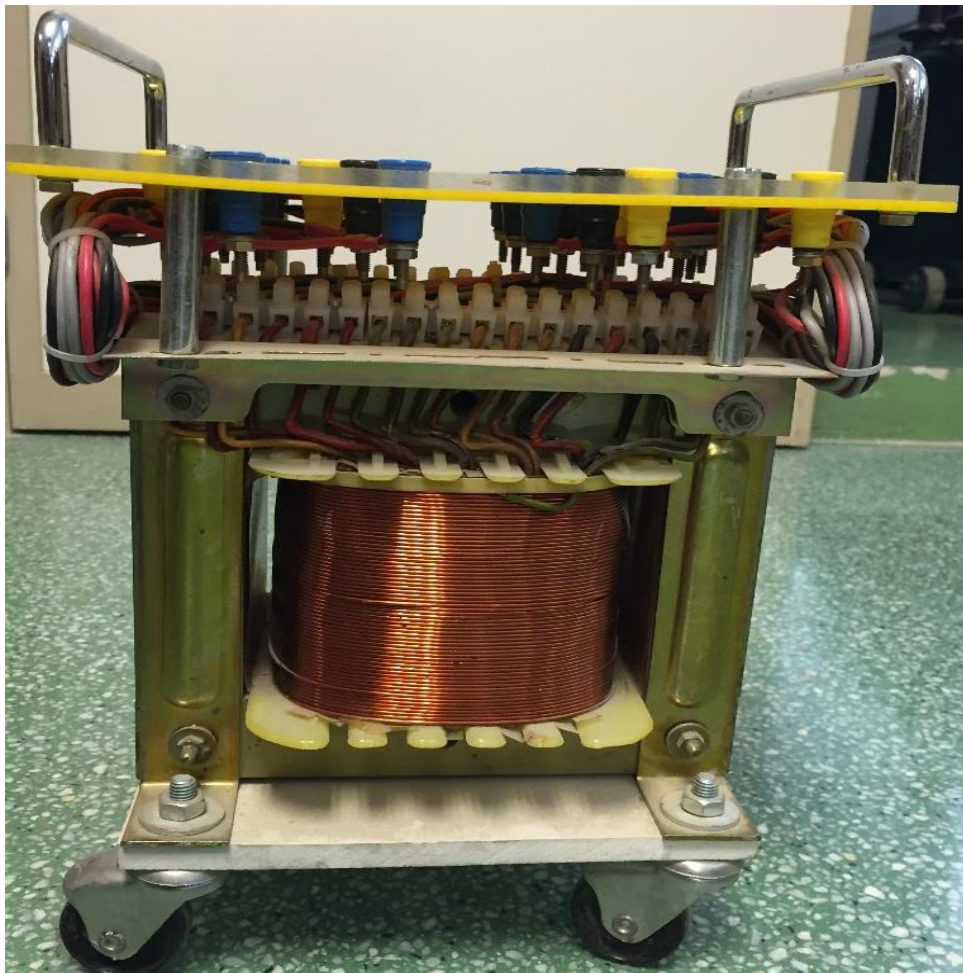


Figura 4.3. Transformador monofásico auxiliar utilizado 1.5 KVA.

4.3. TRANSFORMADORES A ENSAYAR

4.3.1. TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE BAJA TENSIÓN DE 5KVA SIN BOBINADO TERCIARIO.

- Potencia: 5KVA
- Primario: 400V – 7.19 A
- Secundario: 230V - 12.55 A

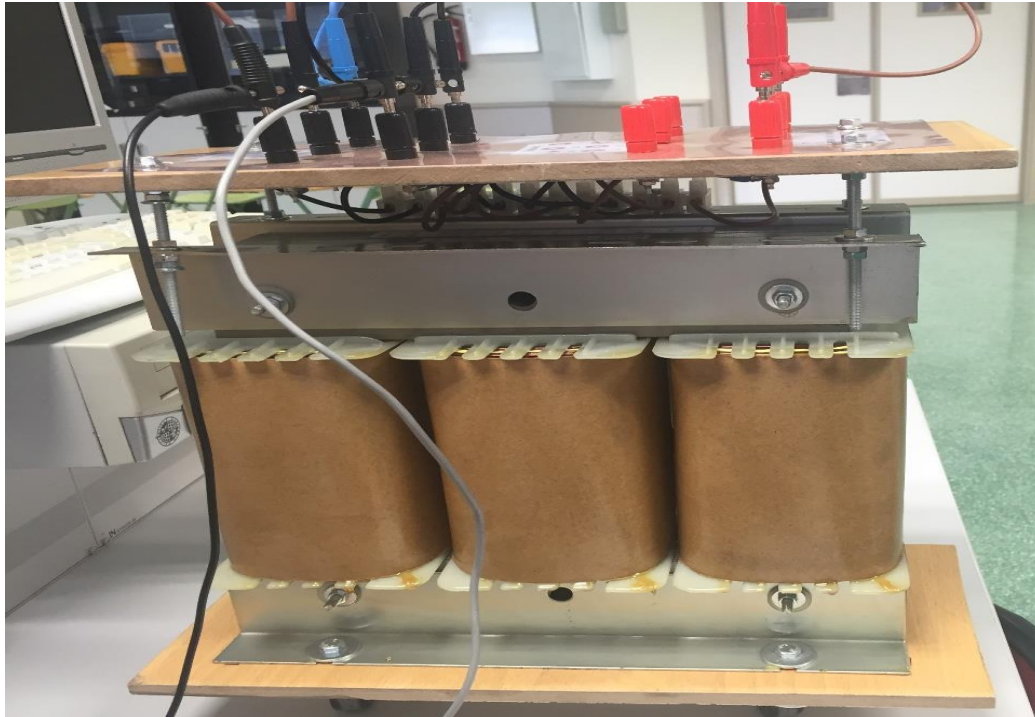


Figura 4.4. Transformador de 5KVA sin devanado de compensación.

4.3.2. TRANSFORMADOR DE BAJA TENSIÓN DE 5KVA CON BOBINADO TERCIARIO.



Figura 4.5.1. Transformador trifásico de 5KVA con dos bobinas por devanado.



Figura 4.6.2. Transformador trifásico de 5KVA con dos bobinas por devanado.

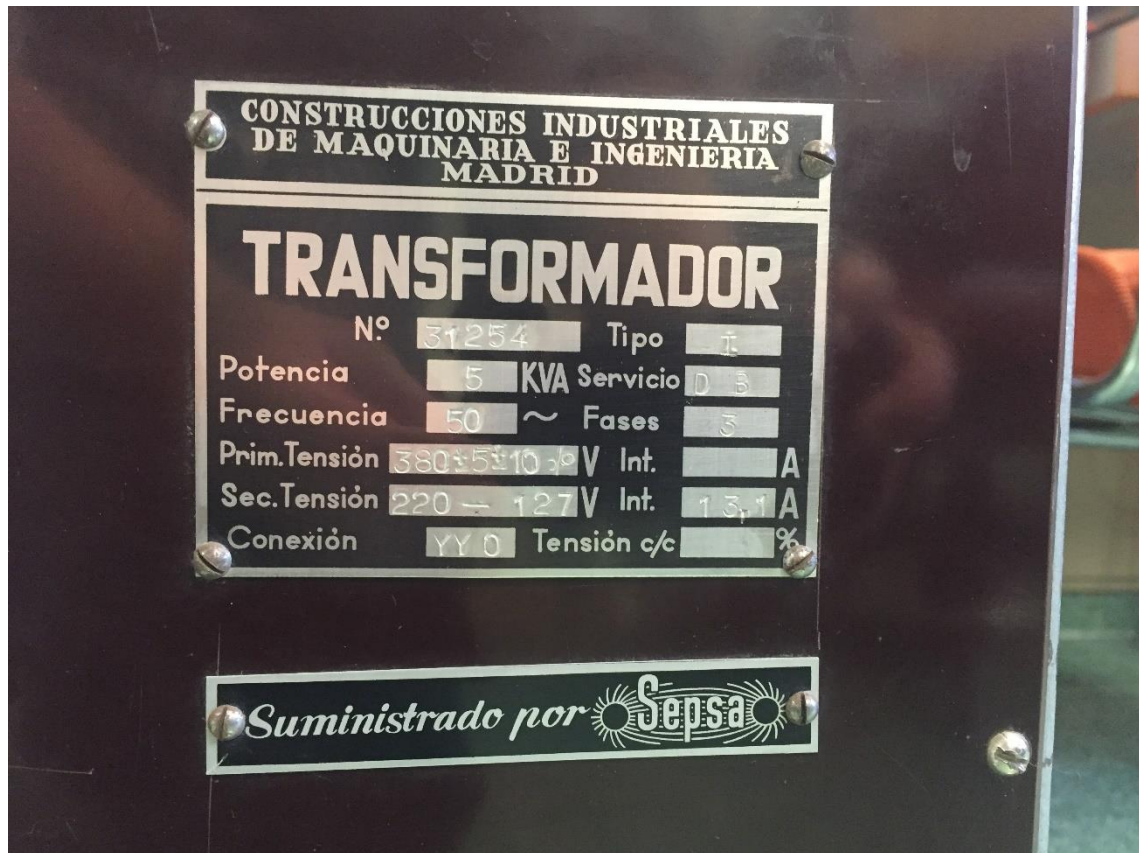


Figura 4.7. Placa de características del transformador de 5KVA

- Potencia: 5KVA
- Primario: 380 V – 7.59 A
- Secundario: 127 V – 13.1 A
- Terciario: 127 V – 13.1 A

4.3.3. TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE BAJA TENSIÓN DE 3KVA CON 3 ARROLLAMIENTOS SECUNDARIOS.

Este transformador se utilizó de manera especial para poder tener un mayor registro de valores, de sus tres arrollamientos del secundario se dividieron de tal forma que uno era el secundario normal un arrollamiento actuaría como bobinado de compensación o terciario y el tercer arrollamiento se dejaría en vacío.

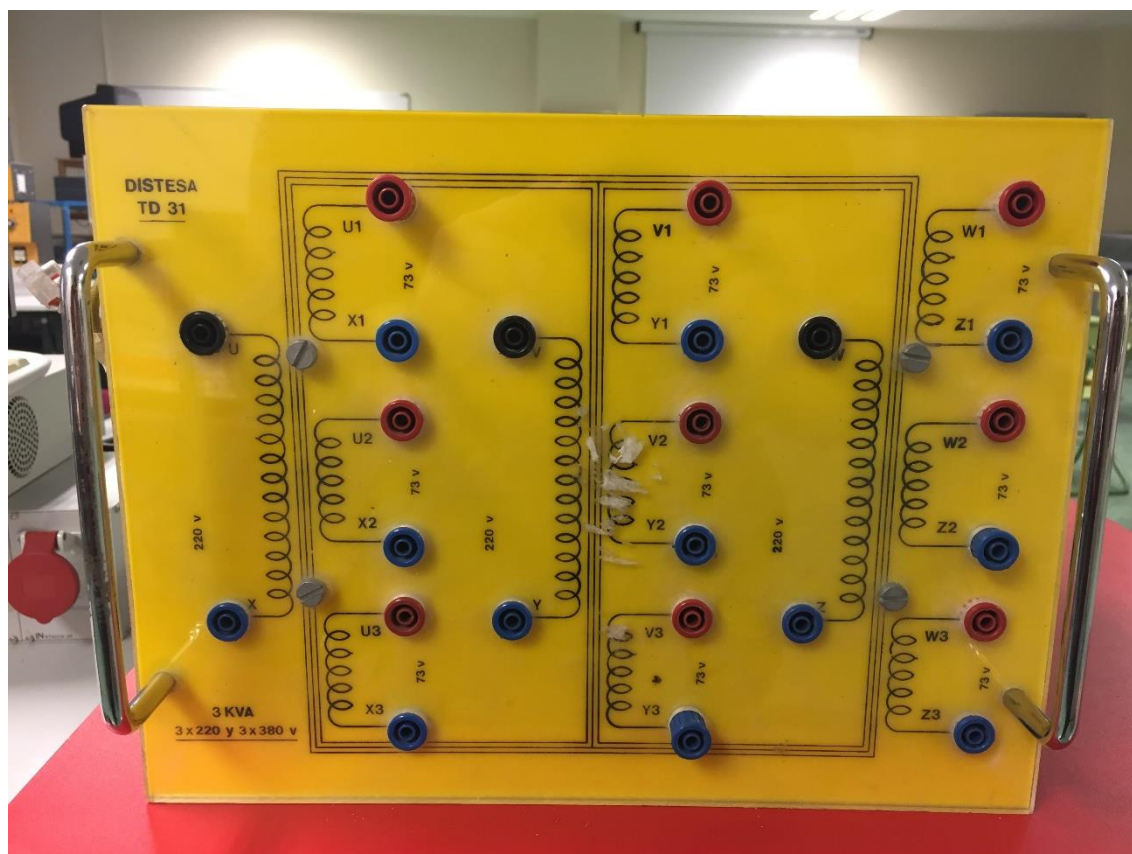


Figura 4.9.1. Transformador trifásico de 3KVA con tres devanados secundarios

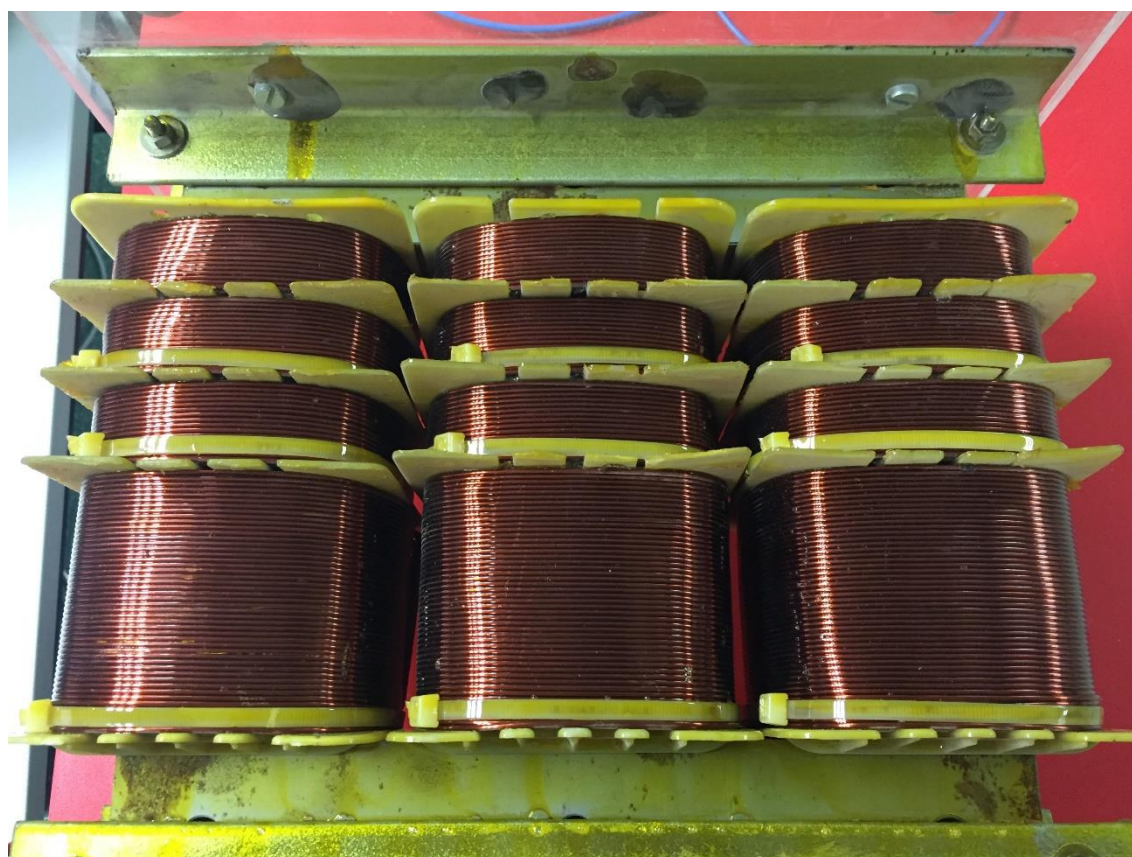


Figura 3.9.2. Transformador trifásico de 3KVA con tres devanados secundarios

Características del transformador trifásico TD 31.

	DEVANADOS			
TERMINALES	U - X	U1 - X1	U2 - X2	U3 - X3
	V - Y	V1 - Y1	V2 - Y2	V3 - Y3
	W - Z	W1 - Z1	W2 - Y2	W3-Y3
		100%		
TENSIONES (V)	220	73.3	73.3	73.3
		380		
INTENSIDADES (A)	4.6	7.9		
POTENCIAS (VA)	3000	1000	1000	1000
		3000		

4.4. DESCRIPCIÓN DE LA REALIZACIÓN DEL ENSAYO.

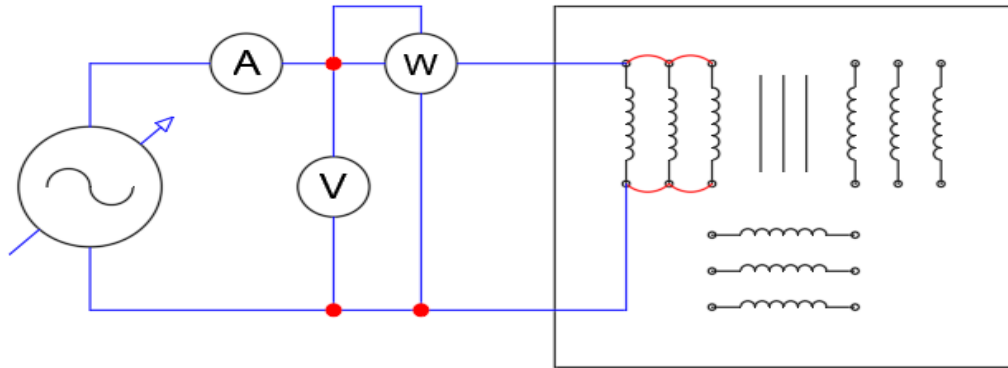
El ensayo se ha realizado conectado los tres devanados del transformador en paralelo. Y aplicando pequeños incrementos de tensión en escalones más o menos simétricos para conseguir una linealidad de valores, todas las medidas se han tomado después del transformador auxiliar para que este no tenga influencia en nuestros resultados del ensayo.

Como los transformadores a los que le hemos aplicado el ensayo dos de ellos disponían de un bobinado secundario que podíamos dividir, hemos podido simular el tener un tercer devanado de compensación que nos ha servido para ver las diferencias producidas cuando tenemos la disponibilidad de este.

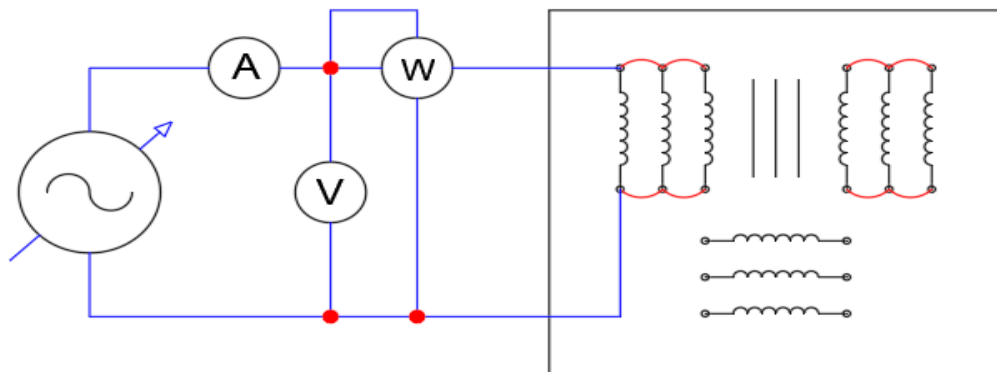
Los ensayos en los transformadores de tres arrollamientos se han realizado los siguientes ensayos donde se representa su sistema de conexión.

4.4.1. ESQUEMAS DE CONEXIÓN REALIZADOS EN LOS TRANSFORMADORES CON DEVANADO DE COMPENSACIÓN.

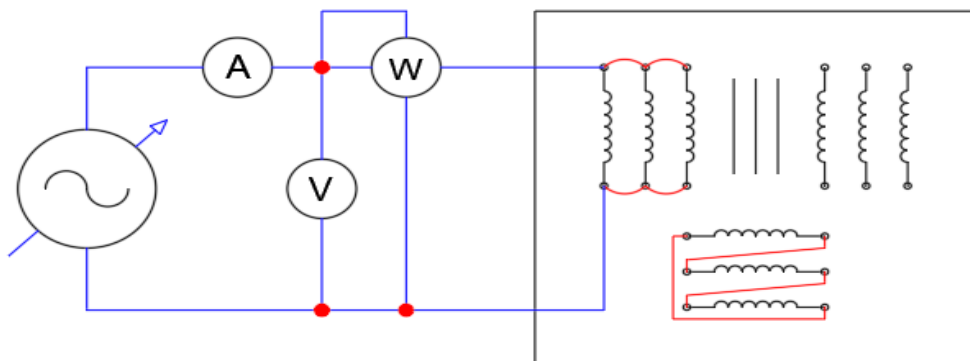
Esquema alimentado-abierto-abierto



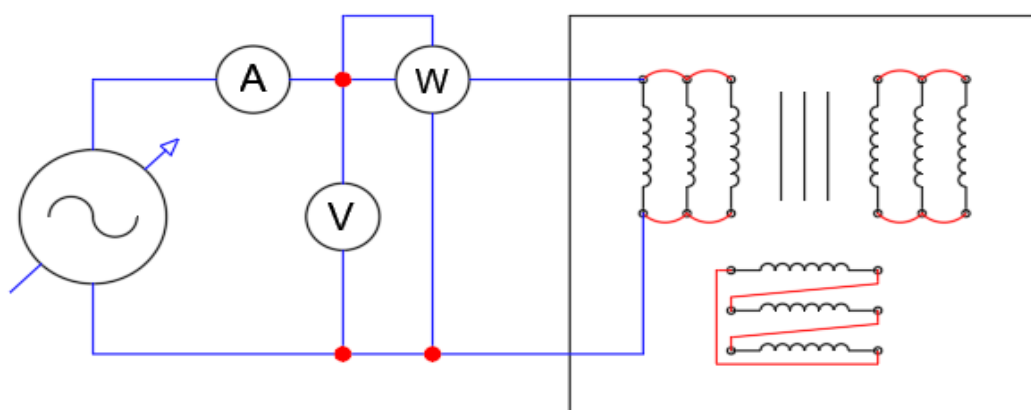
Esquema alimentado-cortocircuitado-abierto



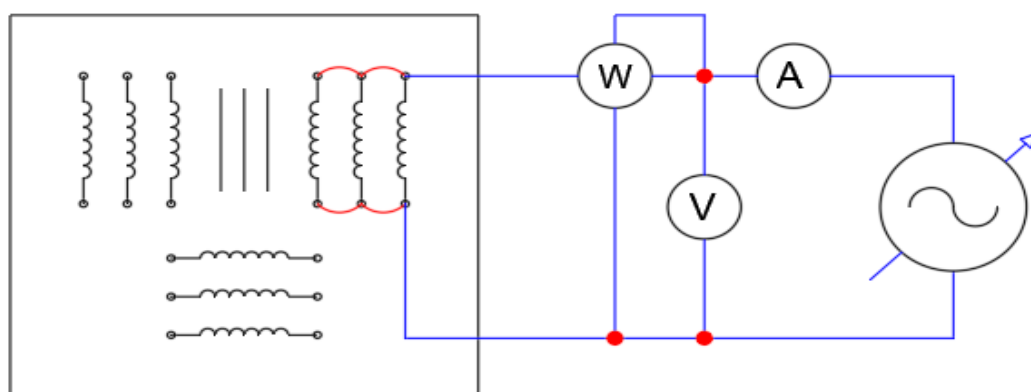
Esquema alimentado-abierto-cerrado



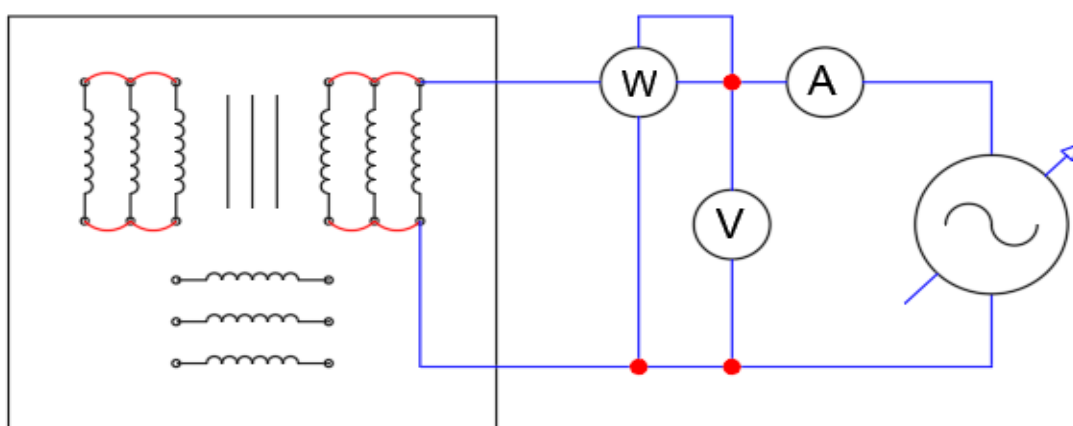
Esquema alimentado-cortocircuitado-cerrado



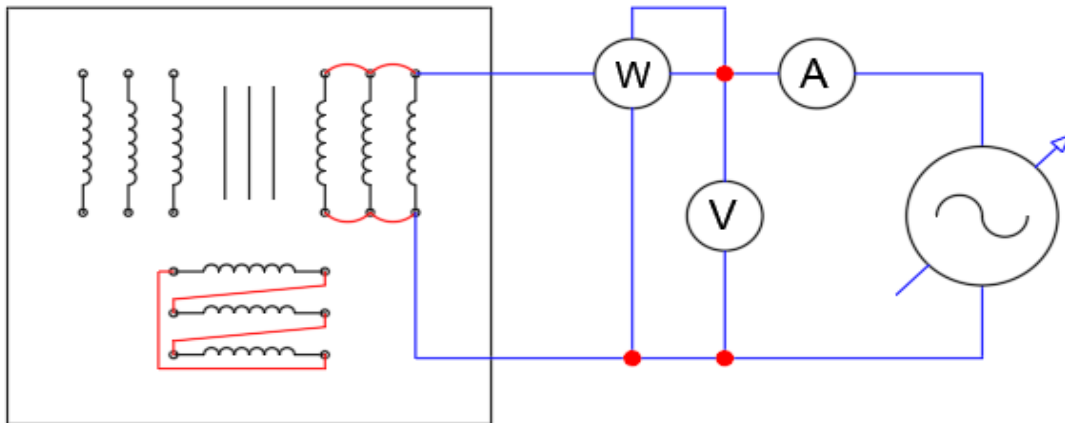
Esquema abierto-alimentado-abierto



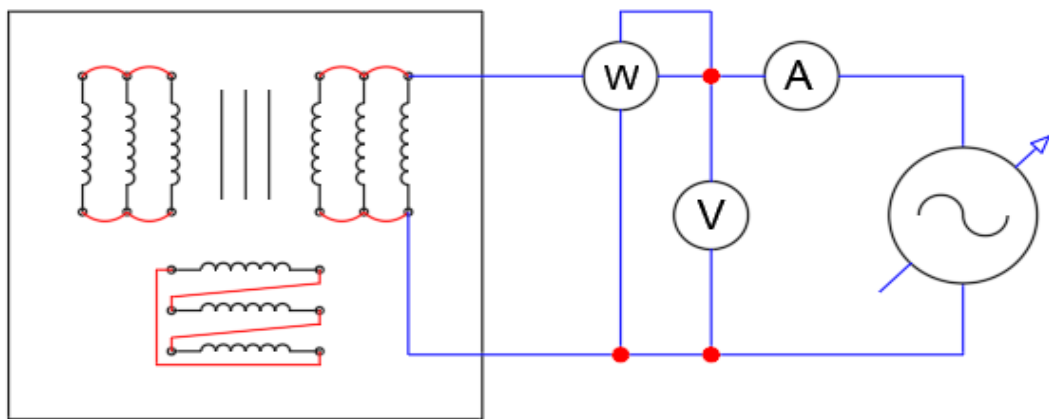
Esquema cortocircuitado-alimentado-abierto



Esquema abierto-alimentado-cerrado



Esquema cortocircuitado-alimentado-cerrado



4.4.2. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO EN EL TRANSFORMADOR SIN DEVANADO DE COMPENSACIÓN.

En el transformador de dos devanados solo hemos podido realizar las siguientes montajes donde el esquema de conexión es el mismo que en cuando disponíamos de un tercer bobinado. Solo que en este caso el tercer bobinado se considera en abierto siempre, por lo que se simplifica a las siguientes configuraciones.

- Conexión alimentado-abierto
- Conexión alimentado-cortocircuitado
- Conexión abierto-alimentado
- Conexión cortocircuitado-alimentado

Para la realización de los ensayo como anteriormente se ha descrito uno de los mayores problemas que hemos tenido es el no poder obtener unos valores altos a la hora de ensayar los transformadores ya que los equipos de la universidad son equipos docentes y solo están preparados para la realización de pequeños ensayos.

Este problema se solucionó instalando en serie un transformador monofásico justo a la salida de la fuente para poder obtener una tensión e intensidad más acordes a nuestro ensayo.

Los ensayos se realizaron controlando siempre las fluctuaciones en la intensidad y siendo conscientes de no sobrepasar la intensidad nominal de bobina para cada transformador.

En el siguiente capítulo se registran en una tabla los resultados obtenidos.

Capítulo 5

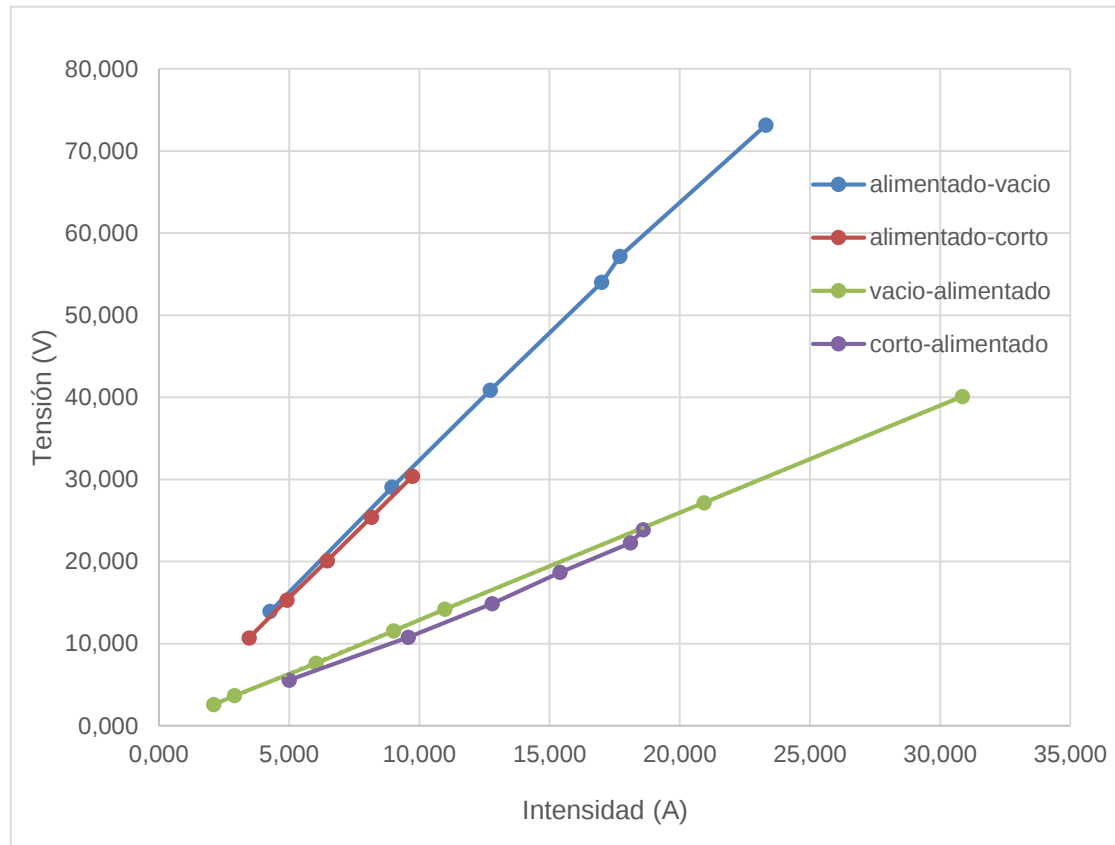
TABLAS Y GRAFICOS REPRESENTATIVOS DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR

Los datos siguientes se obtienen mediante los ensayos realizados en el laboratorio, para la realización del mismo se han utilizado los equipos anteriormente descritos.

5.1. TRANSFORMADOR TRIFASICO DE BAJA TENSIÓN DE 5KVA SIN BOBINADO DE COMPENSACIÓN.

ENSAYO	Arrollamiento			TENSIÓN	INTENSIDAD	IMPEDANCIA	IMPEDANCIA MEDIA
	Primario	Secundario	Terciario	V	A		
1	Alimentado	En vacío	Sin arrollamiento terciario	13,920	4,270	9,780	9,632
				29,050	8,950	9,737	
				40,870	12,720	9,639	
				54,000	17,000	9,529	
				57,180	17,700	9,692	
				73,140	23,300	9,417	
2	Alimentado	En cortocircuito		10,700	3,460	9,277	9,332
				15,300	4,910	9,348	
				20,100	6,460	9,334	
				25,400	8,160	9,338	
				30,400	9,740	9,363	
3	En vacío	Alimentado		2,570	2,100	3,671	3,823
				3,660	2,900	3,786	
				7,600	6,030	3,781	
				11,560	9,010	3,849	
				14,200	10,970	3,883	
				27,150	20,930	3,892	
				40,100	30,850	3,900	
4	En cortocircuito	Alimentado		5,550	5,000	3,330	3,562
				10,790	9,580	3,379	
				14,880	12,800	3,488	
				18,680	15,400	3,639	
				22,260	18,100	3,690	
				23,870	18,600	3,850	

Gráfico representativo de las impedancias.



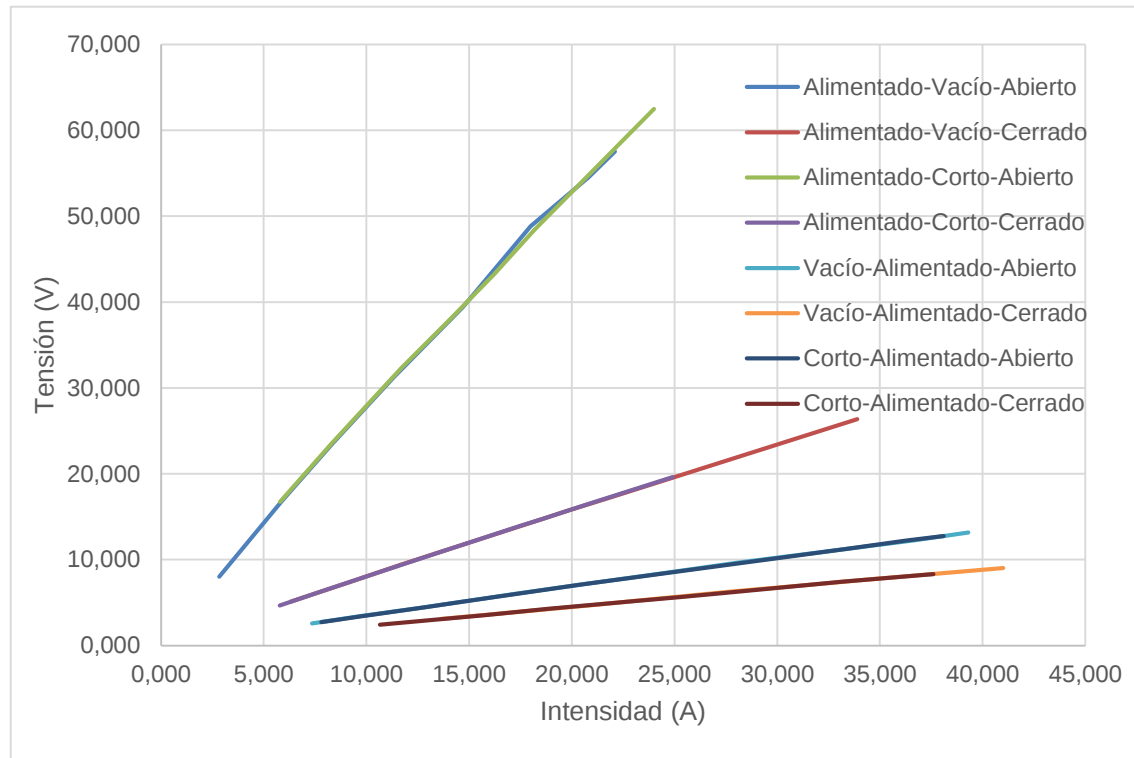
Conclusión: Si se realiza la comprobación de la relación de transformación para la observar que el resultado es igual se realice por el primario o secundario se observa una pequeña diferencia que asumimos normal ya que el valor de la relación de transformación teórica del transformador es de 1,73 mientras que la real obtenida en los ensayos es de 1,59.

5.2. TRANSFORMADOR DE BAJA TESI3N DE 5KVA CON BOBINADO DE COMPENSACI3N.

ENSAYO	Arrollamiento			TENSI3N	INTENSIDAD	IMPEDANCIA	IMPEDANCIA MEDIA
	Primario	Secundario	Terciario	V	A		
1	Alimentado	En vac3o	Abierto	8,005	2,830	8,486	8,208
				16,890	5,900	8,588	
				23,493	8,330	8,461	
				31,360	11,370	8,274	
				39,420	14,700	8,045	
				48,840	18,000	8,140	
				54,510	20,800	7,862	
				57,510	22,100	7,807	
2	Alimentado	En vac3o	Cerrado	5,095	6,310	2,422	2,387
				7,440	9,270	2,408	
				9,450	11,700	2,423	
				14,770	18,600	2,382	
				15,610	19,700	2,377	
				17,200	21,800	2,367	
				26,350	33,900	2,332	
3	Alimentado	En cortocircuito	Abierto	16,759	5,800	8,668	8,192
				23,520	8,300	8,501	
				32,310	11,700	8,285	
				38,300	14,200	8,092	
				43,200	16,200	8,000	
				48,460	18,200	7,988	
				62,500	24,000	7,813	
4	Alimentado	En cortocircuito	Cerrado	4,666	5,780	2,422	2,397
				6,270	7,760	2,424	
				7,499	9,300	2,419	
				10,560	13,170	2,405	
				12,363	15,500	2,393	
				13,930	17,500	2,388	
				14,850	18,700	2,382	
				16,330	20,600	2,378	
				19,630	24,900	2,365	
5	En vac3o	Alimentado	Abierto	2,576	7,350	1,051	1,034
				3,433	9,730	1,058	
				4,433	12,800	1,039	
				5,996	17,200	1,046	
				7,106	20,500	1,040	
				8,254	23,900	1,036	
				9,650	28,100	1,030	
				12,230	36,600	1,002	
				13,180	39,300	1,006	

6	En vacío	Alimentado	Cerrado	3,083	13,640	0,678	0,673
				4,792	21,300	0,675	
				5,185	23,000	0,676	
				6,340	28,000	0,679	
				7,060	31,500	0,672	
				7,638	34,200	0,670	
				9,030	41,000	0,661	
7	En cortocircuito	Alimentado	Abierto	2,730	7,810	1,049	1,032
				3,330	9,500	1,052	
				4,480	12,900	1,042	
				5,122	14,700	1,045	
				7,090	20,400	1,043	
				8,290	24,100	1,032	
				11,270	33,400	1,012	
				12,220	36,300	1,010	
				12,740	38,100	1,003	
8	En cortocircuito	Alimentado	Cerrado	2,420	10,660	0,681	0,673
				3,546	15,800	0,673	
				4,273	18,900	0,678	
				5,039	22,400	0,675	
				5,668	25,400	0,669	
				6,130	27,400	0,671	
				7,420	33,100	0,673	
				8,330	37,600	0,665	

Gráfico representativo de las impedancias.



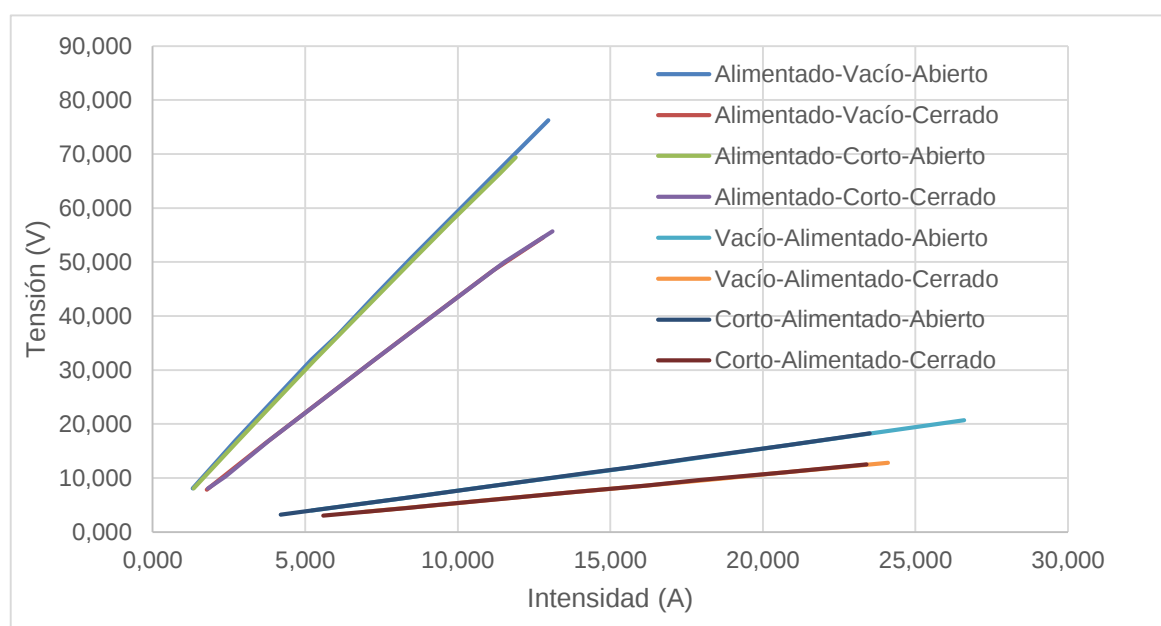
Conclusión: En este caso cuando hacemos como en el caso anterior la transformación de las impedancias de un arrollamiento al otro para comparar resultados observamos que cuando el devanado de compensación está abierto la relación de transformación tenemos una pequeña variación de la teórica con la real en este caso más despreciable que con el transformador anterior. Relación real 2,82; relación teórica 3.

5.3. TRASNSFORMADOR TRIFASICO DE BAJA TENSIÓN DE 3KVA CON 3 ARROLLAMIENTOS SECUNDARIOS.

ENSAYO	Arrollamiento			TENSION	INTENSIDAD	IMPEDANCIA	IMPEDANCIA MEDIA
	Primario	Secundario	Terciario	V	A		
1	Alimentado	En vacío	Abierto	8,067	1,310	18,474	18,186
				16,964	2,720	18,710	
				31,910	5,200	18,410	
				36,500	6,060	18,069	
				43,700	7,270	18,033	
				50,710	8,470	17,961	
				76,280	12,970	17,644	
2	Alimentado	En vacío	Cerrado	7,840	1,770	13,288	13,125
				16,420	3,690	13,350	
				30,710	7,000	13,161	
				36,730	8,390	13,133	
				48,470	11,160	13,030	
				54,570	12,800	12,790	
3	Alimentado	En cortocircuito	Abierto	8,077	1,340	18,083	17,793
				16,965	2,810	18,112	
				31,920	5,320	18,000	
				50,800	8,600	17,721	
				57,500	9,780	17,638	
				66,450	11,390	17,502	
				69,390	11,900	17,493	
4	Alimentado	En cortocircuito	Cerrado	8,078	1,820	13,315	13,105
				10,274	2,380	12,950	
				16,927	3,810	13,328	
				22,501	5,100	13,236	
				31,680	7,220	13,163	
				40,710	9,340	13,076	
				50,020	11,530	13,015	
				55,690	13,100	12,753	
5	En vacío	Alimentado	Abierto	3,962	5,210	2,281	2,298
				6,108	8,040	2,279	
				6,902	9,020	2,296	
				7,688	10,070	2,290	
				9,563	12,470	2,301	
				10,966	14,400	2,285	
				12,210	16,000	2,289	
				13,842	18,000	2,307	
				15,440	20,000	2,316	
				20,710	26,600	2,336	

6	En vacío	Alimentado	Cerrado	3,770	6,960	1,625	1,603
				5,168	9,670	1,603	
				5,690	10,600	1,610	
				7,276	13,630	1,601	
				8,569	16,100	1,597	
				9,991	18,800	1,594	
				11,026	20,700	1,598	
				12,830	24,100	1,597	
7	En cortocircuito	Alimentado	Abierto	3,200	4,200	2,286	2,304
				4,978	6,540	2,283	
				6,375	8,340	2,293	
				8,553	11,150	2,301	
				10,970	14,300	2,301	
				12,001	15,700	2,293	
				13,610	17,600	2,320	
				16,100	20,800	2,322	
8	En cortocircuito	Alimentado	Cerrado	3,010	5,590	1,615	1,603
				4,458	8,360	1,600	
				4,977	9,300	1,605	
				5,860	10,960	1,604	
				7,340	13,730	1,604	
				8,576	16,200	1,588	
				9,600	17,900	1,609	
				11,020	20,700	1,597	
				12,539	23,400	1,608	

Gráfico representativo de las impedancias.



Conclusiones: en este caso como el transformador es de muy baja potencia y las tensiones de los bobinados es muy reducida podemos observar que las variaciones entre la relación teórica y la relación que obtenemos es simplemente despreciable aunque se perciben las pequeñas variaciones que se deducen que son por las fluctuaciones de los equipos de medida.

5.4. DATOS REPRESENTATIVOS DE UN TRANSFORMADOR DE POTENCIA FACILITADOS POR UN FABRICANTE DE TRANSFORMADORES.

	ENSAYO IMPEDANCIA HOMOPOLAR		Lab. COT.								
			Pag. 1								
DATOS DEL OBJETO DE ENSAYO			Fecha : 19/02/2015								
Numero: 239819	Norma: IEC-60076	Potencia: 2300									
Tipo: 2300/36/33 2x0,365 O-PE											
Comentarios:	JEMA										
ENSAYO DE IMPEDANCIA HOMOPOLAR <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>V (v)</th> <th>I(A)</th> <th>Zo(ohm/fase)</th> <th>zo(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>167</td> <td>19,71</td> <td>25,42</td> <td>5,37</td> </tr> </tbody> </table> Realizado por: Alvaro Corpa Fecha informe: 29/05/2015 Zbase= 473,5 ohm				V (v)	I(A)	Zo(ohm/fase)	zo(%)	167	19,71	25,42	5,37
V (v)	I(A)	Zo(ohm/fase)	zo(%)								
167	19,71	25,42	5,37								

Nota: los datos expuestos son facilitados por la empresa ORMAZABAL actualmente COTRADIS, que nos han facilitado uno de los últimos ensayos realizados, esta es toda la información que la empresa nos ha facilitado ya que según la normativa vigente no están obligados a la realización de este ensayo y solo lo realizan cuando un cliente así se lo requiere.

5.5. HERRAMIENTA DE CALCULO UTILIZADA

Para el la realizar los cálculos de las tablas anteriores expuestas se ha utilizado el programa de cálculo del paquete office de Microsoft “Excel 2013”, a continuación se puede observar una imagen del mismo programa de cálculo.

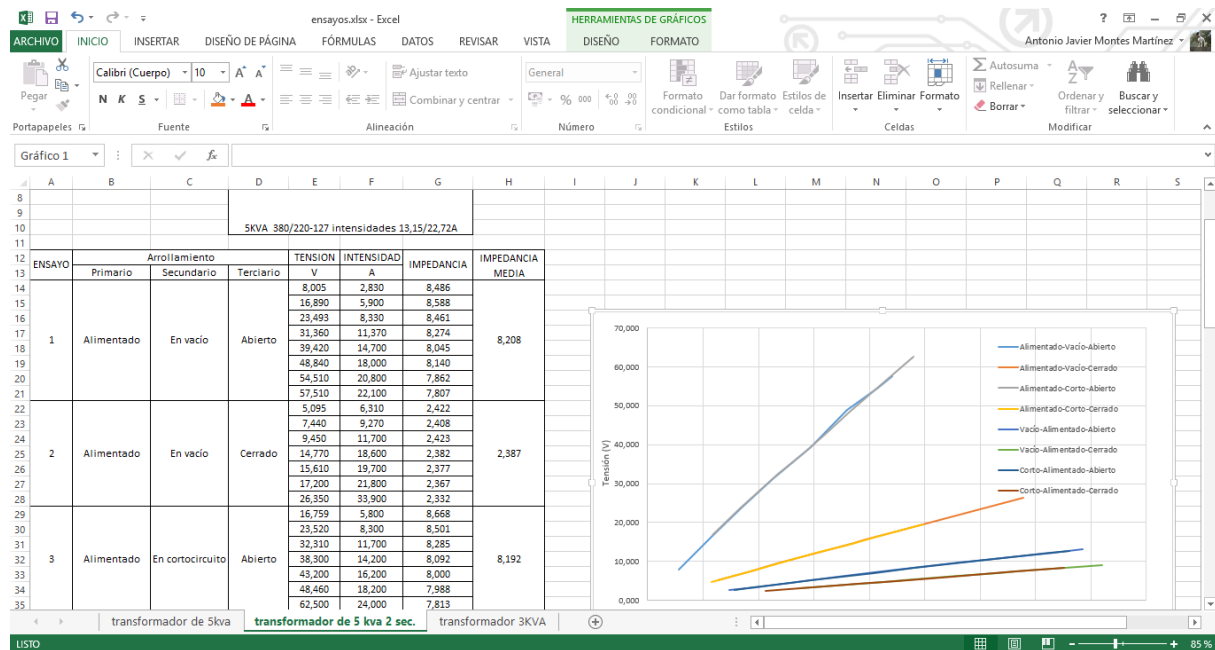


Figura 5.1. Pantalla del programa de cálculo utilizado

Capítulo 6

TIPOS DE PROTECCIONES UTILIES PARA LA PROTECCIÓN DE LOS TRANSFORMADORES TRIFASICOS ANTE LA COMPONENTE HOMOPOLAR.

6.1. PROTECCIÓN DIRECCIONAL DE TIERRA

6.1.1. MAGNITUDES DE ENTRADA

Esta protección mide la corriente residual y utiliza generalmente como magnitud de polarización la tensión residual, que no conviene confundir con la tensión homopolar. Recordemos que en todo sistema trifásico, F_1 , F_2 , F_3 , la teoría de las componentes simétricas define la magnitud homopolar F_h por:

$$F_h = \frac{1}{3}(F_1 + F_2 + F_3)$$

La magnitud residual $F_r = F_1 + F_2 + F_3$ es tres veces mayor que la magnitud homopolar.

La corriente residual se mide o con tres transformadores de intensidad (TI), uno por fase, o mediante un solo toroide que abarque las tres fases:

a) la utilización de tres TI (figura 6.1.) tiene sus ventajas:

- los TI se encuentran fácilmente en el mercado,
- es posible medir con ellos corrientes importantes,

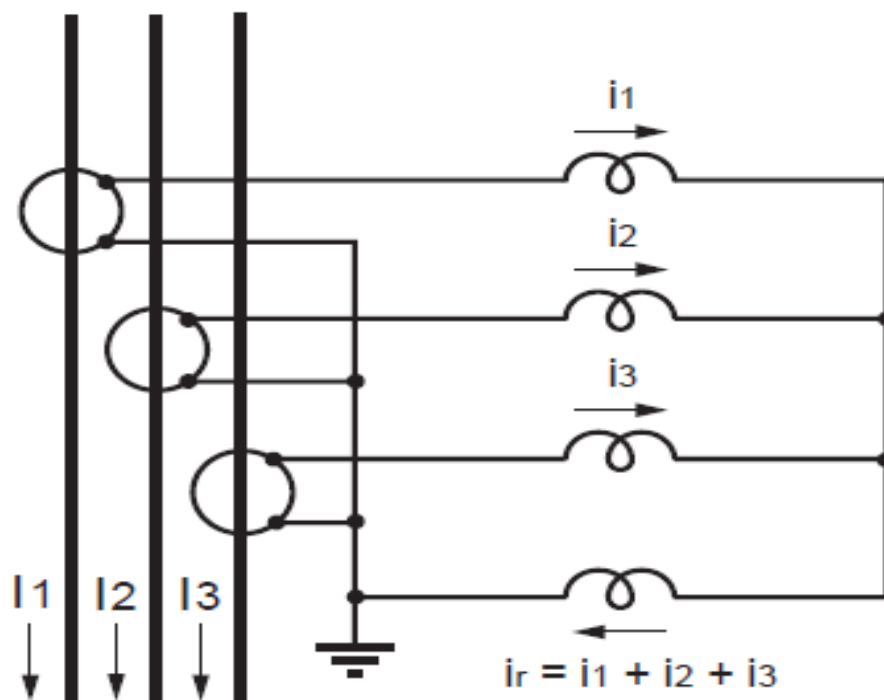


Figura 6.1. Medida de la corriente residual mediante 3 TI

b) pero hay ciertos inconvenientes:

- la saturación de los TI en el momento del cortocircuito o en la conexión de un transformador provoca una falsa corriente residual,
- en la práctica, el umbral no puede regularse a un valor inferior al 10 % de la I_n del TI,

c) la medida realizada por un toroide que abarque las tres fases (figura 6.2.):

- tiene la ventaja de tener una gran sensibilidad,
- pero un inconveniente: el toroide (aislado de la baja tensión) no tiene asegurado su aislamiento por instalarse alrededor de un cable no blindado,

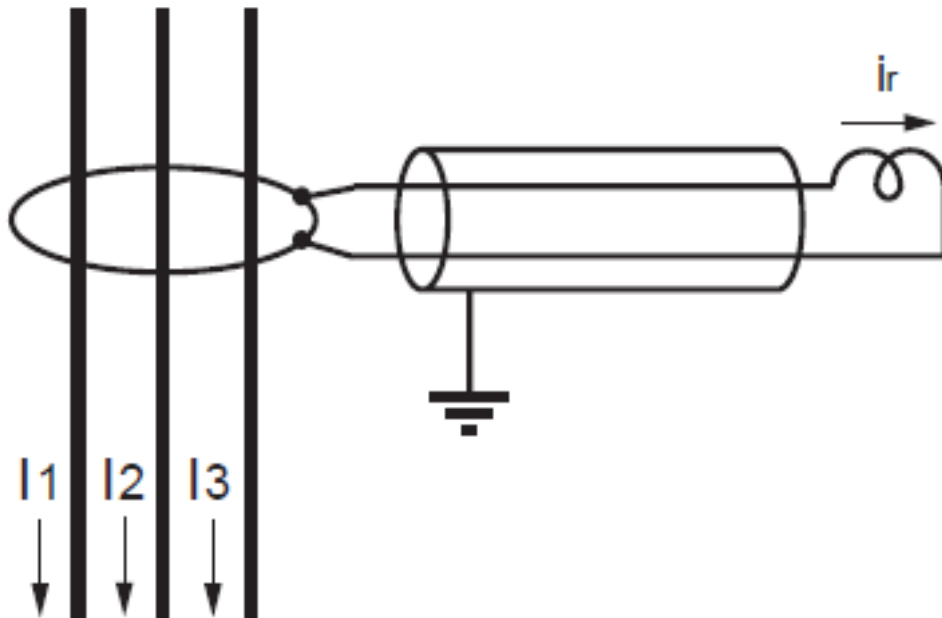


Figura 6.2. Medida de la corriente residual con un único toroide

La tensión residual se mide con tres transformadores de tensión (TT); normalmente, se usan TT con dos secundarios (figura 6.3.): el primero, conectado en estrella, permite la medida de las tensiones simples y compuestas; el segundo, conectado en triángulo abierto, permite medir la tensión residual.

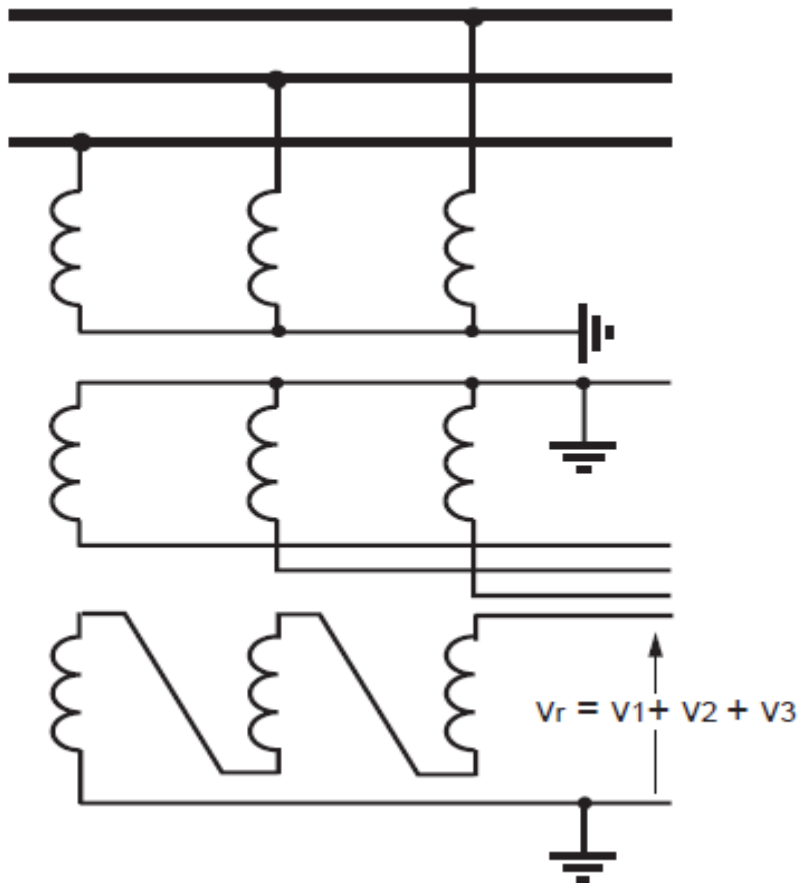


Figura 6.3. Medida de la tensión residual mediante TT con dos arrollamientos secundarios.

Si los TT principales sólo tienen un secundario y además están conectados en estrella, se puede utilizar un juego de TT auxiliares para medir la tensión residual (figura 6.4.). Un caso como el de la figura se encuentra normalmente cuando se ha procedido a un plan de mejora de la protección de instalaciones ya existentes.

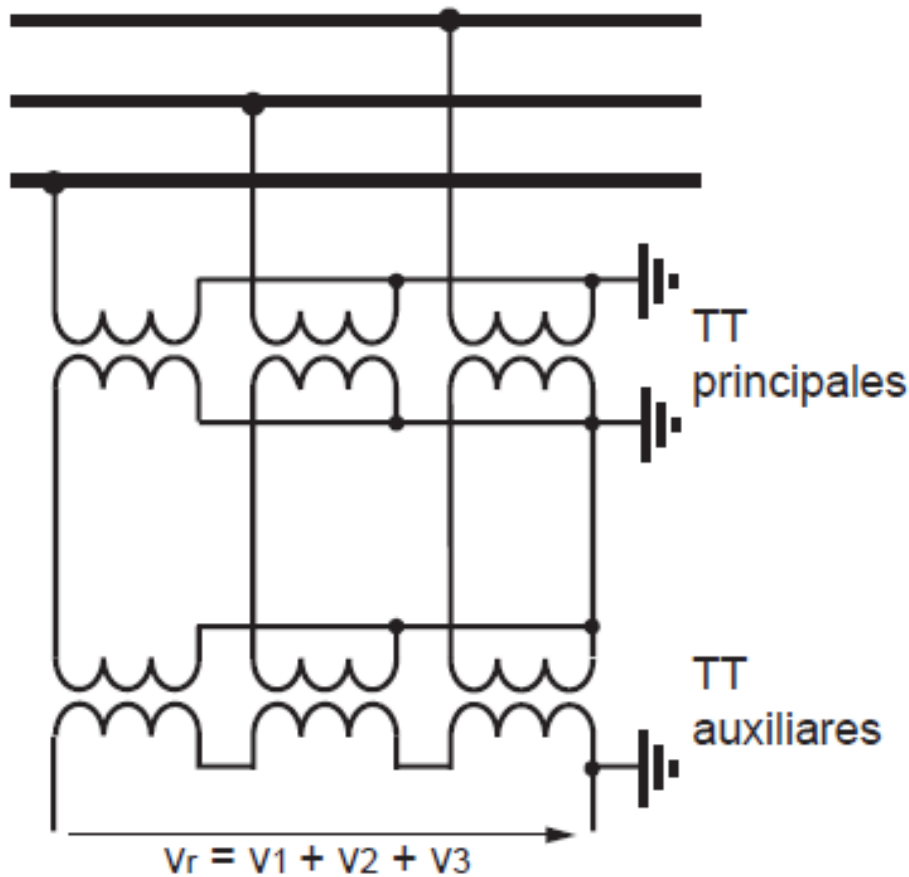


Figura 6.4. Medida de la tensión residual con TT auxiliares

Hay que indicar que ciertas protecciones no necesitan TT auxiliares y calculan por sí mismas la tensión residual a partir de tres tensiones simples.

La magnitud de polarización de un relé direccional de tierra es, en la mayor parte los de casos, la tensión residual; pero puede también usarse la corriente en la puesta a tierra del neutro de la instalación (figura 6.5.).

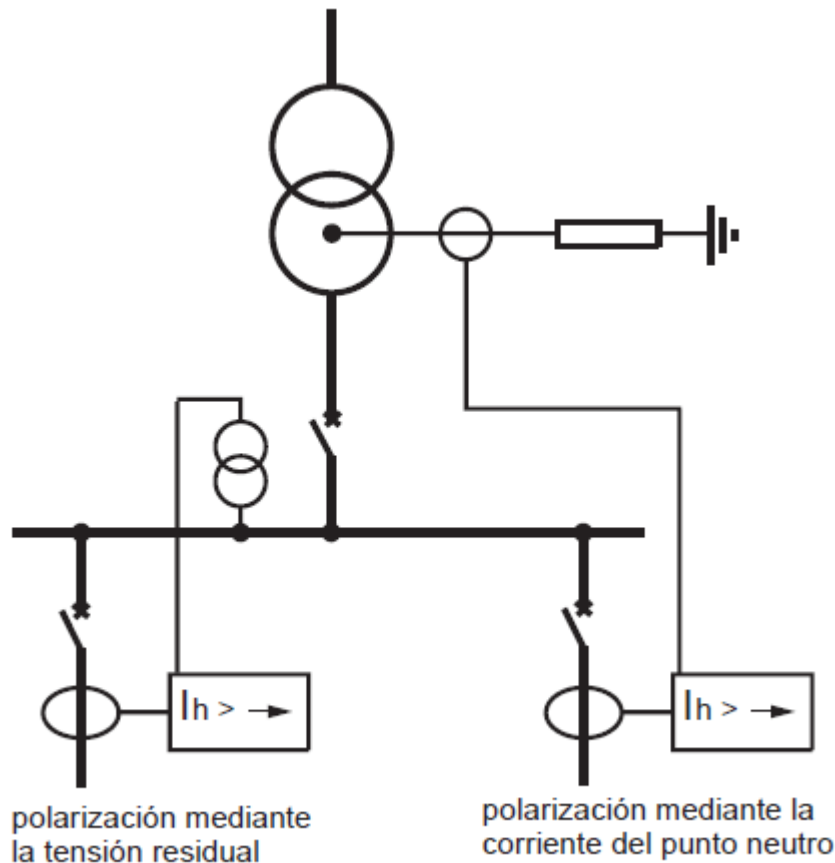


Figura 6.5. Los dos tipos de polarización de una protección direccional de tierra

En teoría, estas dos formas de polarizar la protección son equivalentes. Si Z_h es la impedancia homopolar del transformador y Z_n la impedancia del punto neutro, la tensión residual V_r y la corriente del punto neutro I_n están relacionadas por la razón de proporcionalidad siguiente (escrita en números complejos):

$$V_r = (Z_h + 3Z_n) I_n.$$

En la práctica, la polarización por la corriente del punto neutro está reservada a las redes que tienen una corriente de defecto a tierra importante (varios centenares de amperios) y muy superior a la corriente debida a las capacidades parásitas de la red. Entonces, la medida de la corriente es más precisa que la medida de la tensión residual, cuyo valor es bajo. Sólo puede instalarse en centros de transformación y cerca de la puesta a tierra del neutro.

6.1.2. ÁNGULO CARACTERÍSTICO

Para determinar la dirección del defecto, la protección mide el desfase entre la corriente y la magnitud de polarización. Si la magnitud de polarización no está en el eje de simetría de acción del relé (eje característico —figura 6.6.), es necesario volver a poner en fase el relé; esto se hace con el reglaje del ángulo característico.

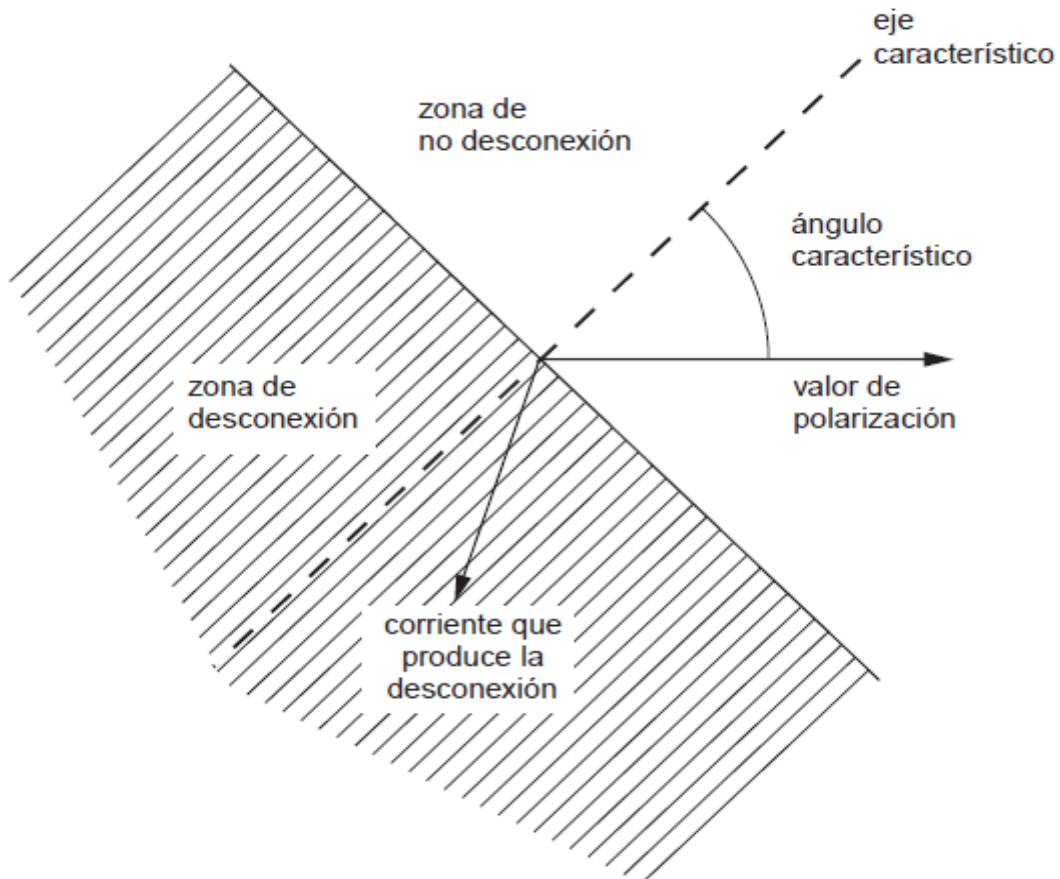


Figura 6.6. Ángulo característico de una protección

Después del estudio del plan de protección, el ángulo característico de las protecciones direccionales debe de determinarse de forma que todo defecto en la dirección de detección escogida provoque una corriente situada en la zona de disparo y que todo defecto en la otra dirección provoque una corriente situada fuera de esta zona.

El ángulo característico depende de la magnitud de polarización escogida y del régimen de neutro de la red (para los relés direccionales de corriente residual). Normalmente, el ángulo característico es, por tanto, regulable.

Para poder hacer la medida del desfase entre la corriente y la magnitud de polarización, es indispensable que esta última tenga una amplitud suficiente (en general $\geq 0,5$ al 2 % del valor nominal de la magnitud). Si la magnitud de polarización es inferior a este margen, la protección no funciona, cualquiera que sea el valor de la corriente medida.

6.1.3. PRINCIPIOS DE DETECCIÓN

Coexisten tres principios de detección que corresponden a necesidades diferentes y, a veces también, a costumbres diferentes:

- Funcionamiento con corriente máxima direccional.
- Medida de la proyección de corriente.
- Medida de la potencia activa residual.

Las dos primeras corresponden a protecciones direccionales de corriente de «fase» o de «tierra»; la tercera a un régimen de neutro particular.

- Funcionamiento con relé de máxima corriente direccional (figura 6.7.).

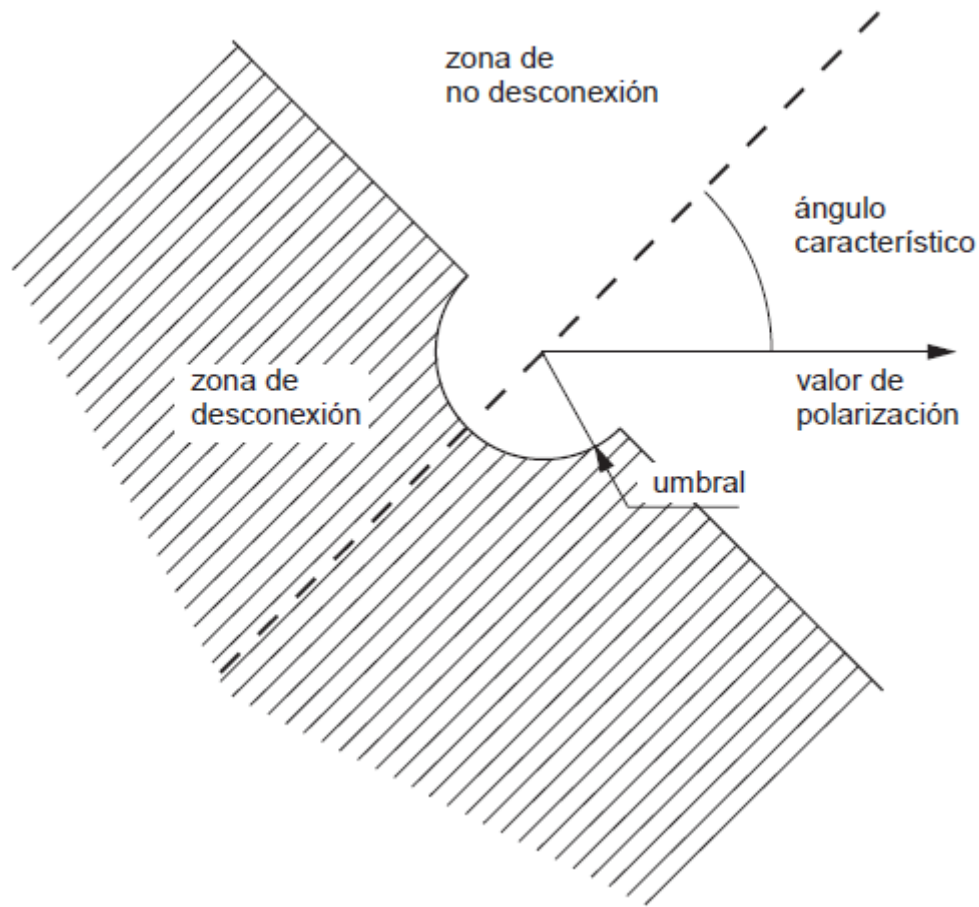


Figura 6.7. Característica de funcionamiento de una protección de máxima corriente direccional.

Este tipo de relé direccional está constituido por la asociación de una protección contra corriente máxima con un elemento de medida del desfase entre la corriente y la magnitud de polarización.

El disparo depende de las dos condiciones siguientes:

- que la corriente sea superior al umbral, y
 - que el desfase entre la corriente y la magnitud de polarización centrado mediante el ángulo característico, esté comprendido en la zona: $+ 90^\circ$; $- 90^\circ$.
- Medida de la proyección de la corriente (figura 6.8.).

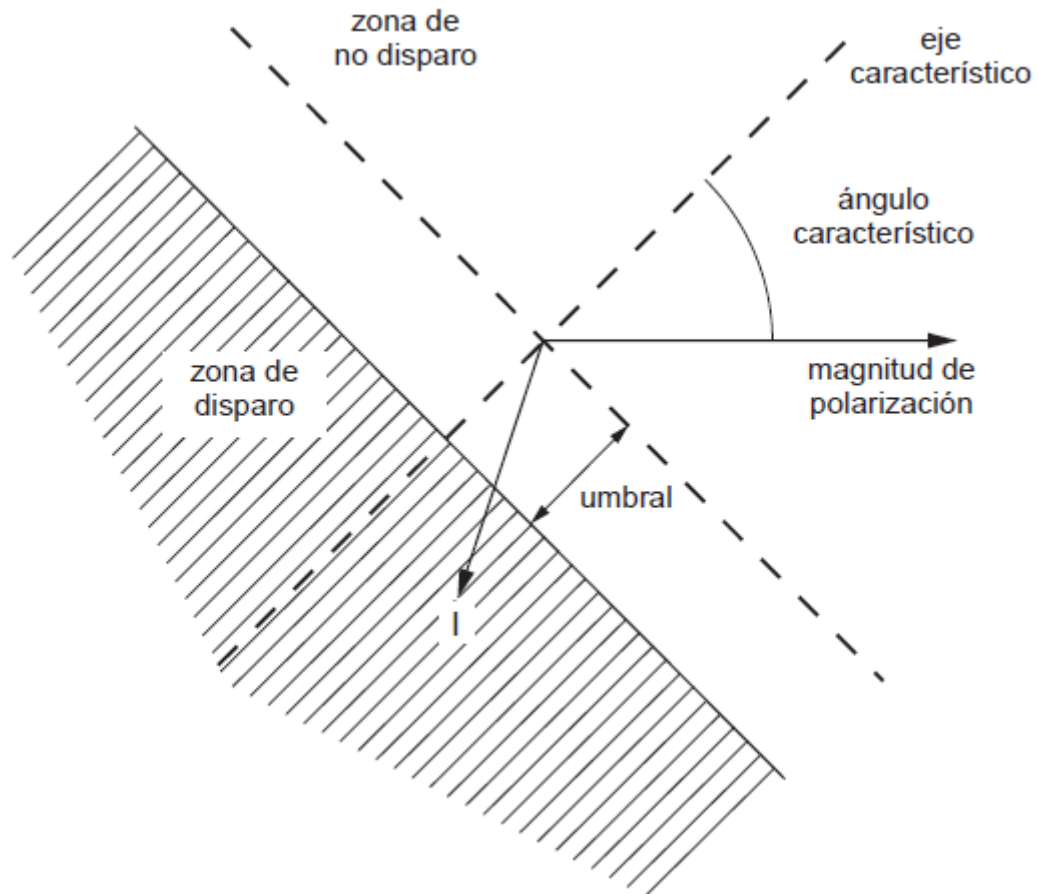


Figura 6.8. Característica de funcionamiento de una protección que mida la proyección de corriente.

Estas protecciones calculan la proyección de la corriente sobre la recta característica. A continuación, el valor obtenido se compara con la referencia para decidir el disparo.

-Medida de la potencia activa residual.

Estas protecciones miden efectivamente una potencia activa residual y su umbral se expresa en Vatios. Hay que diseñarlas para evitar un funcionamiento intempestivo debido a las imprecisiones de medida en caso de gran corriente residual capacitiva (gran potencia residual reactiva); la zona de funcionamiento es reducida, como lo muestra la figura 6.9.

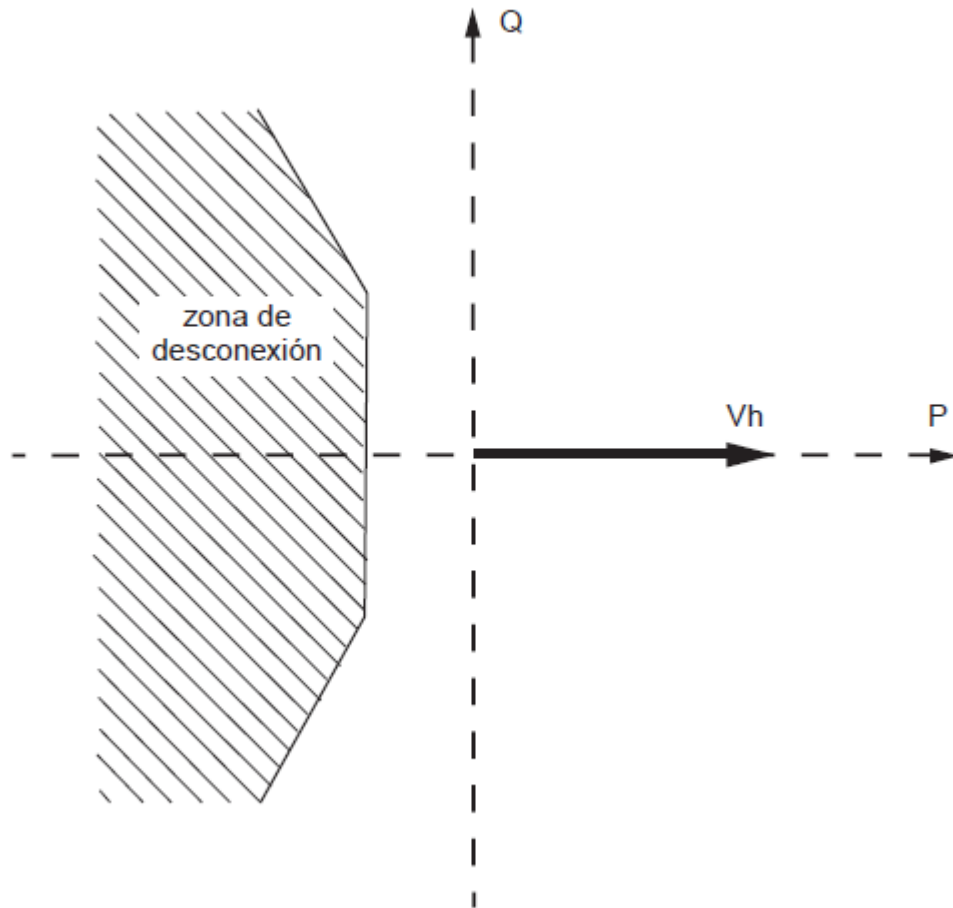


Figura 6.9. Característica de funcionamiento de una protección que mide la potencia activa homopolar.

Para detectar los defectos a tierra, el principio más universal es la medida de la proyección de corriente.

La utilización de los relés de corriente máxima direccionalidad no es igualmente adecuada para todos los regímenes de neutro.

El uso de la protección midiendo la potencia activa residual está limitado a las redes con neutro compensado, en competencia con los relés de proyección de la corriente.

6.2. PROTECCIONES DIRECCIONALES DE FASE

6.2.1. ÁNGULO DE DERIVACIÓN, ÁNGULO CARACTERÍSTICO

Normalmente, estas protecciones son bifásicas y compuestas por dos elementos monofásicos independientes. A veces se necesita una protección trifásica. Para cada

fase vigilada, el relé mide la corriente en la fase y utiliza como magnitud de polarización una tensión compuesta. La tensión simple no se utiliza, puesto que varía mucho si el defecto es a tierra, por efecto del desplazamiento del punto neutro (tensión residual),

Cuando el relé mide la corriente en la fase 1, la tensión de polarización que más se usa es V_2-V_3 . Se dice entonces que el ángulo de derivación de la protección es de 90° (figura 6.10.),

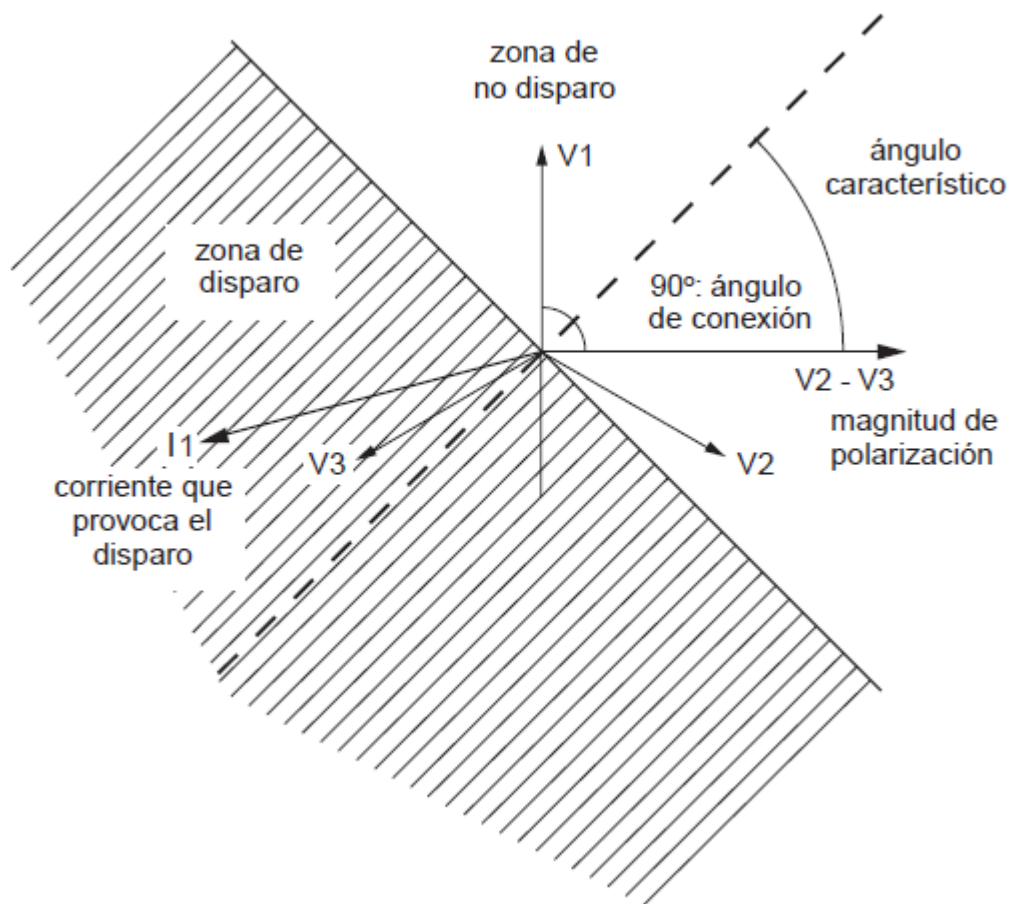


Figura 6.10. El relé que mide la corriente I_1 y la tensión V_2-V_3 tiene un ángulo de derivación de 90° .

El ángulo característico de una protección direccional de fase define, de la misma manera que para una protección direccional de tierra, la orientación de la zona angular de disparo. Es el ángulo que forma la normal al semiplano de disparo con la magnitud de polarización,

Para poder efectuar la medida de la dirección del defecto, la magnitud de polarización (la tensión) debe de tener un valor suficiente. En el caso concreto de un defecto trifásico franco muy próximo a un relé direccional no es detectado por éste puesto que todas las tensiones compuestas son nulas. Para asegurar la detección de este tipo de defecto es necesario que la protección utilice una memoria de tensión.

6.2.2. PRINCIPIOS DE DETECCIÓN

Los relés direccionales de fase funcionan o como protecciones de corriente máxima direccionalidad, o mediante la medida de la proyección de la corriente sobre la recta característica (figuras 6.7. y 6.8.).

Aunque hay en el mercado relés funcionando según estos dos principios, es preferible el relé de corriente máxima direccionalizado.

La coordinación con las protecciones de corriente máxima es mucho más fácil, pues el umbral de detección es independiente de la fase de la corriente.

La medida de la potencia no se utiliza para la detección de los cortocircuitos. La potencia no es un buen criterio de detección del defecto puesto que, cuando hay un defecto entre fases, su valor es tanto más bajo cuanto más próximo está el defecto.

6.3. PROTECCIÓN DE POTENCIA

Muy frecuentemente, estas protecciones utilizan el método de los dos vatímetros para medir la potencia activa, y una variante, que nosotros llamaremos método de los dos vatímetros, para medir la potencia reactiva.

Recordemos que este método permite medir la potencia a partir de dos corrientes y de dos tensiones compuestas (figura 6.11.). Se aplica a una red trifásica, equilibrada o no, siempre que no circule ninguna corriente homopolar. En concreto este método no se aplica nunca a una red de BT de cuatro hilos, es decir, una red cuyo neutro está distribuido y que alimenta cargas monofásicas conectadas entre fase y neutro. La potencia activa viene dada por la fórmula:

$$P = I_1 \times U_{31} \times \cos(I_1, U_{31}) + I_2 \times U_{32} \times \cos(I_2, U_{32}).$$

Del mismo modo, la potencia reactiva se calcula con la fórmula:

$$Q = I_1 \times U_{31} \times \text{sen}(I_1, U_{31}) + I_2 \times U_{32} \times \text{sen}(I_2, U_{32}).$$

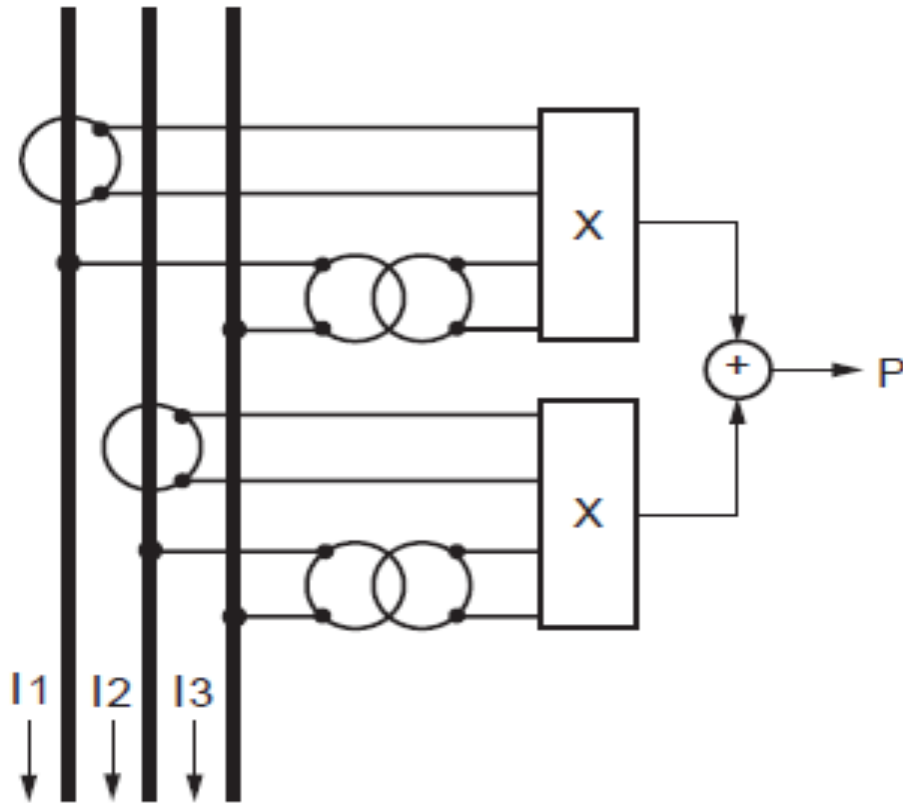


Figura 6.11. Esquema del principio de medida de una potencia.

La potencia así medida es una magnitud algebraica, cuyo signo indica el sentido de circulación de la energía. Las protecciones de potencia son pues naturalmente direccionales. Ciertos relés utilizan tres elementos de medida monofásicos para determinar la potencia. Estos relés serán, pues, utilizables en redes de 4 hilos; por el contrario, tienen el inconveniente de necesitar la instalación de 3 TT y 3 TI.

BIBLIOGRAFÍA

ABB. (2003). *Testing of Power Transformers*.

Allcock, R., & Holland, S. (May 1995). *Calculation of Zero Phase Sequence Impedance for Power Transformers using Numerical Methods*. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS VOL 31 Nº 3.

ENDESA, D. (s.f.). *Criterios de Ajuste Relés de Protección, Circuitos MT FDC 003.DOC* (1ª Edición ed.).

Fortescue, C. (1918). *Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks*. 34th Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers.

Gómez Ramírez, G. A. (s.f.). *Medición de Impedancia de Secuencia Cero en Transformadores de Potencia*.

IEEE. (2008). *IEEE Std C3791 Guide for Protecting Power Transformers*.

IEEE. (2015). *IEEE Std C57.12.90 Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, And Regulating Transformers*.

Kothari, D. P. (s.f.). *Sistemas Eléctricos de Potencia* (3ª Edición ed.). Mc Graw Hill.

ORMAZABAL. (2012). *Unidades de Protección, Medida y Control* (Versión 07 ed.). ORMAZABAL.

ORMAZABAL. (2015). *ENSAYO TRANSFORMADOR TRIFASICO DE ALTA TENSION*.

Pérez Guerrero, I., Gómez Vidal, P., Molina, P., Sánchez Martos, C., & Sánchez Sutil, F. (2011-2015). *Apuntes EPSJ*.

Ras, E. (s.f.). *Transformadores de Potencia, de Medida y Protección*. (7. Edición, Ed.) Marcombo.

Roeper, R. (1985). *Corrientes de Cortocircuito en Redes Trifásicas*. España: Marcombo.

Sorrentino, E., & Burgos, J. C. (s.f.). *Comparison of Methods for Measuring Zero Sequence Impedances in Three-phase Core Type Transformers*.

UNE. (Enero 2002). *UNE-EN-207005 Transformadores de Potencia. Guía de Aplicación*.

UNE. (Mayo 2015). *UNE-EN 60076-1 Transformadores de Potencia. Parte 1 Generalidades*.

Wang, J., & Lascu, R. (2009). *Zero Sequence Circuit of Three-Legged Core Type Transformers*. IEEE.

