

2017

**TRABAJO FIN
DE GRADO**



UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID

MODELADO MEDIANTE ATP DEL MÉTODO DE TRANSFORMADORES EN OPOSICIÓN

AUTOR: José Ángel Simón Hernández
Grado en Ingeniería Eléctrica

TUTOR: Juan Carlos Burgos Díaz
Departamento de Ingeniería Eléctrica

AGRADECIMIENTOS

Con la realización de este Trabajo Fin de Grado finalizo la etapa más feliz de mi vida hasta el momento. Han sido cuatro años de esfuerzo, dedicación y constancia para afrontar todos los retos y objetivos impuestos. Sin embargo, han sido muchas las personas que han contribuido a que haya llegado hasta esta meta profesional.

En primer lugar, tengo que destacar a mis padres, José María y María José, que sin ellos estoy seguro que nunca podría haber llegado hasta aquí. A mi madre, por todos esos días que ha soportado mi mal humor debido al agobio de las épocas de exámenes, por preocuparse siempre de que nunca me falte nada y, en definitiva, por apoyarme siempre. A mi padre, por facilitarme siempre todo, por cada uno de los días que has madrugado para llevarme y recogerme de la universidad, por ser un padre ejemplar y, sobretodo, por haberme guiado siempre por el camino correcto. Os doy las gracias por todos los valores que me habéis aportado a lo largo de mi vida.

Por supuesto, se lo tengo que agradecer a mi hermana mayor Patricia, que tengo la suerte de haber estudiado la misma carrera que ella. Para mí, siempre has sido un ejemplo a seguir y por eso tengo que darte las gracias por ofrecerme tu ayuda en todo momento, por entenderme siempre, por hacerme reír y por hacerme feliz cada día de mi vida. Cada uno de tus sabios consejos me han llevado hasta aquí y quiero que sepas que ¡eres la mejor hermana del mundo!

También quiero destacar a todos los demás miembros de mi familia, por haberos interesado siempre por mí y por todos vuestros ánimos en los peores momentos, pero en especial, me gustaría agradecerlos a vosotros, mis abuelos, Ángel y María, por todo lo que habéis hecho y estáis haciendo por mí. Gracias por esforzaros tanto en que tenga el mejor futuro posible y por decirme siempre todo lo orgullosos que estáis de mí, ¡os quiero mucho!

A ti, Roberto Prado, porque no me imagino haber llegado hasta aquí si tú no hubieses estado día a día apoyándome y aguantándome en la universidad. Desde que te conocí ese primer día de nervios en la universidad, me has enseñado el significado de la amistad verdadera. Me faltan palabras para agradecerte todo lo que has hecho por mí todos estos años. Nunca me cansaré de decirte que te quiero como a un hermano, porque considero que siempre te has portado conmigo como tal. Eres mi gran triunfo de esta etapa y recuerda que juntos ¡somos invencibles!

A mi otra guerrera, Miriam Martínez, por haber sido un pilar fundamental en mi rutina diaria, por la felicidad que me aportabas en los peores días, por entenderme con solo una mirada, por tu paciencia y, en definitiva, por sacarme siempre una sonrisa. Sin ti, y sin tus laureles, sé que tampoco hubiese llegado hasta aquí. Ahora te tengo a algunos cientos de kilómetros más, pero sé que nuestra amistad es, si cabe más fuerte que antes.

Tengo que hacer un agradecimiento especial a la persona que más me ha aguantado durante todos estos años, Jenny Sánchez, porque nunca me han faltado esos “abrazos a domicilio” que me alegraban los días, y porque siempre has estado cuando más te he necesitado. Gracias por todos y cada uno de los detalles que has tenido conmigo para verme feliz.. Este logro también es tuyo.

A David, mi “tete”, por tu generosidad y por estar siempre preocupándose por mí y mostrando interés en todo lo que concierne a mis estudios. Gracias por todos estos años de amistad, ya sabes que para mí eres muy grande y alguien imprescindible!

A todos mis amigos de siempre, los que han vivido toda una vida conmigo y los que me conocen y me quieren con mis virtudes y con mis defectos. Porque dicen que los amigos es la familia que se elige y yo sé que mi elección ha sido la mejor.

También se lo tengo que agradecer a Ángel Gómez Solanilla, del Departamento de Ingeniería Eléctrica, ya que sin su ayuda, no podríamos haber realizado todos los ensayos en el Laboratorio de Alta Tensión. Gracias por estar siempre dispuesto a ayudarnos tanto a mi tutor como a mí, a pesar de los imprevistos acontecidos.

Y por último, quiero mencionar a mi tutor, Juan Carlos Burgos Díaz, porque sin tu ayuda hubiese sido imposible llevar a cabo este Trabajo Fin de Grado. Quiero destacar tu profesionalidad, tu preocupación por tus alumnos y por todo lo que me has enseñado a lo largo de estos años de carrera.

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.2. OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO.....	16
1.3. MARCO REGULADOR.....	17
1.4. ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA.....	18
Capítulo 2: EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA.....	20
2.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	21
2.2. CONSTITUCIÓN FÍSICA.....	22
2.2.1. Arrollamientos.....	22
2.2.2. Núcleo magnético.....	23
2.2.3. Aislamiento.....	25
2.2.4 Refrigeración.....	25
2.2.5 Papel Aislante.....	28
2.3. GRUPOS DE CONEXIÓN.....	28
2.3.1. Estudio de la transformación trifásica en conexión estrella-estrella (Yy) con arrollamiento terciario.....	28
2.3.2. Estudio de la transformación trifásica en conexión triángulo estrella (Dy).....	29
2.3.3. Estudio de la transformación trifásica en conexión estrella triángulo (Yd).....	29
2.3.4. Estudio de la transformación trifásica en conexión estrella-zigzag (Yz).....	30
2.3.5. Estudio de la transformación trifásica en conexión triángulo-triángulo (Dd).....	30
2.4. CALENTAMIENTO.....	31
Capítulo 3: COMPORTAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR ANTE CARGAS DESEQUILIBRADAS.....	33
3.1. INTRODUCCIÓN.....	34

3.2. PROBLEMAS QUE PLANTEAN LAS CARGAS DESEQUILIBRADAS EN LOS TRANSFORMADORES Y Y.....	35
3.3 INFLUENCIA DE LOS ARROLLAMIENTOS DE ESTABILIZACIÓN EN EL CALENTAMIENTO DE LA CUBA ANTE CARGAS DESEQUILIBRADAS DE LOS TRANSFORMADORES ESTRELLA-ESTRELLA.....	38
3.3.1. <i>Análisis cualitativo del comportamiento ante cargas desequilibradas de los transformadores Yy con arrollamiento de estabilización.....</i>	39
3.4. TIPOS DE DESEQUILIBRIOS EN LAS REDES.....	40
Capítulo 4: ENSAYOS DE CALENTAMIENTO.....	42
4.1. PROBLEMAS A LA HORA DE REALIZAR UN ENSAYO DE CALENTAMIENTO.....	43
4.2. ENSAYO DE CALENTAMIENTO POR EL MÉTODO DE CORTOCIRCUITO....	44
4.2.1 <i>Correcciones.....</i>	46
4.3. ENSAYO DE OPOSICIÓN.....	47
4.4. ENSAYO DE CALENTAMIENTO DE LA CUBA ANTE SECUENCIA HOMOPOLAR.....	48
4.5. ENSAYO DE CALENTAMIENTO DE LA CUBA MEDIANTE EL MÉTODO DE OPOSICIÓN.....	49
Capítulo 5: ANÁLISIS MEDIANTE COMPONENTES SIMÉTRICAS.....	50
5.1. TEORÍA DE LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS.....	51
5.1.1. <i>Introducción.....</i>	51
5.1.2. <i>El operador trifásico “a”.....</i>	53
5.1.3. <i>Componentes simétricas de fasores desequilibrados.....</i>	54
5.1.4. <i>Impedancias debidas a las corrientes de diferente secuencia.....</i>	56
5.2. LA FALTA SERIE.....	58
Capítulo 6: MEDIDA DE LOS PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR.....	62
6.1. INTRODUCCIÓN.....	63
6.2. ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS IMPEDANCIAS DE UN TRANSFORMADOR.....	63
6.3. ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR.....	65

6.3.1. Ensayos de medida de impedancia homopolar en transformadores trifásicos.....	65
6.3.2. Transformadores con neutro externo disponible, a excepción de los transformadores con arrollamientos interconectados.....	66
6.3.3. Transformadores con dos neutros disponibles externamente, con excepción de los transformadores con devanados interconectados.....	67
6.3.4. Transformadores con devanados interconectados.....	69
Capítulo 7: SIMULACIONES REALIZADAS.....	74
7.1. EMTP-ATP.....	75
7.2. MÓDULOS EMPLEADOS.....	76
7.2.1. Módulo de fuente.....	76
7.2.2. Módulo de interruptor.....	78
7.2.3. Modulo de transformador.....	79
7.3. CIRCUITOS IMPLEMENTADOS.....	83
7.3.1. Implementación del Método de Oposición.....	83
7.3.2. Implementación del Método de oposición con presencia de Falta Serie.....	84
Capítulo 8: RESULTADOS.....	85
8.1. PLACA DE CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR A ENSAYAR.....	86
8.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR.....	88
8.2.1. Ensayo de vacío ante secuencia directa.....	88
8.2.2. Ensayo de cortocircuito ante secuencia directa.....	89
8.2.3. Ensayo clásico de medida de la impedancia homopolar.....	91
8.2.4. Ensayo de medida de la impedancia homopolar recomendado para transformadores con arrollamientos en zig-zag.....	92
8.3. ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE LOS TRANSFORMADORES EN AUSENCIA DE FALTA.....	94
8.3.1. Estudio de la corriente en los transformadores en función de la combinación de tomas de los transformadores.....	94
CASO 1.....	94
CASO 2.....	96
CASO 3.....	97

8.3.2. Simulación del Ensayo en oposición sin falta en función de la combinación de tomas de los transformadores.	99
CASO 1.....	99
CASO 2.....	102
CASO 3.....	103
8.4. ANÁLISIS DE LA FALTA SERIE.....	105
8.4.1. Estudio de las corrientes de secuencia y las corrientes de fase de la Falta Serie en función de la combinación de tomas de los transformadores.....	105
CASO 1.....	107
CASO 2.....	119
CASO 3.....	111
8.4.2 Simulación del Ensayo en oposición de transformadores con la presencia de Falta Serie en función de la combinación de tomas de los transformadores.....	114
CASO 1.....	114
CASO 2.....	115
CASO 3.....	116
Capítulo 9: CONCLUSIONES.....	118
9.1 RESUMEN DEL TRABAJO	119
9.2 CONCLUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	120
9.3 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.....	122
9.4 CONCLUSIONES PERSONALES.....	122
Capítulo 10: PRESUPUESTO.....	124
Capítulo 11: BIBLIOGRAFÍA.....	127
ANEXO I: Ejemplo de Reporte de solución del Método de oposición de transformadores en ATP.....	130

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Funcionamiento de un transformador [10].....	21
Figura 2.2 Tipos de Arrollamientos [10].....	23
Figura 2.3 Tipos de núcleos magnéticos [10].....	25
Figura 2.4 Refrigeración ONAN [10].....	27
Figura 2.5 Refrigeración OFAF/ODAF [10].....	27
Figura 2.6 Conexión estrella-estrella con devanado terciario [13].....	29
Figura 2.7 Conexión triángulo-estrella con devanado terciario [13].....	29
Figura 2.8 Conexión estrella-triángulo [13].....	30
Figura 2.9 Conexión estrella- zigzag [13].....	30
Figura 2.10 Conexión triángulo-triángulo [13].....	31
Figura 3.1 Descomposición de una carga desequilibrada en sistemas de secuencia [10]..	34
Figura 3.2 Flujos homopolares provocados por componentes homopolares de corrientes no compensadas [10].....	37
Figura 3.3 Diagrama fasorial de tensiones fase-neutro de un transformador con carga desequilibrada [10].....	37
Figura 4.1 Representación del Ensayo de oposición de transformadores [Elab. propia].....	47
Figura 4.2 Esquema de medida de la impedancia homopolar de un transformador estrella-estrella [11].....	48
Figura 5.1 Sistema trifásico desequilibrado y sus componentes simétricas [1].....	53
Figura 5.2 Redes de secuencia [1].....	58
Figura 5.3 Falta de circuito abierto monofásico en un sistema trifásico equilibrado [4]....	59
Figura 5.4 Conexión de las redes equivalentes de secuencia entre los puntos F y F' [4]....	60
Figura 6.2 Circuito equivalente de un transformador real [15].....	63

Figura 6.3 Ensayo de cortocircuito [18].....	65
Figura 6.4 Equivalente de la red de secuencia homopolar para transformadores con neutro disponible externamente [7].....	66
Figura 6.5 Equivalente de la red de secuencia homopolar para transformadores con dos neutros disponibles externamente [7].....	67
Figura 6.6 Equivalente de secuencia homopolar para transformadores con dos neutros disponibles externamente y desfase 0° [7].....	69
Figura 6.7 Tipo de transformador que usaba San Diego Gas&Electric [6].....	70
Figura 6.8 Conexión para realizar el ensayo de impedancia homopolar en transformadores zig-zag [6].....	71
Figura 6.9 Circuito equivalente de secuencia directa, inversa y homopolar [6].....	71
Figura 7.1 Símbolo de Fuente Senoidal en ATPDraw	77
Figura 7.2 Comportamiento en el tiempo de la Fuente Tipo Senoidal [12].....	77
Figura 7.3 Configuración en ATPDraw de una Fuente Tipo Senoidal.....	78
Figura 7.4 Interruptor trifásico controlado por tiempo.....	78
Figura 7.5 Configuración interruptor en ATPDraw.....	79
Figura 7.6 Modelo BCTRAN de transformadores en ATPDraw.....	80
Figura 7.7 Configuración modelo BCTRAN (Parte 1).....	81
Figura 7.8 Configuración modelo BCTRAN (Parte 2).....	81
Figura 7.9 Método de oposición en ATPDraw.....	83
Figura 7.10 Método de oposición en ATPDraw con la presencia de la Falta Serie.....	84
Figura 8.1 Placa de características del transformador ensayado en el Laboratorio de Alta Tensión [Foto propia].....	86
Figura 8.2 Conexión del ensayo de vacío en el Laboratorio de Alta Tensión[Foto propia].....	88

Figura 8.3 Conexión del ensayo de cortocircuito en el Laboratorio de Alta Tensión [Foto propia].....	90
Figura 8.4 Esquema de conexión de transformador zig-zag.....	91
Figura 8.5 Método de oposición en equilibrio trifásico [Elab. propia].....	94
Figura 8.6 Circuito equivalente correspondiente al CASO 1 [Elab. propia].....	94
Figura 8.7 Circuito equivalente correspondiente al CASO 2 [Elab. propia].....	96
Figura 8.8 Circuitos equivalente correspondiente al CASO 3 [Elab. propia].....	97
Figura 8.9 Circuito Método de Oposición implementado en ATPDraw.....	99
Figura 8.10-Figura 8.13 Simulaciones en ATPDraw correspondientes al CASO1	99-100-101
Figura 8.14-Figura 8.16 Simulaciones en ATPDraw correspondientes al CASO2.....	102-103
Figura 8.17-Figura 8.19 Simulaciones en ATPDraw correspondientes al CASO3.....	103-104
Figura 8.20 Método de Oposición con la presencia de Falta Serie [Elaboración propia].....	105
Figura 8.21-Figura 8.22 Resolución equivalente Thévenin del circuito [Elaboración propia].....	106
Figura 8.23 Método de Oposición con Falta Serie en ATPDraw.....	114
Figura 8.24 Simulación ATPDraw con Falta Serie en CASO 1.....	114
Figura 8.25 Simulación ATPDraw con Falta Serie en CASO 2.....	115
Figura 8.26 Simulación ATPDraw con Falta Serie en CASO 3.....	116

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Límites de calentamiento según la norma UNE-60076-2 [9].....	31
Tabla 2.2 Valores recomendados de correcciones de calentamiento [9]	32
Tabla 3.1 Influencia del arrollamiento de estabilización en transformadores estrella-estrella [11]	39
Tabla 4.1 Exponentes para las correcciones de los resultados de ensayos de calentamiento [9].....	46
Tabla 7.1 Componentes a diseñar en ATPDraw [12].....	76
Tabla 8.1 Datos de la placa del transformador ensayado en el Laboratorio de Alta Tensión [Elab. propia].....	87
Tabla 8.2 Datos de la placa del transformador referidos a la parte de Alta Tensión [Elab. propia].....	87
Tabla 8.3 Datos de la placa del transformador referidos a la parte de Baja Tensión [Elab. propia].....	88
Tabla 8.4 Datos obtenidos en el Laboratorio de Alta Tensión para el Ensayo de vacío [Elab. propia].....	89
Tabla 8.5 Resultados del Ensayo de vacío [Elab. propia].....	89
Tabla 8.6 Parámetros de la rama paralelo del circuito obtenidos mediante el Ensayo de vacío [Elab. propia].....	89
Tabla 8.7 Datos obtenidos en el Laboratorio de Alta Tensión para el Ensayo de cortocircuito para las tomas 1, 3 y 5 [Elab. propia].....	90
Tabla 8.8 Resultado del ensayo de cortocircuito [Elab. propia].....	91
Tabla 8.9 Resultados del Ensayo clásico de medida de impedancia homopolar [Elab. propia].....	92
Tabla 8.10 Resultados del Ensayo de impedancia homopolar [Elab. propia].....	93
Tabla 8.11 Impedancia homopolar correspondiente a cada toma [Elab. propia].....	93

Tabla 8.12 Datos conocidos para calcular el circuito equivalente del CASO 1 [Elab. propia].....	95
Tabla 8.13 Resultados circuito equivalente CASO 1 [Elab. propia].....	95
Tabla 8.14 Resultados corriente circuito equivalente CASO 1 [Elab. propia].....	95
Tabla 8.15 Datos conocidos para calcular el circuito equivalente del CASO 2 [Elab. propia].....	96
Tabla 8.16 Resultados circuito equivalente CASO 2 [Elab. propia].....	96
Tabla 8.17 Resultados corriente circuito equivalente CASO 2 [Elab. propia].....	96
Tabla 8.18 Datos conocidos para calcular el circuito equivalente del CASO 3 [Elab. propia].....	97
Tabla 8.19 Resultados circuito equivalente CASO 3 [Elab. propia].....	97
Tabla 8.20 Resultados corriente circuito equivalente CASO 3 [Elab. propia].....	98
Tabla 8.21 Comparación de los resultados obtenidos de los CASOS 1,2 y 3 [Elab. propia].....	98
Tabla 8.22 Impedancias a secuencia directa CASO 1 [Elab. propia].....	107
Tabla 8.23 Impedancias secuencia directa CASO 2 [Elab. propia].....	109
Tabla 8.24 Impedancias a secuencia directa del CASO 3 [Elab. propia].....	111
Tabla 8.25 Comparación de las corrientes obtenidas en cada caso [Elab. propia].....	116
Tabla 8.26 Presupuesto para la elaboración del proyecto [Elab propia].....	126

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la sociedad actual es fundamental disponer de una energía eléctrica, barata y fiable. Por ello, las empresas eléctricas de todo el mundo se esfuerzan en mejorar la fiabilidad de los sistemas eléctricos y en reducir los costes del sistema.

Los transformadores son uno de los equipos eléctricos más caros de un sistema eléctrico, sólo superados por los generadores de las centrales eléctricas. Por ello, las iniciativas que contribuyan a una reducción en el coste de los mismos son especialmente bienvenidas.

Además, los transformadores son elementos críticos en el sistema porque por ellos pasa prácticamente toda la energía que se produce en las centrales eléctricas y se consume en los grandes centros de consumo. Por ello, conservar e incluso aumentar la fiabilidad de los transformadores es un requisito indispensable.

El transformador estrella-estrella (abreviadamente Yy o YNyn, si ambos neutros están puestos a tierra) es un transformador que posee unas características inigualables como transformador de red, tales como la posibilidad de poner a tierra el neutro del primario y del secundario, el tener un desfase nulo entre las tensiones de primario y secundario, la posibilidad de poner el cambiador de tomas en carga del transformador en el extremo de neutro del arrollamiento, etc. Sin embargo, en ciertos casos el transformador estrella-estrella se comporta muy mal tanto en vacío como con carga desequilibrada. Aunque este mal funcionamiento depende muy estrechamente del tipo de núcleo (transformadores acorazados y bancos de transformación a base de transformadores monofásicos) y de la forma de puesta a tierra del neutro del primario y del secundario, muchas compañías de todo el mundo extrapolan el mal funcionamiento de la conexión estrella-estrella a todos los tipos de transformadores (incluso a los transformadores estrella-estrella de núcleo trifásico con ambos neutros puestos a tierra o con ambos neutros aislados) y no utilizan transformadores estrella-estrella en ningún caso. En su lugar utilizan transformadores estrella-estrella-triángulo (Yyd).

Sin embargo, la inclusión de un arrollamiento terciario en triángulo (también llamado arrollamiento de estabilización) encarece el transformador y reduce su fiabilidad (ya que la corriente de cortocircuito asimétrica fase-neutro de un transformador Yyd es bastante mayor que la de un transformador Yy) e incrementa el precio del transformador (ya que el

arrollamiento requiere un cierto volumen de cobre, unas bornas de salida de las conexiones a la tapa del transformador, etc).

Recientemente, algunos autores [11] abogan por prescindir de los arrollamientos terciarios en ciertos casos, por ejemplo, en transformadores con núcleo magnético de columnas en los que el tratamiento de los neutros de primario y secundario sea idéntico (ambos aislados o ambos puestos a tierra). Sin embargo, el gran problema de los transformadores Yy es la aparición de flujos homopolares que cierran su camino a través de la cuba en el caso de que las componentes homopolares de corriente de primario y de secundario no estén perfectamente balanceadas. Por ello, cuando se fabrica un transformador Yy sin arrollamiento terciario es preciso comprobar mediante ensayos en fábrica que el calentamiento de la cuba es admisible.

El problema es que en el laboratorio del fabricante no se dispone de grandes potencias con las que ensayar un transformador, por lo que hay que limitarse a realizar ensayos que requieran poca potencia, tales como los ensayos de vacío y de cortocircuito. Por ello, para comprobar si el calentamiento de la cuba es admisible cuando se prescinde del arrollamiento terciario, se recurre a ensayos de vacío y/o de cortocircuito (depende de la forma de conexión de los neutros de primario y de secundario).

Aunque estos ensayos de vacío y de cortocircuito dan una primera indicación de si el calentamiento de la cuba es elevado o no, lamentablemente estos ensayos no reproducen las condiciones que se tienen en un transformador en campo, pues en campo en caso de faltas en la red el transformador está sometido a unas corriente de secuencia directa, unas corrientes de secuencia inversa y una corriente de secuencia homopolar.

Por ello, sería muy interesante disponer de un ensayo que demuestre de una forma más próxima a la realidad si el transformador es apto para soportar los calentamientos producidos por el conjunto de corrientes de secuencia que se derivan de un fallo en la red.

Este ensayo puede ser el Ensayo de Oposición contemplado por la norma IEC 60076-2. En este ensayo se precisan dos transformadores que trabajan con sus primarios unidos entre sí y con sus secundarios entre sí, y se hace circular corriente entre ellos variando la relación de transformación de los transformadores gracias al cambiador de tomas.

En el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid se planteó la posibilidad de realizar un pequeño prototipo de demostración del ensayo, utilizando transformadores de muy pequeña potencia. Sin embargo, a priori se desconocía si el margen de regulación de los transformadores era adecuado para realizar el ensayo. Por ello, se planteó este Trabajo Fin de Grado en el cual se simula el funcionamiento de los transformadores en estas condiciones.

Una falta derivación (falta a tierra) es fácil de detectar por las protecciones, debido a que las corrientes que se producen tienen un gran valor. Sin embargo, una falta serie (o de circuito abierto) es mucho más complicada de detectar por las protecciones. Por ello, el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Carlos III de Madrid también tuvo la propuesta de realizar una variante del Ensayo de Oposición. Esta propuesta consiste en eliminar una de las fases de conexión entre los secundarios de los transformadores creando así una falta serie. De esta forma, intervienen las corrientes de secuencia directa, inversa y homopolar como puede ocurrir en un transformador en campo y así se puede analizar el calentamiento de la cuba durante este proceso, por lo que dicha propuesta se asemeja en gran medida a lo que ocurre en la realidad.

1.2 OBJETIVOS DEL TRABAJO FIN DE GRADO

Los objetivos principales de este Trabajo Fin de Grado son los siguientes:

- Simular las condiciones en las cuales trabajan los transformadores durante el ensayo de oposición y comprobar si el margen de regulación de tensión de los transformadores es adecuado para este ensayo.
- Simular las condiciones en las cuales trabajan los transformadores en el ensayo de oposición propuesto, en el cual sólo se conectan dos fases del secundario de los transformadores y comprobar si el margen de regulación de tensión de los transformadores es adecuado para conseguir una corriente del orden de la nominal del transformador en este ensayo.

Para estas simulaciones se utilizará una herramienta ampliamente extendida en el sector eléctrico, como es el entorno de simulación ATPDraw.

Dado que uno de los objetivos importantes del Trabajo Fin de Grado es comprobar si es posible conseguir durante el ensayo que circule una corriente próxima a la asignada, es

importante trabajar con datos reales de las impedancias del transformador. Por eso se realizaron ensayos en el laboratorio para obtener dichos parámetros.

El transformador disponible en el laboratorio de Alta Tensión del Departamento de Ingeniería Eléctrica está en conexión Yz (zigzag). Sin embargo, al documentar los resultados de los ensayos nos percatamos de que la norma IEEE C57.12.90 alerta sobre el hecho de que el ensayo convencional de medida de la impedancia homopolar arroja resultados erróneos y propone un nuevo ensayo de medida de la impedancia homopolar que difiere del propuesto para los transformadores sin arrollamientos en zigzag (interconectados). Por eso se plantean los siguientes objetivos:

- Realizar los ensayos de vacío y cortocircuito clásicos para obtener las impedancias de secuencia directa del transformador.
- Realizar el nuevo ensayo propuesto por la norma IEEE. A diferencia de los ensayos a secuencia directa anteriormente mencionados, la realización de este ensayo no es inmediata, porque la norma no define con gran precisión el ensayo, con lo que previo a realizar el ensayo hay que realizar un análisis teórico del mismo para conocer la forma de conectar los aparatos de medida durante este ensayo.

1.3 MARCO REGULADOR

Los ensayos de los transformadores de potencia se rigen por las normas de la Comisión Electrotécnica Internacional IEC, y en particular por la norma IEC-60076. Esta norma tiene diferentes partes. De entre estas partes son de particular interés la norma IEC 60076-1 (Generalidades) y la norma IEC 60076-2 (Calentamiento de transformadores sumergidos en líquido).

Las normas internacionales en ocasiones no son suficientemente explícitas sobre determinados aspectos. En este sentido, en algunas ocasiones las normas norteamericanas son más explícitas. Estas normas son el Std. IEEE C57. Entre ellas cabe destacar la norma IEEE C57.12.90 que regula la forma de realizar los ensayos de determinación de las impedancias del transformador incluyendo las impedancias de secuencia homopolar.

1.4 ORGANIZACIÓN DE LA MEMORIA

Desde el Capítulo 1 hasta el Capítulo 4 se explicarán los principios básicos de un transformador de potencia, así como su constitución física, grupos de conexión y normativa de calentamiento. También se tratará el comportamiento de un transformador ante cargas desequilibradas y los ensayos de calentamiento de transformador que se pueden realizar.

En el Capítulo 5, se explicará la Teoría de las Componentes Simétricas y también se describirá la Falta Serie. Este capítulo es necesario para poder entender los resultados obtenidos del caso del Método de oposición con Falta Serie en el Capítulo 8.

En el Capítulo 6 se explicarán los diferentes ensayos que se van a realizar en el Laboratorio de Alta Tensión para obtener los parámetros del transformador. Es decir, se describirán los pasos a seguir, la colocación de los voltímetros, amperímetros... Los resultados de todos estos ensayos se presentarán en el Capítulo 8.

En el Capítulo 7 se explicará el funcionamiento del programa ATPDraw con el que posteriormente se realizarán las simulaciones del Método de oposición de transformadores. Se presentarán los elementos que forman parte de dicho método y también se definirán los pasos para configurar dichos elementos en el programa. Las simulaciones realizadas se encuentran en el Capítulo 8.

El Capítulo 8 se estructura en tres partes:

- En primer lugar, se expondrán los resultados obtenidos de los diferentes ensayos llevados a cabo en el Laboratorio de Alta Tensión (ensayos de vacío, cortocircuito, impedancia homopolar...).
- En segundo lugar, una vez obtenidos todos los parámetros del transformador, se realizará un estudio teórico del funcionamiento del Método de oposición sin presencia de Falta Serie para después compararlo con el resultado de las simulaciones obtenidas del programa ATPDraw.
- Y por último, se realizará el estudio teórico del funcionamiento del Método de oposición con presencia de Falta Serie para luego compararlo con las simulaciones obtenidas con el programa ATPDraw.

En el Capítulo 9 se expondrán las conclusiones obtenidas de los resultados del Capítulo 8. También se realizará una conclusión personal sobre este Trabajo Fin de Grado y un breve resumen de éste.

Por último en el Capítulo 10 contiene el presupuesto estimado para llevar a cabo este Trabajo Fin de Grado.

Capítulo 2

EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

2.1 PRINCIPIO BÁSICO DE FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR

Un transformador es un aparato que trasvasa la energía eléctrica entre dos sistemas con diferente nivel de tensión [10].

Exceptuando algunas aplicaciones que trabajan en régimen transitorio, los transformadores solo trabajan como tal en corriente alterna. La onda de corriente alterna viene caracterizada por su valor eficaz, su frecuencia y su desfase respecto de la referencia. El transformador modifica sólo el valor eficaz de la onda sin alterar ni la frecuencia ni el desfase [10].

Un transformador está compuesto, como mínimo, por un núcleo magnético y por dos o más arrollamientos como podemos observar en la figura 2.1:

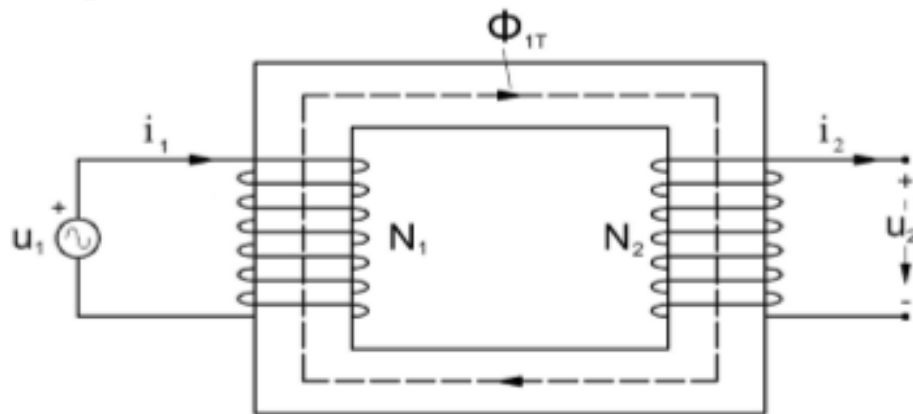


Figura 2.1: Esquema del funcionamiento de un transformador [10].

Aunque no es una expresión completamente correcta, se puede decir que el arrollamiento primario crea un flujo sinusoidal. Cuando este flujo variable en el tiempo atraviesa el arrollamiento secundario engendra en él una f.e.m (fuerza electromotriz) representada en la ecuación 2.1:

$$u_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

(Donde N es el número de arrollamientos, y ϕ es el flujo variable que engendra la f.e.m)

Esta f.e.m puede ser aplicada a una carga, de modo que circule por ella una intensidad y se transmita potencia a la carga [10].

2.2 CONSTITUCIÓN FÍSICA

2.2.1 ARROLLAMIENTOS

Los arrollamientos son los encargados de tomar la energía del sistema eléctrico de alimentación (arrollamiento primario) y entregársela al sistema eléctrico de salida (arrollamiento secundario) [10].

Habitualmente, los arrollamientos se forman mediante un hilo o pletina de cobre arrollada sobre un carrete aislante. En muchas ocasiones, también se usa aluminio como conductor para ahorrar costes. La elección de las dimensiones de la pletina (alto y ancho) puede parecer un problema trivial a personas no expertas en transformadores, pero sin embargo, tiene una importancia fundamental a la hora de que el transformador tenga unas pérdidas de potencia activa reducidas y una resistencia mecánica para soportar los esfuerzos de cortocircuito [10].

Cuando por los arrollamientos circula una corriente se producen unas pérdidas de potencia activa (pérdidas por efecto Joule), que se definen en la ecuación 2.2 [10]:

$$P_J = RI^2 = \rho \frac{l}{s} I^2 = \rho \delta^2 V_{CU} \quad (2.2)$$

(Donde s es la sección del conductor, ρ es la resistividad del cobre, δ la densidad de corriente y V_{CU} el volumen de cobre) [10].

En los arrollamientos con núcleo de columnas, los arrollamientos primario y secundario son cilindros concéntricos como podemos ver en la Figura 2.2 a . En los transformadores con tensiones elevadas, el aislamiento de los arrollamientos constituye un problema importante.

En los transformadores de núcleo acorazado, los arrollamientos están compuestos por galletas de forma rectangular paralelas como podemos ver en la Figura 2.2 b.:

Los tipos de núcleo magnético se representan en la Figura 2.2:

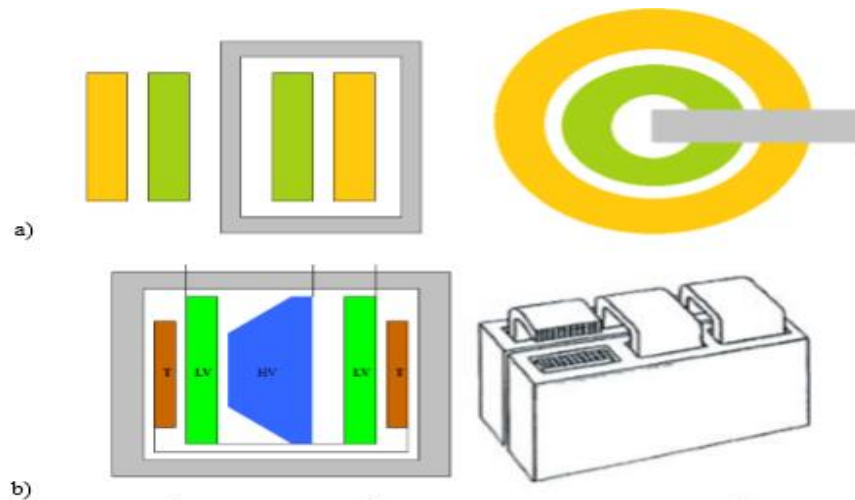


Figura 2.2: a) Arrollamientos concéntricos en un transformador de columnas (Izquierda semisección, derecha planta)

b) Arrollamientos alternados en un transformador acorazado (Izquierda disposición de los arrollamientos dentro de la ventana, derecha vista en perspectiva [10].

2.2.2 NÚCLEO MAGNÉTICO

El trasvase de energía entre los arrollamientos de un transformador se realiza a través del flujo magnético. El núcleo magnético es el encargado de canalizar el flujo desde el arrollamiento primario al secundario. Para ello el núcleo magnético está compuesto por un material de baja reluctancia [10].

El núcleo magnético es recorrido por un flujo magnético variable en el tiempo y en él se inducen f.e.m. Además, como el núcleo magnético está formado por un material conductor, estas f.e.m dan origen a corrientes parásitas o también llamadas corrientes de Foucault [10], que vienen representadas la ecuación 2.3:

$$P_{Fo} = R_{Fe} I_{Fo}^2 \frac{U_{Fo}^2}{R_{Fe}} \quad (2.3)$$

Donde R_{Fe} es la resistencia que opone el hierro al paso de corrientes y U_{Fo} , la f.e.m que da lugar a las corrientes de Foucault [10].

El valor eficaz de la tensión inducida depende del producto de la frecuencia por la inducción:

$$U_{Fo} = 4,44 \cdot f \cdot \phi = 4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_{Fe} \quad (2.4)$$

Por tanto, de las ecuaciones (2.3) y (2.4) se obtiene la ecuación (2.5):

$$P_{Fe} = \frac{U^2}{R_{Fe}} = \frac{(4,44 \cdot f \cdot B \cdot S_{Fe})^2}{\rho_{Fe} \frac{l_{Fe}}{S_{Fe}}} = K_{Fo} \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot V_{Fe} \quad (2.5)$$

Donde V_{Fe} es el volumen del hierro del transformador.

De la ecuación anterior se puede observar que si se desean reducir las pérdidas de potencia activa debe aumentar la resistencia del hierro al paso de corriente. Una primera forma de hacer eso es utilizando chapas magnéticas con un cierto porcentaje en silicio. [10]. Este porcentaje suele ser de un 3% ya que el silicio hace más quebradizas las chapas magnéticas. El uso de chapas magnéticas con silicio tiene la ventaja de que el silicio retarda el envejecimiento de la chapa magnética, reduce la magnetoestricción (y con ello el ruido del transformador) y hace más afilado el ciclo de histéresis con lo que las pérdidas por histéresis son menores [10].

Para aumentar la resistencia del hierro al paso de corriente, el núcleo magnético se forma apilando chapas magnéticas. Si no se aíslan las chapas entre sí, las corrientes de Foucault se comunicarían de una chapa a la contigua. Por ello, cuando se fabrican las chapas magnéticas se da un tratamiento químico superficial a las chapas (fosfatado) que las aísla eléctricamente [10].

Además de producir pérdidas de potencia activa (y con ello generación de calor), las corrientes de Foucault tienen otro inconveniente, y es que se oponen al flujo que las produjo con lo que en el interior del núcleo magnético el flujo es menor que en el borde del mismo. Al utilizar chapas magnéticas, en cada una de ellas se produce este apantallamiento magnético, pero en menor medida. Por eso, utilizando chapas magnéticas para una sección geométrica dada, la sección útil del núcleo es mayor [10].

En la Figura 2.3 se muestran los tipos de núcleos magnéticos para transformadores trifásicos. El más utilizado es el 2.3 a) (Transformador de columnas) y los tipos 2.3 b)

(transformador de cinco columnas) y 2.3 c) se utilizan en transformadores grandes cuando hay problemas de transporte.

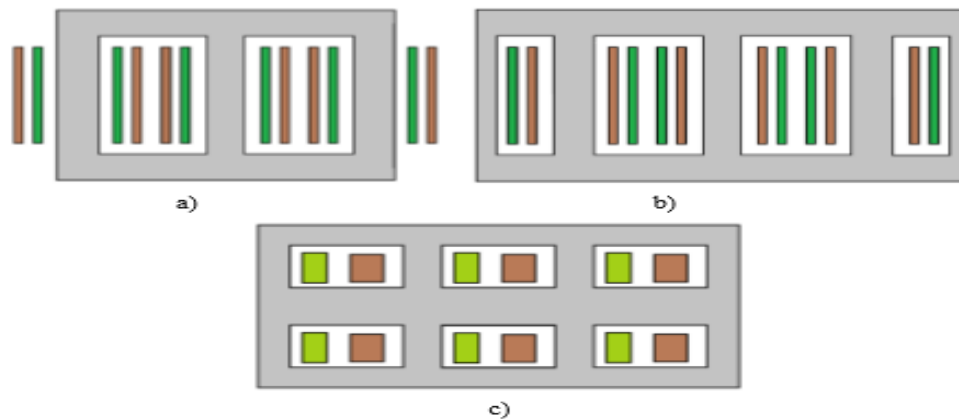


Figura 2.3: Tipos de núcleos magnéticos para transformadores trifásicos [10].

2.2.3 AISLAMIENTO

El aislamiento es lo que garantiza que las diferentes partes de un equipo eléctrico se encuentran a diferente potencial. Por tanto, un equipo eléctrico no podría funcionar si el aislamiento no es adecuado [10].

En transformadores de bajas tensiones, los hilos de cobre están aislados por un barniz o esmalte. Para los de altas tensiones, el aislamiento se realiza mediante papel impregnado en aceite [10].

2.2.4 REFRIGERACIÓN

La vida de un aislamiento depende de la temperatura. Si se desea que un transformador dure mucho tiempo es preciso mantener la temperatura acotada [10].

La ecuación que rige el calentamiento de un cuerpo expresa que una parte del calor que se genera se almacena en el cuerpo, incrementando de este modo su temperatura, y otra parte se transmite al exterior ya sea por conducción, radiación o convección [10].

$$Q_{gen} = Q_{almacenado} + Q_{disipado} \quad (2.6)$$

Suponiendo, por simplicidad que el calor disipado lo es sólo por convección o conducción, se puede escribir para un incremento de tiempo Δt la ecuación (2.7)

$$P_{gen} \cdot \Delta t = m \cdot c_e \cdot \Delta t + k \cdot A \cdot (T - T_a)^n \cdot \Delta t \quad (2.7)$$

Donde P_{gen} son las pérdidas de potencia activa en el cuerpo, que se convierten en calor, m la masa del transformador, c_e el calor específico, k el coeficiente de película (que depende de la velocidad del fluido refrigerante y de su viscosidad), A el área a través de la cual se evacua el calor, T_a la temperatura ambiente y T la temperatura del aceite.

Las pérdidas de potencia activa (tanto en cobre como en hierro) dependen del volumen (como hemos visto anteriormente) de dichos materiales en el transformador, mientras que el calor disipado al exterior depende del área. Cuando el tamaño de un cuerpo crece, el volumen lo hace con la tercera potencia de las dimensiones, mientras que la superficie de evacuación del calor lo hace con el cuadrado de las dimensiones. Por eso, los cuerpos grandes tienen más problemas de refrigeración que los pequeños [10].

Los transformadores pequeños (hasta 30 MVA) se pueden refrigerar por aire. Sin embargo, en los transformadores grandes el aire no es un medio adecuado para evacuar el calor al exterior, por lo que están inmersos en una cuba donde son refrigerados por aceite mineral [10].

En los casos que se requiera una mejor refrigeración se dispone de sistemas de circulación del aceite y del aire. El aceite puede circular de forma natural por la diferencia de densidad o puede estar forzado por una bomba. Para denotar el tipo de sistema de refrigeración del que dispone un transformador existe un código de cuatro letras [10]:

Las dos primeras hacen referencia al refrigerante empleado en el interior del transformador, pudiendo ser aire, aceite, líquido refrigerante o gas (A, O, L o G); y el tipo de circulación del mismo, siendo natural, forzado o dirigido (N, F, D). Las dos últimas hacen referencia al refrigerante en contacto con la superficie exterior del transformador y al tipo de circulación del mismo [10].

Los tipos de refrigeración de transformadores se exponen en las Figuras 2.4 y 2.5:

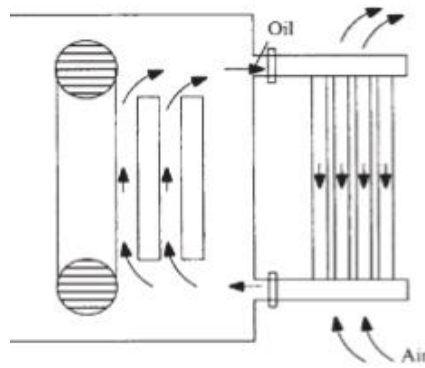


Figura 2.4: Refrigeración ONAN

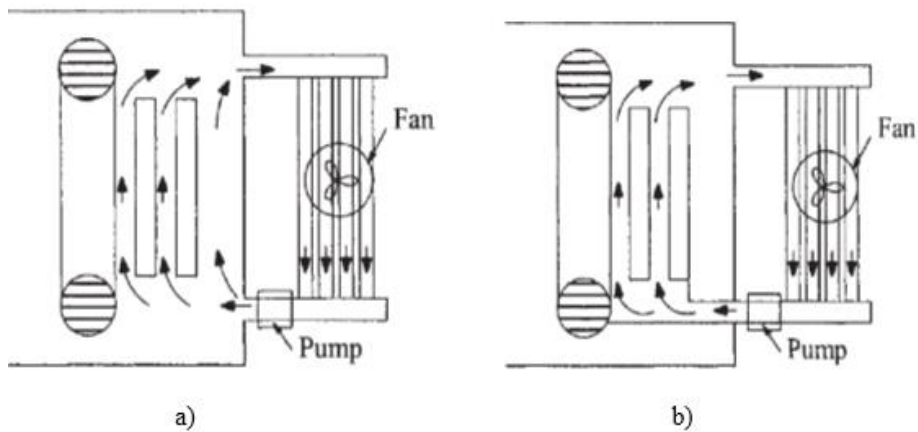


Figura 2.5: a) Circulación de aceite forzada (OFAF), b) Circulación de aceite dirigida (ODAF).

(Como se observa, cuando la circulación no es dirigida existe un cierto flujo de aceite que circula por el exterior de los arrollamientos) [10].

Por tanto, el transformador ONAN (Figura 2.4) está refrigerado en su interior por aceite mineral, que circula de forma natural (diferencia de densidad) y en su exterior por aire, que circula de forma natural. Un transformador ODAF (Figura 2.5 b)) está refrigerado por aceite en su interior, que circula de forma dirigida a los arrollamientos, y en su exterior por aire, que circula de manera forzada por ventiladores [10].

Dependiendo del sistema de refrigeración del que se disponga, se podrá someter al transformador a una sobrecarga mayor o menor. Por el contrario, a igualdad de sobrecarga, el tiempo durante el cual se puede soportar esa sobrecarga es distinto según sea el sistema de refrigeración. Este es el caso cuando disponemos de dos transformadores, el primero de ellos ONAN y el segundo ODAF. Si la sobrecarga a la que

están sometidos es idéntica y de valor 1,4 el valor de la carga nominal de cada uno de ellos, el primero de los transformadores podrá soportar dicho valor de carga durante un tiempo muy inferior al segundo. Esto se debe a que en la primera máquina se alcanzarán temperaturas elevadas en un tiempo muy corto, que de ser soportadas durante mucho tiempo serían perjudiciales para las diferentes partes que lo componen [10].

2.2.5 PAPEL AISLANTE

Los transformadores de gran potencia utilizan como aislante dieléctrico el papel. El papel que se utiliza es conocido como “pressboard”. Se trata de un cartón prensado con pulpas de madera mediante el proceso Kraft. Este proceso proporciona una excelente impregnación del aceite, lo que implica un muy buen rendimiento en los campos eléctricos [10].

Este papel aislante se utiliza para envolver los conductores para aislar los arrollamientos entre sí formando un cilindro alrededor de ellos [10].

2.3 GRUPOS DE CONEXIÓN

Las conexiones utilizadas en la práctica están normalizadas en grupos de conexión. El grupo de conexión caracteriza las conexiones de los dos arrollamientos y el desfase entre las fuerzas electromotrices correspondientes a ambos arrollamientos.

2.3.1 Estudio de la transformación trifásica en conexión estrella-estrella (Yy) con arrollamiento terciario

La conexión estrella-estrella tiene la gran ventaja de disminuir la tensión por fase del transformador, pero presenta inconveniente cuando las cargas no están equilibradas. Para eliminar estos inconvenientes, se dispone de un arrollamiento terciario el cual está conectado en triángulo y cerrado en cortocircuito sobre sí mismo. Las fuerzas electromotrices, primarias y secundarias, debidas a esta sobrecarga, se compensan en cada columna, con lo que desaparecen los flujos adicionales, y con ellos, los inconvenientes que resultaban de las cargas desequilibradas [13]. El devanado terciario puede utilizarse para suministrar cargas locales con la tensión conveniente. Puede alimentar circuitos de

control y las instalaciones auxiliares en las estaciones transformadoras [13]. Esta conexión se representa en la Figura 2.6:

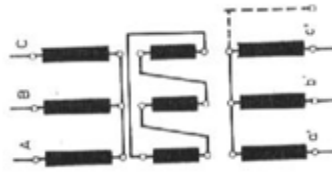


Figura 2.6: Transformador trifásico en conexión estrella-estrella con devanado terciario [13].

2.3.2 Estudio de la transformación trifásica en conexión triángulo estrella (Dy)

Este sistema de conexión es el más utilizado en los transformadores elevadores de principio de línea, es decir en los transformadores de central. En el caso de cargas desequilibradas no provoca la circulación de flujos magnéticos por el aire, ya que el desequilibrio se compensa magnéticamente en las tres columnas [13]. Como se puede disponer de neutro en el secundario, es posible aplicar este sistema de conexión a transformadores de distribución para alimentación de redes de media y baja tensión con cuatro conductores [13]. Esta conexión se representa en la Figura 2.7:

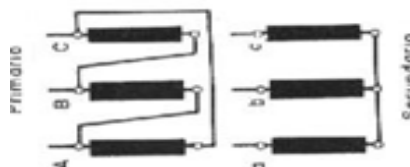


Figura 2.7: Transformador trifásico en conexión triángulo-estrella [13].

2.3.3 Estudio de la transformación trifásica en conexión estrella triángulo (Yd)

El empleo más frecuente y eficaz de este tipo de conexión es en los transformadores reductores para centrales, estaciones transformadoras y finales de línea conectando en estrella el lado de alta tensión y en triángulo el lado de baja tensión [13].

En lo que se refiere al funcionamiento con cargas desequilibradas, el desequilibrio de cargas secundarias, se transmite al primario en forma compensada para cada fase [13]. La conexión se representa en la Figura 2.8:

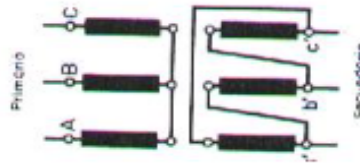


Figura 2.8: Transformador trifásico en conexión estrella triángulo [13].

2.3.4 Estudio de la transformación trifásica en conexión estrella-zigzag (Yz)

Para evitar el inconveniente de cargas desequilibradas se conecta el arrollamiento secundario en zigzag. Esta conexión consiste en hacer que la corriente circule por cada conductor activo del secundario, afecte siempre igual a dos fases primarias. Estas corrientes se compensan mutuamente con las del secundario [13]. Este tipo de conexión se emplea para transformadores reductores de distribución, de potencia hasta 400 KVA; para mayores potencias resulta más favorable el transformador conectado en triángulo estrella [13]. La conexión se representa en la Figura 2.9:

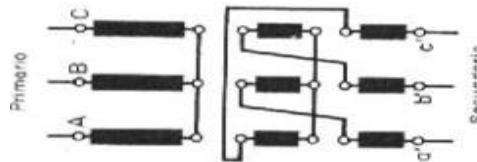


Figura 2.9: Transformador trifásico en conexión estrella zig-zag [13].

2.3.5 Estudio de la transformación trifásica en conexión triángulo-triángulo (Dd)

- Los terminales de la red primaria y secundaria pueden ser homólogos o de opuesta polaridad.
- La sucesión de estos terminales en el circuito interno puede ser la misma para ambos inversa.

Cada aislamiento debe soportar la tensión total de la línea correspondiente y, si la corriente es reducida, resulta un número elevado de espiras, de pequeña sección [13].

Si se interrumpe un arrollamiento, el transformador puede seguir funcionando aunque a potencia reducida, con la misma tensión compuesta y con una intensidad de línea a la que permite una sola fase. Se limita a transformadores de pequeña potencia para alimentación de redes de baja tensión, con corrientes de línea muy elevadas por la ausencia de neutro en ambos arrollamientos [13].

La conexión se representa en la Figura 2.10:

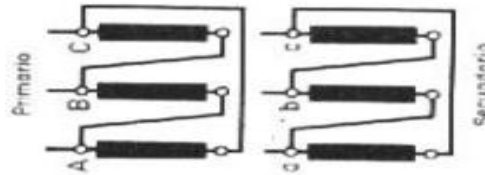


Figura 2.10: Transformador trifásico en conexión triángulo-triángulo [13].

2.4 CALENTAMIENTO

En el apartado 2.2.4 se han descrito los diferentes métodos de refrigeración de los transformadores. Es muy importante que los transformadores tengan un correcto sistema de refrigeración acorde a su potencia para no sobrepasar ciertos niveles de calentamiento. Estos límites están normalizados y si son sobrepasados el transformador sufrirá daños severos, y por lo tanto, un envejecimiento progresivo.

Los límites de calentamiento mencionados anteriormente vienen recogidos en la norma IEC-60076-2. La Tabla 2.1 representada a continuación, muestra los límites de calentamiento y, si no se acuerda de otro modo entre fabricante y comprador, es válida tanto para papel mejorado térmicamente como para papel Kraft [9].

Requisitos para	Límites de calentamiento K
Líquido aislante en la parte superior	60
Arrollamiento medio (por variación de resistencia del arrollamiento):	
– Sistemas de refrigeración ON ... y OF ...	65
– Sistema de refrigeración OD ...	70
Punto caliente del arrollamiento	78

Tabla 2.1: Límites de calentamiento según la norma UNE-60076-2 [9]

Estos límites se refieren a condiciones estables bajo potencia asignada continua, y 20°C de temperatura media anual del medio refrigerante externo [9].

Sin embargo, si la temperatura del medio refrigerante externo supera uno o más los valores normales (es decir, que la temperatura supere los 20°C), los límites de calentamiento indicados en la Tabla 2.1 se deben corregir por el mismo valor que el exceso [9]. Los valores obtenidos se deben redondear al número entero más próximo de grados

Kelvin. Los valores de referencia de temperatura ambiente recomendados y las correcciones del límite de calentamiento pertinentes se proporcionan en la Tabla 2.2:

Temperaturas ambiente °C			Corrección del calentamiento K ^a
Media anual	Media mensual	Máxima	
20	30	40	0
25	35	45	-5
30	40	50	-10
35	45	55	-15

^a Referidos a los valores proporcionados en la tabla 1.

Tabla 2.2: Valores recomendados de correcciones de calentamiento [9]

Cuando los límites de calentamiento especificados de un transformador se hayan reducido, sea por una temperatura del medio de refrigeración elevada, o por la altitud elevada de la instalación, esto se debe indicar en la placa de características [8].

En la norma se describen los ensayos que se deben realizar para comprobar que no se sobrepasen las temperaturas mencionadas en un transformador que se entrega a un cliente después de haber sido construido.

Capítulo 3

COMPORTAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR ANTE
CARGAS DESEQUILIBRADAS

3.1 INTRODUCCIÓN

Se dice que un sistema trifásico se encuentra en régimen desequilibrado cuando las tensiones o corriente en las diferentes fases no son iguales ni se encuentran desfasadas 120° . El funcionamiento de un sistema en régimen desequilibrado provoca un aumento de pérdidas en el mismo, sobretensiones en algunas de las fases y una disminución del par motor en los motores eléctricos [10].

En el caso particular de los transformadores de potencia, las cargas desequilibradas se traducen en uno o varios de los siguientes fenómenos: un desequilibrio entre las corrientes de las diferentes fases, una infrautilización del transformador, un aumento de las pérdidas, que conlleva un mayor calentamiento y un menor rendimiento y un desequilibrio de las tensiones simples que puede traducirse en sobretensiones importantes [10].

El comportamiento de un transformador ante cargas desequilibradas depende de la forma de conexión de los arrollamientos (estrella o triángulo), del tipo de núcleo magnético, de si el neutro del transformador está puesto a tierra y del tipo de desequilibrio de carga (desequilibrios fase-fase ó desequilibrios fase-neutro) [10].

El caso más problemáticos de cargas desequilibradas en transformadores es el desequilibrio de carga entre fase y neutro en transformadores Yyn sin neutro de retorno en el lado de alimentación, debido a que se crearán sobretensiones en algunas fases del transformador que padecen las cargas conectadas al mismo. El problema es muy severo si se trata de un banco de transformación, un transformador acorazado o un transformador de cinco columnas y es menos severo si se trata de transformadores de tres columnas [10].

El presente Trabajo Fin de Grado hace referencia a los transformadores de tres columnas, por eso en los siguientes apartados sólo se expondrá el funcionamiento de los transformadores Yyn de núcleo trifásico con carga desequilibrada fase-neutro

3.2 PROBLEMAS QUE PLANTEAN LAS CARGAS DESEQUILIBRADAS EN LOS TRANSFORMADORES YN

El caso más simple de desequilibrio de carga se da cuando un transformador alimenta una única carga conectada entre una de sus fase y el neutro [10].

Para comprender como se comporta un transformador Yyn de núcleo trifásico en estas condiciones, descompondremos el sistema de corrientes en sus tres componentes: secuencia directa, secuencia inversa y secuencia homopolar y obtendremos la corriente que circula por el primario por el método de superposición [10].

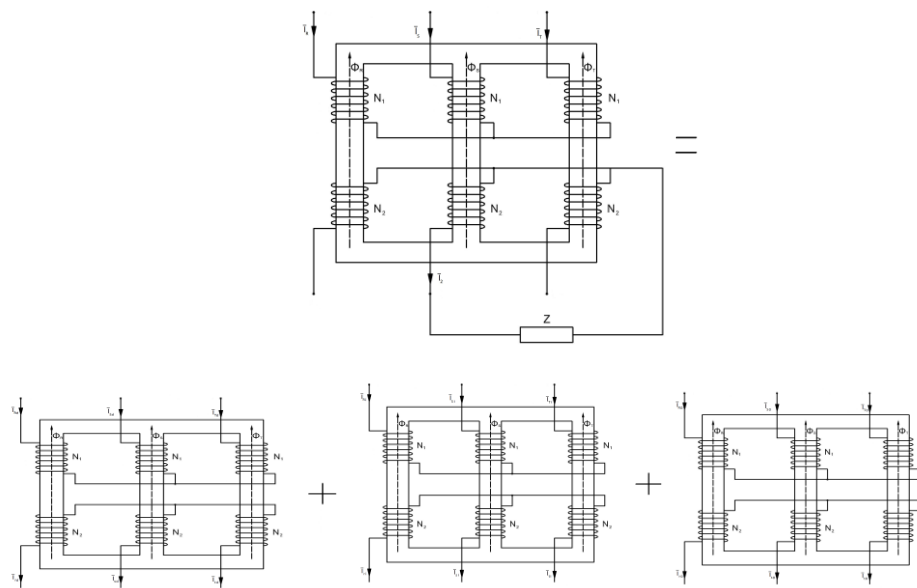


Figura 3.1: Descomposición de una carga desequilibrada en tres sistemas equilibrados de secuencias directa, inversa y homopolar. Para mayor claridad se ha supuesto que sólo una fase del transformador está cargada mientras las otras dos permanecen a circuito abierto [10].

El sistema de secuencia directa del secundario hará que el transformador tome de la red una corriente para compensar los amperios-vuelta aportados por la corriente secundaria [10]. Esta corriente se expone en la ecuación 3.1:

$$\bar{I}_{Rd} = \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_{rd} + \bar{I}_0 \quad (3.1)$$

De la misma forma, el transformador tomará un sistema de corrientes de secuencia inversa para contrarrestar los amperios-vuelta del secundario [10].

Esta corriente se expone en la ecuación 3.2:

$$\bar{I}_{Ri} = \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_{ri} \quad (3.2)$$

Sin embargo, si en el arrollamiento primario no se ha extraído un hilo de neutro, no es posible que por el primario circule una corriente de secuencia homopolar, ya que, ante la secuencia homopolar las tres fases del primario es como si fueran una sola y el retorno de las corrientes se produce por el neutro [10].

En estas circunstancias, esta corriente homopolar secundaria que no ha sido compensada por el arrollamiento primario se convierte en una corriente de excitación que crea un flujo idéntico en las tres fases del transformador (una componente homopolar de flujo) que se suma a la componente de secuencia directa [10].

Los flujos homopolares son tres sinusoides idénticas que circulan por cada columna del transformador, pero dado que la tercera ley de Maxwell indica que las líneas de inducción deben ser cerradas, al confluir los tres flujos en la culata del transformador, los flujos saltan por el aire y cierran su camino por la cuba del transformador (Figura 3.2).

Al presentarse esta situación, se produce un aumento de las pérdidas en la cuba, ya que ésta no está fabricada de chapa magnética al silicio ni tiene un espesor tal que permita minimizar las pérdidas por corrientes de Foucault. Estas pérdidas en la cuba reducen el rendimiento del transformador y pueden provocar la aparición de puntos calientes que descompongan el aceite del transformador generando gases [10]. Si esto ocurre, el ingeniero de mantenimiento pierde un importante indicativo como es el análisis de gases disueltos en el aceite que es el que nos ayuda a conocer el estado en el que se encuentra el transformador [10].

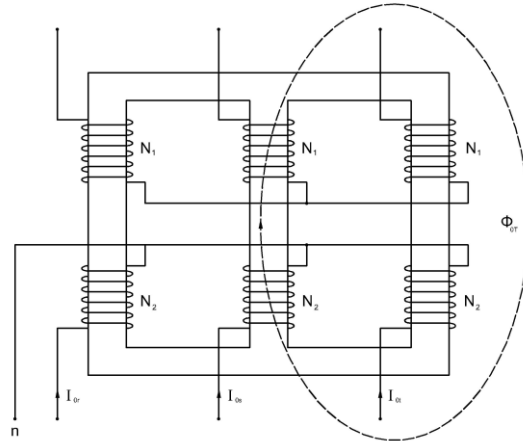


Figura 3.2: Flujos homopolares provocados por la existencia en uno de los arrollamientos de componentes homopolares de corrientes no compensadas [10].

Para evitar el calentamiento de la cuba debido a estos flujos homopolares, en transformadores de potencias medias y elevadas se suelda un shunt magnético, que es un pequeño paquete de chapas magnéticas en la cara interna de la cuba del transformador [10].

Las cargas desequilibradas en transformadores Yyn crean un flujo homopolar que no existía con el transformador funcionando en vacío o con carga desequilibrada [10]. Este flujo homopolar desequilibra las tensiones simples (fase-neutro) haciendo que algunas de ellas adquieran valores superiores al que se tenía en vacío mientras que otras tensiones resultan de valor inferior (Figura 3.3).

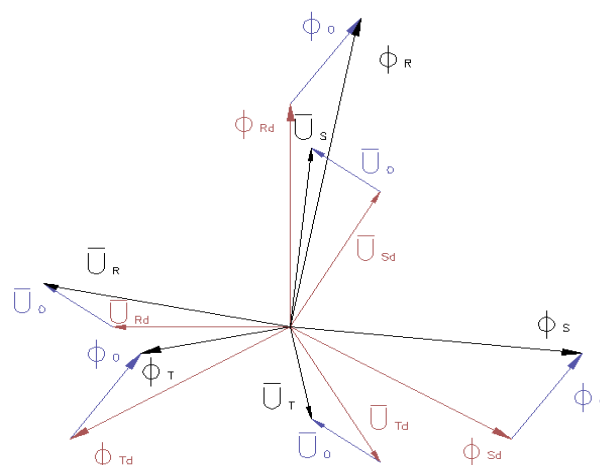


Figura 3.3: Tensiones fase-neutro en un transformador Yyn de núcleo trifásico con carga desequilibrada fase-neutro [10].

En la exposición se ha supuesto por simplicidad que el transformador alimenta una sola carga entre fase y neutro, pero si en las tres fases hay cargas fase-neutro desequilibradas las sobretensiones o tensiones inferiores a la nominal quedarían aplicadas a las cargas con consecuencias potencialmente perjudiciales para las cargas [10].

No se recomienda utilizar transformadores Yy en aquellos casos en los que no sea posible alimentar el transformador a cuatro hilos y se prevean cargas desequilibradas fase-neutro de un valor superior al 10% de la potencia nominal del transformador [10].

En el caso de transformadores para la interconexión de una red con neutro puesto a tierra con otra red con neutro aislado, un cortocircuito fase-neutro y otras faltas asimétricas (por ejemplo la apertura de una sola fase) provocan corrientes homopolares en el lado del transformador unido a la red puesta a tierra, y dado que alguno de estos eventos (la apertura de una fase) se puede mantener durante algún tiempo, provocando un calentamiento de la cuba, los transformadores Yy no se usan en ese tipo de redes [10].

3.3 INFLUENCIA DE LOS ARROLLAMIENTOS DE ESTABILIZACIÓN EN EL CALENTAMIENTO DE LA CUBA ANTE CARGAS DESEQUILIBRADAS DE LOS TRANSFORMADORES ESTRELLA-ESTRELLA

Debido al comportamiento armónico derivado del funcionamiento en vacío de los transformadores estrella-estrella, la problemática asociada a los desequilibrios en las intensidades de las tres fases constituyó el motivo de instalación de los arrollamientos de estabilización en estos transformadores. Dentro de esta problemática, las sobretensiones producidas por el desplazamiento del neutro fueron el principal riesgo a mitigar perseguido en el origen de los arrollamientos de estabilización. Y este riesgo, afecta esencialmente a los transformadores de flujos libres [10].

Ante cargas desequilibradas, en transformadores Yy (estrella-estrella), los arrollamientos de estabilización se usarían debido al calentamiento producido por la existencia de corrientes homopolares [10].

3.3.1 Análisis cualitativo del comportamiento ante cargas desequilibradas de los transformadores Yy con arrollamiento de estabilización

Los desequilibrios *fase-fase* no ocasionan problemas significativos en el funcionamiento de los transformadores, siendo irrelevante la presencia de arrollamientos de estabilización [11].

Sin embargo, en desequilibrios entre *fase y neutro*, el sistema desequilibrado generado en las corrientes secundarias ocasionará componentes de secuencia directa, inversa y homopolar, por lo que en este caso la presencia del arrollamiento de estabilización sí será determinante [11].

Tipo de transformador	SIN ARROLLAMIENTO DE ESTABILIZACIÓN	CON ARROLLAMIENTO DE ESTABILIZACIÓN (conectado en triángulo)
Yn-yn	-La red alimentadora impone las tensiones de línea, y las de fase-neutro -El flujo en el núcleo también viene impuesto por la red, por ello queda exento de componentes de sec. directa, inversa y homopolar. -No hay sobretensiones -No se producen flujos homopolares relevantes	-Debido a la baja impedancia que presenta el arrollamiento de estabilización en comparación con la del circuito de la red, hará que una gran parte de la componente homopolar se quede en el triángulo -La componente homopolar se ve muy reducida
Y-y	-Primario carece de neutro, por lo que las corrientes homopolares no tienen camino de retorno -Se crean sobretensiones que inducirán f.e.m.s que provocarán un desequilibrio de las tensiones simples.	-Los flujos homopolares originados por la carga fase-neutro inducen, en cada fase, tres f.e.m.s -Al disponer el triángulo de un circuito cerrado, estas f.e.m.s crearán una corriente que se opondrá a la causa que la originó borrando los flujos homopolares y disminuyendo las sobretensiones producidas

Tabla 3.1: Influencia del arrollamiento de estabilización en transformadores estrella-estrella [11].

3.4 TIPOS DE DESEQUILIBRIOS EN LAS REDES

Como se indicó en la introducción de este capítulo, en un sistema trifásico desequilibrado las tensiones o corriente en las diferentes fases no son iguales ni se encuentran desfasadas 120° . El desequilibrio de tensiones y/o corrientes puede deberse a transitorios o puede mantenerse en régimen permanente. Dado que en el presente Trabajo Fin de Grado el foco de la atención está puesto en el calentamiento del transformador, los desequilibrios que interesa analizar son los desequilibrios en régimen permanente.

Los motivos más habituales de desequilibrios en régimen permanente son la alimentación de cargas desequilibradas, y las faltas en el transformador, que cabe clasificar en faltas serie y faltas derivación. Además de lo anterior se pueden producir desequilibrios por asimetrías en los equipos eléctricos (por ejemplo la columna central de un transformador de tres columnas) o por diferencias en la disposición de los conductores (por ejemplo el conductor central de una línea eléctrica), pero estos desequilibrios son de menor cuantía y no se considerarán.

Alimentación de cargas desequilibradas

El funcionamiento de un sistema en régimen desequilibrado provoca un aumento de pérdidas en el mismo, sobretensiones en algunas de las fases y una disminución del par motor en los motores eléctricos.

Los desequilibrios de carga afectan principalmente a los transformadores más próximos a los usuarios finales. Los transformadores que se encuentran aguas arriba en la red eléctrica alimentan un conjunto de transformadores próximos al usuario final y por la ley de los grandes números los desequilibrios entre una fase y otra se compensan hasta dar un sistema de corrientes prácticamente equilibrado.

Faltas derivación

Ante una falta a tierra, la corriente que aparece tiene un valor muy elevado que será fácilmente perceptible por las protecciones del transformador. El tiempo que transcurre desde que aparece la falta hasta que se despeja es muy breve por lo que el transformador apenas se calienta.

Faltas serie

Las faltas serie, al contrario que las faltas a tierra, son más complicadas de detectar y de analizar. Este tipo de faltas no ocurren a menudo debido a que, por ejemplo, es muy complicado que cuando un cable de la red cae, quede suspendido en el aire, y no tenga contacto con el suelo (falta derivación). Otro ejemplo de falta serie sería el de un interruptor trifásico con alguno de sus polos en mal estado, que provoquen la apertura de una de las fases del sistema. Las corrientes que aparecen en este tipo de faltas son más pequeñas que las que aparecen ante una falta a tierra y, consecuentemente, las protecciones tardarán un tiempo más prolongado en detectar la falta que será directamente proporcional al calentamiento que sufrirá el transformador.

En el presente Trabajo Fin de Grado se analizará la **Falta serie** debido a que tras su aparición el grado de calentamiento al que puede llegar al transformador es muy alto y por tanto, es necesario reducir el tiempo de detección de esta falta por parte de las protecciones.

Capítulo 4

ENSAYOS DE CALENTAMIENTO

4.1 PROBLEMAS A LA HORA DE REALIZAR UN ENSAYO DE CALENTAMIENTO

Después de fabricar un transformador, y antes de llevarlo a la subestación en la cuál va a ser ubicado, el transformador es sometido a una serie de ensayos para comprobar que el diseño y la fabricación han sido correctos y que el transformador va a ser capaz de soportar las solicitaciones a las que va a ser sometido en servicio.

Los ensayos que se deben realizar a un transformador en fábrica vienen especificados en la norma IEC-60076-1. Estos ensayos se clasifican en ensayos de tipo, ensayos individuales y ensayos especiales [9]. Los **ensayos de tipo** se realizan sobre una unidad de una serie y están encaminados a verificar que el diseño de un transformador es adecuado. Los **ensayos individuales** se realizan sobre todos y cada uno de los transformadores fabricados, y están encaminados a verificar que la fabricación del transformador es adecuada . Por último los **ensayos especiales** son ensayos para asegurar que se cumplen requisitos especiales de la norma (no de obligado cumplimiento), y que se realizan bajo acuerdo fabricante-comprador. Generalmente, los ensayos especiales vienen derivados de condiciones de servicio distintas de las habituales [9].

Entre los ensayos de tipo que se realizan en un transformador se encuentra el ensayo de calentamiento, que debe regirse por la norma IEC-60076-2 [9].

Como se indicó en el capítulo 2 el calentamiento de un transformador es debido a las pérdidas en el hierro y a las pérdidas en el cobre. Las pérdidas en el hierro dependen de la tensión aplicada, mientras que las pérdidas en el cobre dependen de la corriente que circula por el transformador, que es función de la potencia demandada [10].

El principal problema que se encuentra a la hora de realizar un ensayo de calentamiento es que en la fábrica donde se construyó el transformador no se dispone de una carga lo suficientemente grande como para hacer circular al transformador la corriente asignada teniendo aplicada a su primario la tensión asignada. Por este motivo, la norma recomienda dos formas de ensayar el transformador: el método de cortocircuito y el método de oposición [9].

La norma indica que el método que se utilizará preferentemente para realizar el ensayo de calentamiento es el método de cortocircuito, sin embargo la norma contempla también la posibilidad de utilizar el método de oposición previo acuerdo entre fabricante y comprador [9].

El ensayo de calentamiento debe hacerse en aquella toma en la que el transformador se caliente más, que frecuentemente suele ser la toma de mínima tensión, ya que en ella la corriente asignada es más elevada que en otras tomas [16].

4.2 ENSAYO DE CALENTAMIENTO POR EL MÉTODO DE CORTOCIRCUITO

Durante este ensayo, el transformador se somete a las pérdidas totales calculadas, que se dividen en pérdidas debidas a la carga a la temperatura de referencia y pérdidas en vacío. El propósito del ensayo es establecer:

- Los calentamientos del líquido en la parte superior y del líquido medio en condición de régimen estable con disipación de pérdidas totales [9];
- El calentamiento medio de los arrollamientos a corriente asignada teniendo en cuenta el calentamiento del líquido medio como se determina anteriormente [9];
- El calentamiento del punto caliente de los arrollamientos a corriente asignada teniendo en cuenta el calentamiento del líquido en la parte superior como se determina anteriormente [9].

Esto se alcanza en dos etapas de ensayo:

a) Inyección de pérdidas totales:

En un transformador en servicio, los calentamientos del líquido en la parte superior y del líquido medio se establecen cuando el transformador se somete a la tensión nominal y circulando la corriente nominal. Dado que en este caso la tensión de ensayo es muy reducida, para tener en cuenta las pérdidas en el hierro la corriente de ensayo será mayor que la corriente asignada en el valor necesario para producir una cantidad adicional de pérdidas igual a las pérdidas en hierro a la tensión asignada, y el calentamiento de los arrollamientos se elevará correspondientemente [9].

Se controlan las temperaturas del líquido en la parte superior y del medio de refrigeración, y el ensayo se continúa hasta que se establecen los calentamientos del líquido en régimen estable [9].

b) Inyección con la corriente asignada

Después de que se haya establecido el calentamiento del aceite en la parte superior, el ensayo se debe continuar sin corte, reduciendo la corriente de ensayo a un valor igual a la corriente asignada para la combinación de arrollamientos conectados. Esta condición se mantiene durante 1 hora durante la cual se deberían tomar, al menos cada 5 minutos, medidas continuas de la temperatura del líquido en la parte superior, del punto caliente del arrollamiento y del medio de refrigeración externo [9].

Al cabo de la hora, se miden las resistencias de los arrollamientos, bien después de una desconexión rápida de la alimentación y de los cortocircuitos o bien, sin cortar la alimentación, mediante el método de superposición que consiste en inyectar y medir en los arrollamientos una corriente continua de valor bajo superpuesta en la corriente de carga [9].

Los valores de temperatura media de los arrollamientos se determinan a partir de las variaciones de resistencias, y además tomando en consideración el decrecimiento de la temperatura del líquido cuando se reduce la corriente al valor asignado, así como la variación de la temperatura del medio de refrigeración externo [9].

Por acuerdo, las dos etapas del ensayo se pueden combinar en una sola aplicación de potencia a un nivel entre las pérdidas debidas a la carga y las pérdidas totales. La potencia inyectada durante el ensayo debe ser al menos el 80% del valor de las pérdidas totales [9]. Para transformadores sumergidos en líquido, los valores de calentamiento para el líquido en la parte superior, para el líquido medio y para los arrollamientos se deben entonces determinar utilizando las reglas de corrección impuestas por la norma IEC-60076-2 que se proporcionan en el apartado 4.2.3 que se muestra a continuación:

4.2.1 Correcciones

Si los valores especificados de corriente o potencia inyectados no se han obtenido durante el ensayo de calentamiento, los resultados se deben corregir de acuerdo con las siguientes relaciones válidas dentro de un rango de $\pm 20\%$ del valor establecido de potencia y $\pm 10\%$ del valor establecido de corriente [9].

Por acuerdo se pueden aplicar correcciones sobre un rango más amplio, pero no inferior a -30% del valor establecido de potencia y -15% del valor establecido de corriente [9].

Los calentamientos del líquido sobre la temperatura del medio de refrigeración externo al final de la inyección de las pérdidas totales se deben multiplicar por:

$$\left(\frac{\text{Pérdidas totales}}{\text{Pérdidas de ensayo}} \right)^x$$

El calentamiento medio del arrollamiento sobre la temperatura media del líquido en el corte se debe multiplicar por:

$$\left(\frac{\text{Corriente asignada}}{\text{Corriente de ensayo}} \right)^y$$

El calentamiento del punto caliente del arrollamiento sobre la temperatura del líquido en la parte superior en el corte se debe multiplicar por:

$$\left(\frac{\text{Corriente asignada}}{\text{Corriente de ensayo}} \right)^z$$

Los exponentes a aplicar se proporcionan en la Tabla 4.1 de acuerdo con el tipo de transformador y el sistema de refrigeración [9]:

	Transformadores de distribución	Transformadores de media y gran potencia			
	ONAN	ONAN	ONAF	OF....	OD....
Exponente del líquido en la parte superior x	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0
Exponente del arrollamiento medio y	1,6	1,6	1,6	1,6	2,0
Exponente del gradiente de arrollamiento z	–	1,6	1,6	1,6	2,0
NOTA Para el propósito de esta tabla, los transformadores de distribución son transformadores con una potencia asignada de hasta 2 500 kVA inclusive.					

Tabla 4.1: Exponentes para las correcciones de los resultados de ensayos de calentamiento [9].

4.3 ENSAYO DE OPOSICIÓN

El ensayo de oposición requiere utilizar dos transformadores gemelos, cuyos primarios se conectan entre sí y a la red y sus secundarios también se conectan entre sí [9], como se muestra en la Figura 4.1:

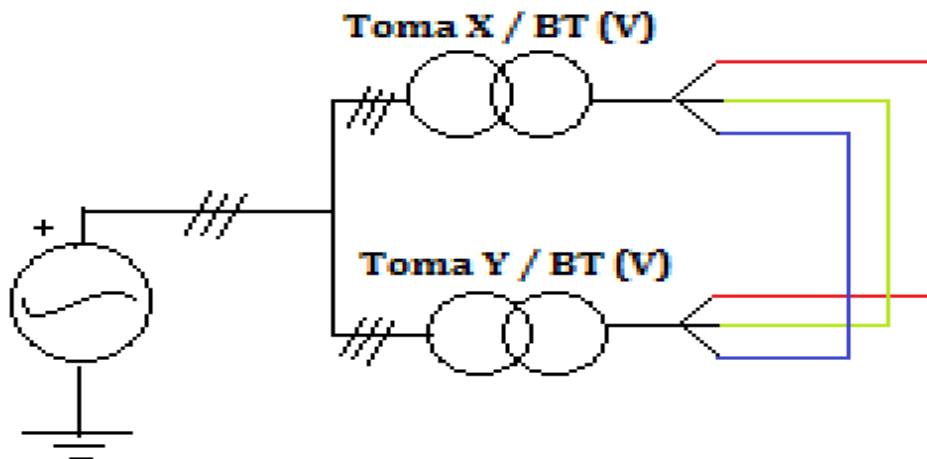


Figura 4.1: Ensayo de oposición de transformadores [Elaboración propia].

En este método, no se dispone de carga alguna para conectar en el secundario del transformador. Este ensayo requiere una red con un dimensionado muy reducido, ya que la red sólo debe suministrar las pérdidas de potencia activa de los dos transformadores.

Para conseguir hacer circular una corriente entre ambos transformadores se debe actuar sobre las tomas del transformador. Se debe elegir aquella combinación de tomas que haga que el transformador trabaje lo más próximo posible a la plena carga.

La impedancia de cortocircuito de los transformadores de grandes potencias es preponderantemente de tipo inductivo, ya que la resistencia de los arrollamientos es muy reducida.

Un inconveniente del ensayo de oposición es que es muy difícil conseguir que circule exactamente la corriente asignada, ya que las tomas provocan incrementos de tensión discretos.

4.4 ENSAYO DE CALENTAMIENTO DE LA CUBA ANTE SECUENCIA HOMOPOLAR

Como se indicó en el apartado 3.2, el funcionamiento de un transformador con carga desequilibrada provoca la circulación de un flujo homopolar que salta por el aire y se cierra por la cuba del mismo. La circulación de flujo por la cuba provoca pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault en la cuba, pudiendo hacer que el calentamiento sea superior al admisible por la pintura de la cuba, las juntas de silicona entre cuba y radiadores (o entre la cuba y su tapa). El arrollamiento terciario es el encargado de reducir estos flujos hasta un valor casi nulo. Sin embargo, si se desea prescindir del terciario es recomendable evaluar si el calentamiento de la cuba es adecuado [10].

La norma IEC-20076-1 no contempla ningún ensayo para determinar el calentamiento de la cuba (ni siquiera dentro de los ensayos especiales).

A falta de un método oficial establecido por la normativa, para comprobar el calentamiento de la cuba provocado por un sistema de corrientes desequilibradas que contenga una componente de corriente homopolar cabe alimentar las tres fases del transformador unidas en paralelo entre sí, dejando las tres fases del arrollamiento secundario también en paralelo entre sí y cerrando el camino a la corriente homopolar como se muestra en la Figura 4.2

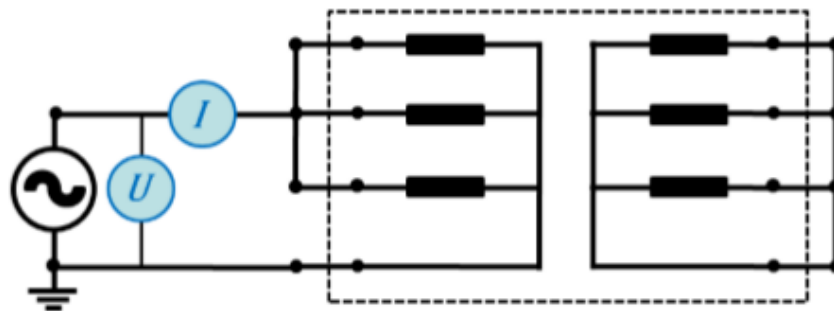


Figura 4.2 Esquema de medida de la impedancia homopolar de un transformador estrella-estrella (vista desde el primario y configuración cortocircuito) [11].

Se irá aumentando la tensión aplicada al primario del transformador hasta hacer circular la corriente deseada.

El ensayo de calentamiento ante secuencia homopolar no hay que realizarlo a la corriente nominal del transformador, sino a la máxima corriente homopolar que puede llegar a pasar sin que actúen las protecciones [11]

Sin embargo, el ensayo mencionado tiene el inconveniente de que no reproduce de forma fiel las condiciones que se pueden dar en campo, ya que durante este ensayo sólo circula corriente homopolar pero no corriente de secuencia directa o de secuencia inversa. Tampoco se tienen un sistema de tensiones de valor elevado aplicado al transformador y por tanto unas pérdidas en el hierro elevadas [11].

Por eso, una alternativa para aproximarse un poco más a las condiciones reales de servicio es utilizar el método de oposición.

4.5 ENSAYO DE CALENTAMIENTO DE LA CUBA MEDIANTE EL MÉTODO DE OPOSICIÓN

Este ensayo se realiza eliminando una de las fases de conexión entre los secundarios de los dos transformadores gemelos. De esta forma, no solo influye la corriente de secuencia homopolar en el calentamiento de la cuba, sino también las corrientes de secuencia directa e inversa como puede llegar a ocurrir en un transformador en campo.

La cuestión es que no está claro si el margen de regulación de tensión que permite un transformador va a hacer circular una corriente de pequeño valor o un valor enorme de corriente, y eso es lo que justifica este Trabajo Fin de Grado, cuya finalidad última es determinar si actuando sobre las tomas de los transformadores se va a tener una combinación de tomas que permita que circule la corriente nominal y ver qué combinación de tomas es la idónea para poder realizar el ensayo de calentamiento.

Capítulo 5

ÁNALIS MEDIANTE COMPONENTES SIMÉTRICAS

5.1 TEORÍA DE LAS COMPONENTES SIMÉTRICAS

5.1.1 Introducción

Un sistema polifásico desequilibrado se puede estudiar directamente aplicando las leyes de Kirchhoff a la red. No obstante, este procedimiento de cálculo directo es laborioso, al tener que trabajar con un gran número de ecuaciones. Las tensiones, intensidades o impedancias están representadas por magnitudes vectoriales complejas, por lo que el número de ecuaciones se duplican, complicando aún más su resolución [14].

El procedimiento más cómodo para estudiar regímenes desequilibrados polifásicos es el llamado *método de las componentes simétricas*. El procedimiento se basa en la propiedad de las magnitudes sinusoidales de que: ***q vectores desequilibrados cualesquiera pueden considerarse como la suma de q sistemas de q vectores*** equilibrados [14].

El método más empleado y conocido para descomponer un sistema de n vectores en n sistemas simétricos, es el de las componentes simétricas, conocido por método de *Fortescue*, que lo propuso en 1918 en su trabajo "*Method of Simetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyfase Networks*" y que fue estudiado simultáneamente por Fortescue y por Stokvis [14].

El método consiste básicamente en descomponer un sistema polifásico asimétrico en varios simétricos, que podemos estudiar fácilmente mediante un circuito monofásico equivalente [14].

Es preciso observar que la descomposición de las tensiones y corrientes de un circuito, en sus componentes simétricas, es un procedimiento de trabajo para calcular su valor en sistemas desequilibrados. No obstante, estos valores simétricos no son solamente un artificio de cálculo, sino que en cierto modo tienen una realidad física que permiten su medida. Es decir, las componentes simétricas no aparecen aisladas en un circuito y podemos comprobar que su presencia produce una serie de fenómenos físicos observables que serán diferentes según la componente considerada. Por ejemplo, en un circuito trifásico desequilibrado con conductor neutro, la corriente de neutro es tres veces la componente homopolar de las corrientes reales en fase. En un motor trifásico alimentado por un sistema de tensiones desequilibradas, la componente inversa produce un campo en sentido inverso, creando un par de frenado, y la componente homopolar no produce ningún efecto [14].

La aplicación del método de las componentes simétricas se emplea para el estudio de las corrientes de cortocircuito, que es un caso particular de desequilibrio, aunque también se emplea para la determinación de corrientes en circuitos receptores distintos sobre las tres fases, por ejemplo: hornos, tracción, soldaduras...[14]

El teorema de Fortescue, aplicado a una red trifásica, establece que un sistema desequilibrado se puede descomponer en tres sistemas equilibrados o simétricos de las siguientes características [1]:

- 1) Un sistema equilibrado de fasores trifásicos que tienen la misma secuencia de fase que el sistema original desequilibrado y que se denomina **secuencia directa o positiva** [1]
- 2) Un sistema equilibrado de fasores trifásicos que tienen una secuencia de fases opuesta a la del sistema desequilibrado original y que se denomina de **secuencia inversa o negativa** [1].
- 3) Un sistema de tres fasores monofásicos iguales en módulo y fase que se denomina: **sistema de secuencia cero u homopolar** [1].

En la Figura 5.1 se muestra esta idea para fasores de tensión. El sistema desequilibrado de tensiones: V_R, V_S , y V_T , se descomponen en [1]:

- 1) Sistema directo: V_{R1}, V_{S1} , y V_{T1} , cuya secuencia coincide con la de los fasores originales;
- 2) Sistema inverso: V_{R2}, V_{S2} , y V_{T2} , cuya secuencia es contraria;
- 3) Sistema homopolar: V_{R0}, V_{S0} , y V_{T0}

En la parte derecha de la Figura 5.1, se muestran los tres sistemas: directo, inverso y homopolar. En la parte izquierda se representa la composición (descomposición) fasorial. El subíndice 1 indica sistema directo, el 2 inverso, y el 0 homopolar [1].

La Figura 5.1 muestra por tanto un sistema de tensiones desequilibrado y, a continuación, sus componentes simétricas:

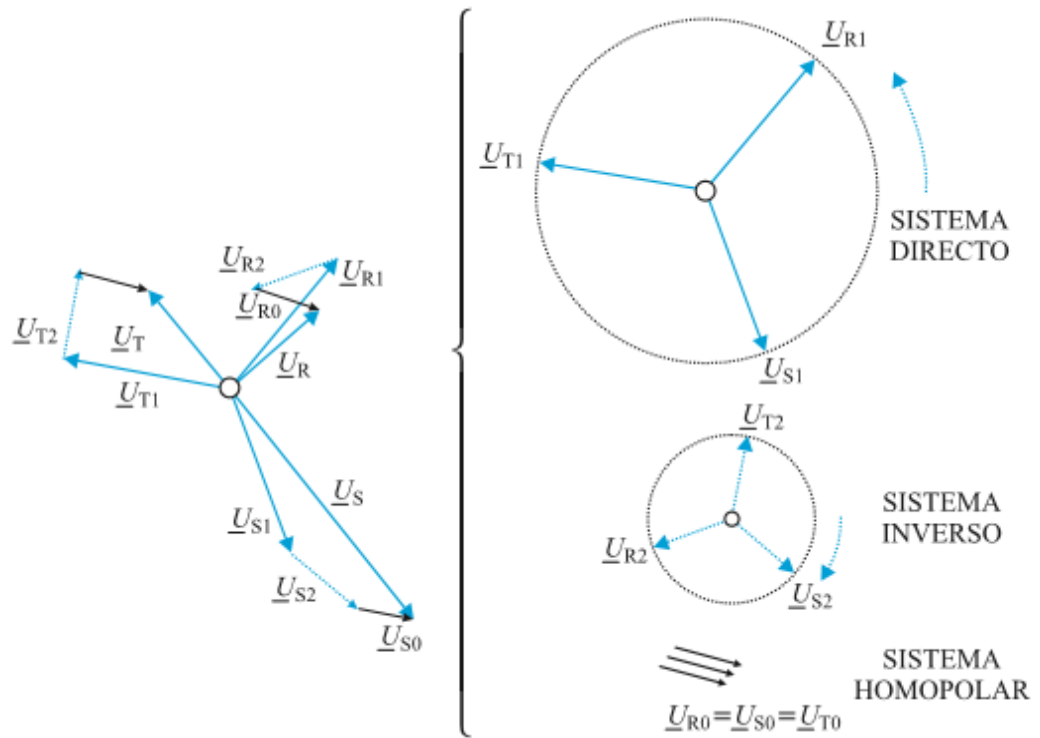


Figura 5.1: Sistema trifásico desequilibrado y sus componentes simétricas [1].

5.1.2 El operador trifásico “a”

Sabemos de álgebra compleja que si se multiplica un vector por $e^{j\alpha}$, el efecto que se obtiene es girar el vector en sentido antihorario un ángulo α . Para conseguir un giro de $120^\circ = 2\pi/3$, que es necesario en el estudio de las componentes simétricas, es frecuente utilizar el operador “a” que se define así [1]:

$$a = e^{j2\pi/3} = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j\sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (5.1)$$

Multiplicando “a” por sí mismo se obtiene a^2 que expresa una rotación antihoraria de 240° , y así sucesivamente. De este modo se cumple [1]:

$$a = e^{j120^\circ}; \quad a^2 = a \cdot a = e^{j240^\circ}; \quad a^3 = a \cdot a \cdot a = e^{j360^\circ} = 1 \quad (5.2)$$

5.1.3 *Componentes simétricas de fasores desequilibrados*

Supóngase que partimos de tres fasores de tensión desequilibrada: V_R , V_S y V_T . De acuerdo con las reglas del álgebra (espacios vectoriales), las tres tensiones anteriores se podrán expresar en función de tres tensiones arbitrarias: V_1 , V_2 y V_0 . por medio de una transformación lineal [1]:

$$\begin{aligned} V_R &= a_1 V_{R1} + a_2 V_{R2} + a_0 V_{R0} \\ V_S &= b_1 V_{R1} + b_2 V_{R2} + b_0 V_{R0} \\ V_T &= c_1 V_{R1} + c_2 V_{R2} + c_0 V_{R0} \end{aligned} \quad (5.3)$$

Supuesto que el determinante de los coeficientes sea diferente a cero. De acuerdo con lo anterior, las tensiones originales se pueden sustituir por la suma de tres juegos de tensiones derivadas, a saber [1]:

$$(a_1 V_1, b_1 V_1, c_1 V_1) ; (a_2 V_2, b_2 V_2, c_2 V_2) ; (a_0 V_0, b_0 V_0, c_0 V_0) \quad (5.4)$$

Es evidente que si los coeficientes son arbitrarios, cada juego de las tensiones anteriores estará desequilibrado como el sistema original, por lo que no se ha conseguido ninguna ventaja con la transformación (5.3). Fue Fortescue y casi simultáneamente Stovkis, quienes apuntaron que si se hacía una elección apropiada de los coeficientes de (5.3), cada uno de los sistemas de tensiones derivados podían estar equilibrados, con lo que se lograba una gran simplificación en los cálculos [1]. Como se ha dicho en el apartado 5.1.2, estos tres sistemas son [1]:

$$1) \text{ Directo: } V_{R1} ; V_{S1} = a^2 V_{R1} ; V_{T1} = a V_{R1} \quad (5.5)$$

$$2) \text{ Inverso: } V_{R2} ; V_{S2} = a V_{R2} ; V_{T2} = a^2 V_{R2} \quad (5.6)$$

$$3) \text{ Homopolar: } V_{R0} ; V_{S0} = V_{R0} ; V_{T0} = V_{R0} \quad (5.7)$$

De este modo el sistema original desequilibrado se puede descomponer en una suma de tres sistemas equilibrados que se denominan **componentes simétricas** del conjunto inicial, de acuerdo con las ecuaciones [1]:

$$\begin{aligned}
 V_R &= V_{R1} + V_{R2} + V_{R0} \\
 V_S &= V_{S1} + V_{S2} + V_{S0} = a^2V_{R1} + aV_{R2} + V_{R0} \\
 V_T &= V_{T1} + V_{T2} + V_{T0} = aV_{R1} + a^2V_{R2} + V_{R0}
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

Y en forma matricial se puede representar así [1]:

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{bmatrix}
 \tag{5.9}$$

El problema en la práctica es determinar las componentes simétricas (en definitiva V_{R1} , V_{R2} , V_{R0}) conociendo las tensiones (o corrientes) desequilibradas V_R , V_S , y V_T lo que plantea el problema inverso al mostrado en (5.8).

Se puede calcular la **componente homopolar** V_{R0} (5.8) y teniendo en cuenta las propiedades del operador “a” y así resulta [1]:

$$V_R + V_S + V_T = V_{R1}(1 + a^2 + a) + V_{R2}(1 + a + a^2) + 3V_{R0}
 \tag{5.10}$$

Pero como $(1 + a + a^2) = 1$, se deduce:

$$V_{R0} = \frac{1}{3}(V_R + V_S + V_T)
 \tag{5.11}$$

Para calcular la **componente directa** V_{R1} , se multiplica la 2ª ecuación (5.8) por “a”, la 3ª por a^2 y los resultados se suman con la 1ª, resultando [1]:

$$V_R + aV_S + a^2V_T = (V_{R1} + V_{R2} + V_{R0}) + (a^3V_{R1} + a^2V_{R2} + aV_{R0}) + (a^3V_{R1} + a^4V_{R2} + a^2V_{R0})
 \tag{5.12}$$

Y que teniendo en cuenta que $a^3=1$, $a^4=a$, y sacando factor común a V_{R1} , V_{R2} , y V_{R0} se obtiene que :

$$V_{R1} = \frac{1}{3}(V_R + aV_S + a^2V_T)
 \tag{5.13}$$

De manera análoga, se puede obtener **la componente de secuencia inversa** V_{R2} y para ello, se debe multiplicar la 2ª ecuación (5.8) por a^2 , la 3ª por a y los resultados se suman con la 1ª, obteniendo [1]:

$$V_R + a^2 V_S + a V_T = (V_{R1} + V_{R2} + V_{R0}) + (a^4 V_{R1} + a^3 V_{R2} + a^2 V_{R0}) + (a^2 V_{R1} + a^3 V_{R2} + a V_{R0}) \quad (5.14)$$

Y de la misma forma en la que hemos obtenido la componente directa, es decir, teniendo en cuenta las propiedades de “a” y sacando factor común a V_{R1} , V_{R2} , y V_{R0} , se deduce:

$$V_{R2} = \frac{1}{3} (V_R + a^2 V_S + a V_T) \quad (5.15)$$

Las ecuaciones (5.11), (5.13) y (5.15) admiten la siguiente formulación matricial:

$$\begin{bmatrix} V_{R0} \\ V_{R1} \\ V_{R2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Cuando se trata de corrientes desequilibradas, I_R , I_S e I_T , las ecuaciones matriciales (5.9) y (5.16) se transforman en [1]:

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

$$\begin{bmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

5.1.4 Impedancias debidas a las corrientes de diferente secuencia

La caída de tensión que se origina en una parte cualquiera de un circuito por la corriente de una secuencia determinada, depende de la impedancia de tal parte del circuito para la corriente de dicha secuencia [1].

La impedancia que ofrece un circuito cuando por él circulan solamente corrientes de secuencia positiva o directa se denomina **impedancia a la corriente de secuencia directa [1]**:

$$\underline{Z}_1 = \frac{U_{R1}}{I_{R1}} = \frac{U_{S1}}{I_{S1}} = \frac{U_{T1}}{I_{T1}} \quad (5.19)$$

De un modo análogo, si solo existen corrientes de secuencia inversa, la impedancia se denomina **impedancia a la corriente de secuencia inversa [1]**:

$$\underline{Z}_2 = \frac{U_{R2}}{I_{R2}} = \frac{U_{S2}}{I_{S2}} = \frac{U_{T2}}{I_{T2}} \quad (5.20)$$

Cuando existen únicamente corrientes de secuencia homopolar, la impedancia se denomina **impedancia a la corriente de secuencia homopolar [1]**:

$$\underline{Z}_0 = \frac{U_{R0}}{I_{R0}} = \frac{U_{S0}}{I_{S0}} = \frac{U_{T0}}{I_{T0}} \quad (5.21)$$

Los valores \underline{Z}_1 y \underline{Z}_2 para aparatos estáticos como resistencias, condensadores, transformadores, etc. son los mismos, ya que la impedancia no depende del sentido de sucesión de fases. En los casos en los que se produce una interacción de los campos magnéticos o eléctricos de las tres fases, la impedancia de secuencia homopolar \underline{Z}_0 será diferente de las de secuencia directa e inversa ya que las corrientes de secuencia homopolar producen un tipo de campo totalmente diferente al de las otras corrientes (en un caso rotativo y en otro pulsatorio) [1].

El análisis de una falta asimétrica en un sistema simétrico consiste en la determinación de las componentes simétricas desequilibradas que circulan. El circuito equivalente monofásico formado por las impedancias a la corriente de cualquier secuencia exclusivamente se denomina **red de secuencia** para tal secuencia particular. La red de secuencia incluye las fuerzas electromotrices o tensiones generadas de secuencia igual.

Las redes de secuencia que transportan las corrientes I_{R1} y I_{R2} e I_{R0} se interconexionan para representar diversas condiciones de falta desequilibradas.

Podemos observar un ejemplo de redes de secuencia en la Figura 5.2 [1].

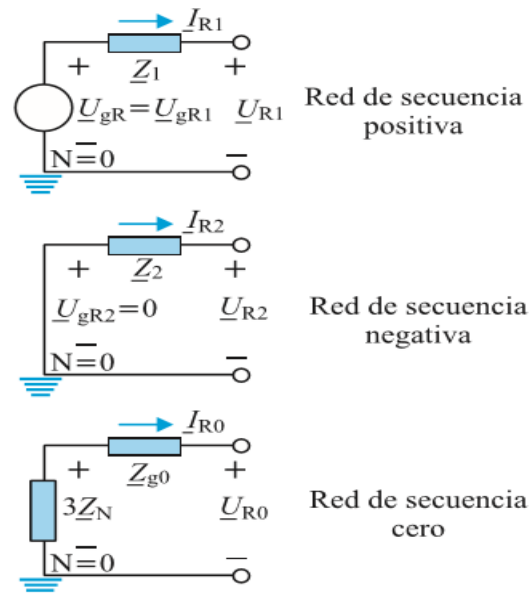


Figura 5.2: Redes de secuencia [1].

5.2 LA FALTA SERIE

En general, existen tres tipos de faltas en sistemas de potencia trifásicos. En primer lugar, pueden ocurrir faltas de cortocircuito entre una o más fases que pueden o no afectar a la tierra. En segundo lugar, se pueden dar faltas de circuito abierto en una o dos fases, y por último, se puede dar la situación en la que ocurran fallos simultáneos cuando más de una falta ocurre al mismo tiempo en la misma o en diferente ubicación de la red [3].

En este apartado se va a analizar el tipo de falta mencionada en segundo lugar, es decir, las faltas de conductor abierto, o también denominadas faltas en serie.

Cuando se produce un fallo de cortocircuito abierto en un punto F de la red, deben observarse las condiciones impuestas por el fallo entre los dos lados del circuito abierto, por ejemplo los puntos F y F', en las redes de secuencia [4].

La Figura 5.3 muestra la representación de un fallo de circuito abierto monofásico que ocurre en la fase R entre los puntos F y F' en un sistema de potencia trifásico equilibrado [4].

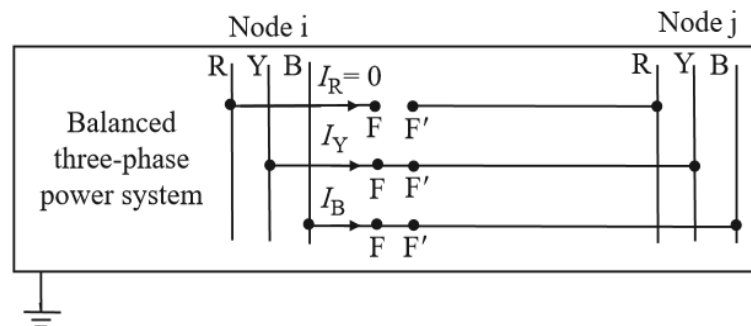


Figura 5.3: Representación de un fallo de circuito abierto monofásico en un sistema trifásico equilibrado. [4]

Las condiciones impuestas por la falta son las siguientes:

$$I_R = 0 \quad (5.22)$$

$$\text{Por tanto, } I_1 + I_2 + I_0 = 0 \quad (5.23)$$

Donde I_R es la corriente por la fase R, I_1 es la corriente de secuencia directa, I_2 es la corriente de secuencia inversa e I_0 es la corriente de secuencia homopolar [4].

Además, puesto que estos dos puntos están todavía conectados juntos en las fases Y y B, tenemos [4]:

$$V_Y^{FF'} = 0 \text{ y } V_B^{FF'} = 0 \quad (5.24)$$

Las componentes de secuencia de las tensiones se pueden calcular mediante la siguiente ecuación [4]:

$$V_1 = V_2 = V_0 = \frac{1}{3} V_R^{FF'} \quad (5.25)$$

Las ecuaciones (5.24) y (5.25) se cumplen conectando las redes equivalentes de secuencia directa, inversa y homopolar en paralelo entre los puntos F y F' como se muestra en la Figura 5.4 [4]:

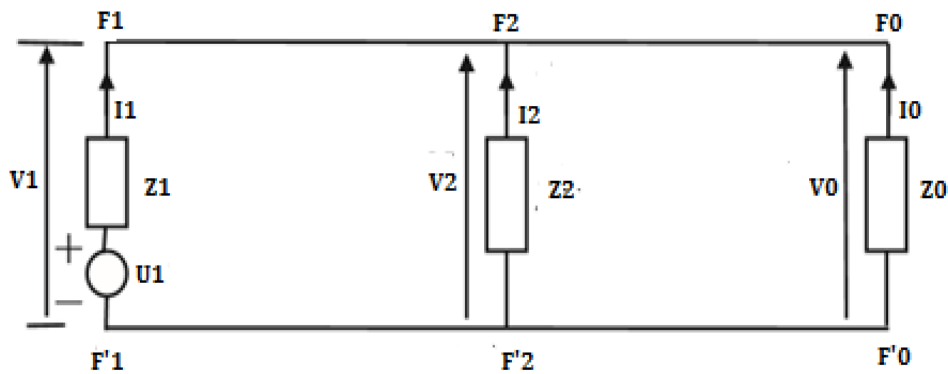


Figura 5.4: Conexión de las redes equivalentes de secuencia entre los puntos F y F' [4].

En el circuito de la Figura 5.4, Z1, Z2 y Z0 son las impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar, respectivamente, del equivalente Thévenin vistas desde el punto de falta (es decir, entre F y F') [4]. De igual manera, U1 es la fuente de tensión del equivalente Thévenin visto desde F y F'.

De la Figura 5.4, obtenemos que la corriente de secuencia directa se muestra en la ecuación 5.26:

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}} \quad (5.26)$$

En la Figura 5.4, se han puesto en paralelo las redes de secuencia directa, inversa y homopolar del equivalente Thèvenin del sistema visto desde los puntos F y F'. Por tanto, U_1 es la tensión de secuencia directa que aparece entre los puntos F y F' con las tres fases a circuito abierto. Si no se dispone de la componente directa de la tensión vista desde los puntos F y F' con las tres fases abiertas y en su lugar se dispone de la corriente prefalta, se puede hallar la tensión de secuencia directa a partir de las condiciones de prefalta, ya que en el circuito sin falta la corriente (prefalta) es el cociente entre la tensión de secuencia directa entre los puntos F y F' y la impedancia de secuencia directa, de modo que:

$$I_1 = \frac{I_L \cdot Z_1}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}} = \frac{(Z_2 + Z_0)}{(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1)} I_L Z_1 \quad (5.26)$$

La corriente de secuencia inversa es [4]:

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_0}{(Z_2 + Z_0)} \quad (5.27)$$

La corriente de secuencia homopolar es [4]:

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{(Z_2 + Z_0)} \quad (5.28)$$

Las tensiones de secuencia directa, inversa y homopolar son [4]:

$$V_1 = V_2 = V_0 = \frac{(Z_2 Z_0)}{(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1)} I_L Z_1 \quad (5.29)$$

Y la tensión entre los puntos FF' de la fase que queda en circuito abierto es [4]:

$$V_R = \frac{(Z_2 Z_0)}{(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1)} 3 I_L Z_1 \quad (5.30)$$

Toda la teoría referida a las componentes simétricas y todas las fórmulas referentes al cálculo de la Falta Serie se aplicarán para el estudio del Método de Oposición de transformadores con la presencia de Falta Serie (Capítulo 8, apartado 8.4).

Capítulo 6

MEDIDA DE LOS PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR

6.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los ensayos a realizar para obtener los parámetros del modelo.

En el apartado 6.2 se muestran los ensayos para la obtención de la impedancia a secuencia directa del transformador a analizar. En el apartado 6.3 se describen los ensayos precisos para la obtención de la impedancia de secuencia homopolar de los transformadores.

6.2 ENSAYOS PARA DETERMINAR LAS IMPEDANCIAS DE UN TRANSFORMADOR

Para obtener el circuito equivalente del transformador ante secuencia directa se precisan dos ensayos: el ensayo de vacío (obtención X_0 , R_0) y el ensayo de cortocircuito (obtención X_{eq} , R_{eq}).

El lado por el cual se alimenta el transformador durante los ensayos no es relevante, ya que la información obtenida en los ensayos es esencialmente la misma sea cual sea el lado de alimentación, como se muestra en la Figura 6.1 [18]:

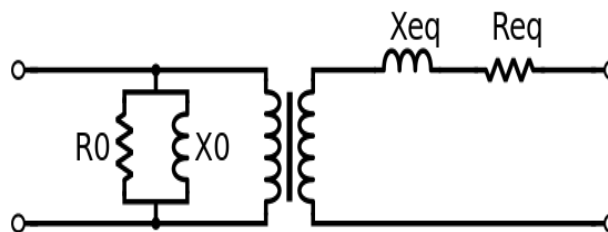


Figura 6.1: Circuito equivalente simplificado de un transformador real [18].

Ensayo de vacío

El ensayo de vacío del transformador permite obtener la corriente de magnetización y las pérdidas en el hierro, P_{Fe} , del transformador [15].

En el ensayo de vacío se aplica la tensión nominal en el lado de baja tensión del transformador mientras que el lado de alta tensión queda en circuito abierto [15].

Las medidas que se deben realizar son la tensión aplicada al primario, V_1 , la potencia activa absorbida por el transformador en vacío, P_0 , y la corriente de vacío, I_0 . El esquema eléctrico y la disposición de los equipos de medida para el ensayo en vacío se muestran en la Figura 6.2 [15].

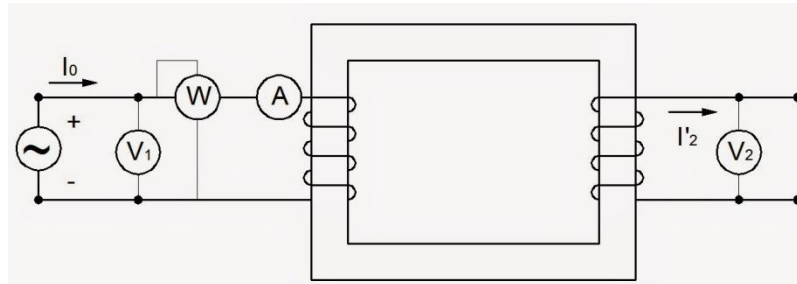


Figura 6.2: Esquema eléctrico y disposición de los equipos de medida para el ensayo de vacío [15].

El comportamiento en vacío de un transformador es no lineal, por lo que para una representación precisa del comportamiento en vacío se necesitaría hacer el ensayo en vacío a diferentes tensiones en el entorno del punto de funcionamiento nominal (por ejemplo al 90%, al 100%, al 105%, al 110% y al 115% de la tensión asignada) [15], sin embargo en el problema que vamos a analizar la influencia de la no linealidad del núcleo es reducida por lo que se ha realizado el ensayo sólo a la tensión asignada.

Los resultados del ensayo de vacío realizado al transformador en el Laboratorio de Alta Tensión se encuentran en el Capítulo 8, apartado 8.2.1

Ensayo de cortocircuito

El ensayo en cortocircuito se llevará a cabo alimentando el transformador desde el lado de alta tensión del transformador mientras el lado de baja tensión está cortocircuitado. La tensión requerida para circular la corriente nominal a través del transformador es normalmente muy pequeña y es del orden de unos pocos por ciento de la tensión nominal y esta tensión está aplicada al primario [18]. Las pérdidas en el núcleo son muy pequeñas

porque la tensión aplicada es un pequeño porcentaje del voltaje nominal y puede ser despreciada. Así, el vatímetro solo medirá las pérdidas en el cobre [18].

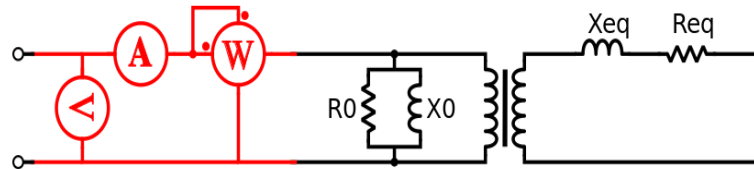


Figura 6.3: Ensayo de cortocircuito [18].

Los parámetros obtenidos mediante este ensayo son los siguientes:

$$R_{eq1} = \frac{W}{I^2} \quad (6.1)$$

$$Z_{eq1} = \frac{V}{I} \quad (6.2)$$

$$X_{eq1} = \sqrt{Z_{eq1}^2 - R_{eq1}^2} \quad (6.3)$$

Donde:

W: son las pérdidas en el cobre medidas con el vatímetro

V: es el voltaje aplicado medido con el voltímetro

I: es la corriente de entrada medida con el amperímetro

Req1: es la resistencia vista desde el primario

Zeq1: es la impedancia total vista desde el primario

Xeq1: es la reactancia vista desde el primario

Los resultados del ensayo de cortocircuito realizado en el Laboratorio de Alta Tensión se encuentran en el Capítulo 8, apartado 8.2.2

6.3 ENSAYOS DE DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR

6.3.1 Ensayos de medida de impedancia homopolar en transformadores trifásicos

Las características de la medida de secuencia homopolar en transformadores trifásicos dependen de las conexiones de los bobinados, y en algunos casos, de la construcción del núcleo. El Std. IEEE C57.12.90 indica la forma de proceder para obtener la impedancia homopolar de un transformador mediante ensayos [7].

Los ensayos de impedancia homopolar descritos en este capítulo se aplicarán sólo a transformadores que tengan uno ó más arrollamientos con un neutro físico llevado a cabo para una conexión externa [7]. En todas las pruebas, uno de estos arrollamientos será excitado a la frecuencia nominal entre el neutro y los tres terminales de línea conectados entre sí. La conexión externa de otros arrollamientos será descrita en la impedancia de secuencia homopolar para varias conexiones de transformador. Los transformadores con conexiones distintas en la impedancia de secuencia cero se someterán a ensayo según lo determinen las personas responsables del diseño y aplicación [7].

La tensión de excitación y la corriente se establecerán de la siguiente manera:

- a) Si no hay conexión triángulo presente en el transformador, el voltaje aplicado no debe superar el 30% de la tensión nominal de línea a neutro del devanado energizado, y la corriente de fase no debe superar su valor nominal [7].

- b) Si existe conexión triángulo, la tensión aplicada debe ser tal que no se sobrepase la corriente de fase nominal de cualquier devanado del triángulo [7].

El porcentaje de tensión de excitación en el que se realizan los ensayos se muestra en el informe de la prueba. El tiempo de duración de la prueba será tal que no se sobrepasen los límites térmicos de cualquiera de las partes del transformador [7].

Los resultados del Ensayo clásico de medida de impedancia homopolar se encuentran en el Capítulo 8, apartado 8.2.3

6.3.2 Transformadores con neutro externo disponible, a excepción de los transformadores con arrollamientos interconectados.

La red de secuencia homopolar, dadas las características externas de transformadores de este tipo, se muestran en la Figura 6.4:

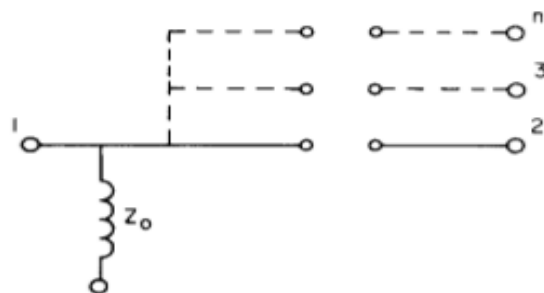


Figura 6.4: Equivalente de la red de secuencia homopolar para transformadores con un neutro disponible externamente. [7].

El arrollamiento 1 tiene disponible el neutro mientras que los arrollamientos 2 y 3 no. Una prueba de secuencia homopolar se hará en el arrollamiento con neutro disponible. La tensión monofásica se aplicará entre los terminales de línea en cortocircuito y el neutro. Los terminales externos de todos los otros devanados pueden estar en circuito abierto o en cortocircuito a tierra [7].

El término “devanados interconectados” se refiere a que una o más fases eléctricas están únicas por más de una fase magnética [7].

6.3.3 Transformadores con dos neutros disponibles externamente, con excepción de los transformadores con devanados interconectados.

La red de secuencia homopolar, dadas las características externas de transformadores de este tipo, se muestra en la Figura 6.5:

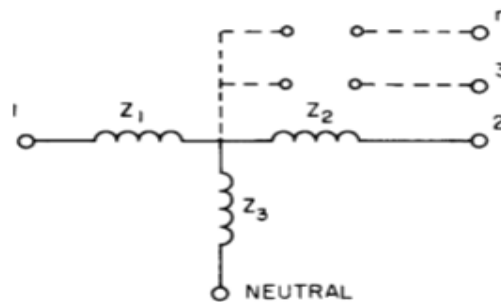


Figura 6.5: Equivalente de la red de secuencia homopolar para transformadores con dos neutros disponibles externamente [7].

Los devanados 1 y 2 tienen los neutros disponibles externamente, mientras que los devanados 3, 4 y sucesivos no.

Se requieren cuatro ensayos para determinar la red equivalente de secuencia homopolar. Una de estas pruebas es redundante [7]:

- a) *Prueba 1:* Aplicar una tensión monofásica al devanado 1 entre los terminales de línea en cortocircuito de dicho devanado y su neutro. Los demás arrollamientos están en circuito abierto. La medida de impedancia de secuencia homopolar está representada por $Z_1 N_o$ [7].

- b) *Prueba 2:* Aplicar una tensión monofásica al devanado 1 entre los terminales de línea en cortocircuito de dicho devanado y su neutro. Cortocircuitar los terminales de línea y neutro del devanado 2. Los demás arrollamientos pueden estar en circuito abierto o en cortocircuito. La medida de impedancia de secuencia homopolar se representa por Z_1N_s [7].
- c) *Prueba 3:* Aplicar una tensión monofásica al devanado 2 entre los terminales de línea en cortocircuito de dicho devanado y su neutro. Los demás arrollamientos están en circuito abierto. La medida de impedancia de secuencia homopolar está representada por Z_2N_0 [7].
- d) *Prueba 4:* Aplicar una tensión monofásica al devanado 2 entre los terminales de línea en cortocircuito de dicho devanado y su neutro. Cortocircuitar los terminales de línea y neutro del devanado 1. Todos los otros arrollamientos pueden permanecer en circuito abierto o en cortocircuito. La medida de impedancia de secuencia de fase homopolar está representada por Z_2N_s [7].

Las Pruebas 4 y 2 son redundantes. Todas las medidas de impedancias de secuencia homopolar deben expresarse en porcentaje y se colocan sobre una base en KilovoltAmperio común. Las constantes en el circuito equivalente son como se muestra en la ecuación 6.1 a través de la ecuación 6.2:

$$Z_3 = +\sqrt{Z_{2N0}(Z_{1N0} - Z_{1Ns})} = +\sqrt{Z_{1N0}(Z_{2N0} - Z_{2Ns})} \quad (6.1)$$

$$Z1 = Z_{1N0} - Z_{1Ns} \quad (6.2)$$

Estas ecuaciones implican números complejos. El signo más antes del radical en la ecuación 6.1 es apropiado para los casos en los que los arrollamientos 1 y 2 son físicamente adyacentes en el diseño y un signo menos será apropiado cuando un devanado triángulo (por ejemplo, el 3,4.n...) se encuentra físicamente dentro o entre los devanados 1 y 2. La corrección de la señal puede ser comprobada por comparación mediante los cálculos de diseño de impedancia homopolar [7].

Si Z_{1N_0} y Z_{2N_0} se aproximan al infinito, entonces Z_3 también [7], y el circuito equivalente es el que se muestra en la Figura 6.6:

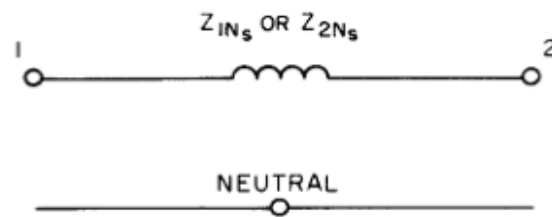


Figura 6.6: Equivalente de la secuencia homopolar para transformadores con dos neutros disponibles externamente y desfase de 0° si Z_{1N_0} y Z_{2N_0} se aproximan al infinito [7].

En el caso de los transformadores conectados en estrella, la impedancia de secuencia homopolar, en general, es 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 [7].

6.3.4 Transformadores con devanados interconectados

El transformador que hemos utilizado en el ensayo es de arrollamientos interconectados o también denominado transformador en zig-zag.

En [6] Roselli realizó un ensayo de determinación de la impedancia homopolar a un transformador con arrollamientos interconectados de la empresa San Diego Gas&Electric. El informe de los ensayos realizados mostró que algunos de los valores no fueron lógicos, especialmente los de las impedancias de secuencia homopolar, que fueron el doble del valor esperado. Debido a eso se comenzó una investigación para obtener una metodología de ensayar los transformadores con arrollamientos interconectados para obtener la impedancia de secuencia homopolar. Para ello se usó la teoría de las componentes simétricas para solucionar las ecuaciones generales de línea en caso de faltas a tierra [6].

En la Figura 6.7 se muestra el tipo de transformador que se usaba en la empresa San Diego Gas&Electric:

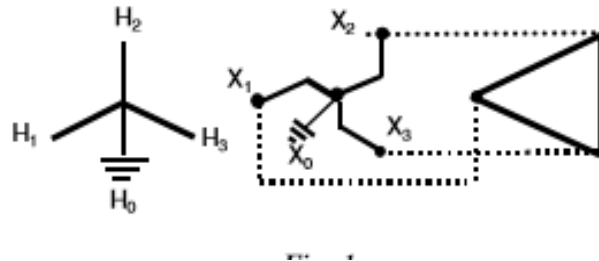


Figura 6.7: Tipo de transformador que usaba San Diego Gas&Electric [6].

El ensayo consiste en realizar un cortocircuito monofásico a tierra a tensión reducida. A continuación se exponen los pasos del ensayo para obtener la impedancia homopolar en transformadores zig-zag, la configuración de la prueba así como las ecuaciones que hay que utilizar para calcular Z_0 [6]:

A. SECUENCIA DE CONFIGURACIÓN GENERAL:

Los pasos del ensayo para obtener la impedancia de secuencia homopolar son los siguientes [6]:

- a) Aplicar una tensión equilibrada trifásica fase-fase para el lado de Alta Tensión.
- b) Realizar un cortocircuito monofásico a tierra a través de un puente una de las fases del lado de Baja Tensión a tierra.
- c) Medir la corriente en el neutro del lado de BT y en el lado de AT así como todas las tensiones.
- d) Repetir los pasos para las otras dos fases del secundario y calcular la media

B. CONFIGURACIÓN DE LA PRUEBA

Este ensayo se puede realizar en la plataforma de ensayos del fabricante o en las instalaciones del cliente usando una fuente trifásica como un generador portátil, o un banco de transformadores de distribución.

En la Figura 6.8 se muestra el esquema de montaje del ensayo [6].

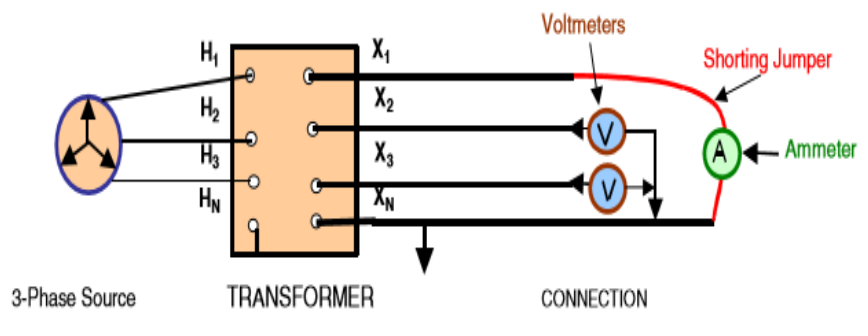


Figura 6.8: Conexión para realizar el ensayo de impedancia homopolar en transformadores zig-zag [6].

El circuito equivalente que se utiliza para estudiar la falta de cortocircuito es el mostrado en la Figura 6.9. Este circuito es el mismo que representa el ensayo de cortocircuito monofásico, con la salvedad de que en el ensayo de cortocircuito monofásico la fuente no vale 1 p.u. [6]:

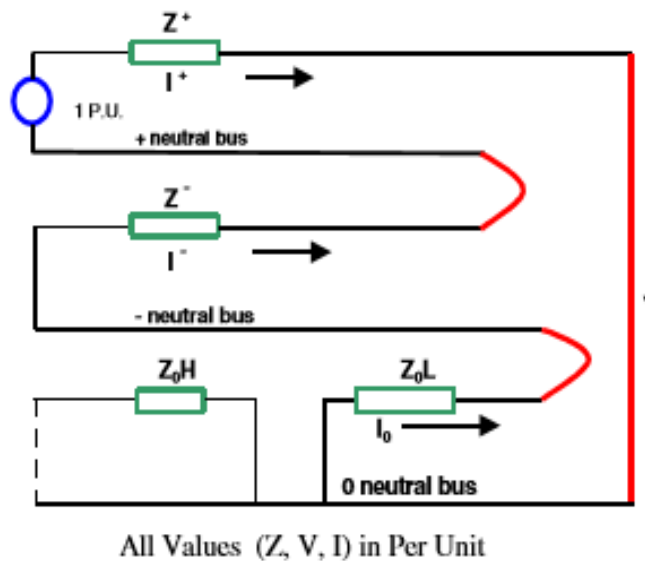


Figura 6.9: Circuito equivalente de la secuencia directa, inversa y homopolar [6].

Para el circuito de la Figura 6.9 se puede escribir [6]:

$$I_0 = I^+ = I^- = \frac{1}{(Z^+) + (Z^-) + (Z_0)} \quad (6.3)$$

Despejando Z_0 obtenemos:

$$Z_0 = \frac{1}{I_0} - [(Z^+) + (Z^-)] \quad (6.4)$$

Si despreciamos la resistencia y sólo tenemos en cuenta la parte de la reactancia, y además para los transformadores $Z^+=Z^-$ obtenemos [6]:

$$X_0 = \frac{1}{I_0} - 2(X^+) \quad (6.5)$$

Reescribiendo la ecuación, multiplicando por 3 en el numerador y en el denominador de la fracción:

$$X_0 = \frac{3*1}{3*I_0} - 2(X^+) \quad (6.6)$$

$$\text{Donde, } 3 * I_0 = IF$$

Sustituyendo $3*I_0$ por IF , y multiplicando por 100 para obtener el porcentaje, nos queda:

$$X_0[\%] = \frac{300}{IF} - 2(X^+)\% \quad (6.7)$$

Donde IF es la intensidad de fase del transformador expresada en p.u., esto es

$$IF = \frac{I_{Falta}}{I_{NOMINAL}} \quad (6.8)$$

Siendo I_{Falta} la intensidad que circularía en el caso de una falta monofásica a tierra teniendo el transformador aplicada la plena tensión. Dado que la corriente de falta se mide en el secundario, la intensidad nominal que hay que emplear en la expresión es la intensidad nominal secundaria [6].

Reescribiendo la ecuación 6.7 nos queda:

$$X_0\% = \left[\frac{300}{I_{Falta}} * I_{NOMINAL} \right] - 2(X^+)\% \quad (6.9)$$

Donde la intensidad de falta está relacionada con la intensidad de ensayo de la siguiente forma:

$$I_{Falta} = \frac{V_{NOMINAL}}{V_{ENSAYO}} * I_{ENSAYO} \quad (6.10)$$

Por tanto, introduciendo (6.10) en (6.9) llegamos a:

$$X_0\% = \left[\frac{300 * I_{NOMINAL}}{\frac{V_{NOMINAL} * I_{ENSAYO}}{V_{ENSAYO}}} \right] - 2(X^+)\% \quad (6.11)$$

La ecuación final es [6]:

$$X_0(\%) = 300 * \left[\frac{V_{ENSAYO} * I_{NOMINAL}}{V_{NOMINAL} * I_{ENSAYO}} \right] - 2(X^+)\% \quad (6.12)$$

Como tensión de ensayo se puede tomar la semisuma de la tensión en las fases sanas del secundario, en cuyo caso como tensión nominal se debe tomar la tensión nominal fase-neutro del secundario.

Los resultados del ensayo de medida de impedancia homopolar para el transformador con arrollamientos interconectados se exponen en el Capítulo 8, apartado 8.2.4.

Capítulo 7

SIMULACIONES REALIZADAS

7.1. EMTP-ATP

EMTP-ATP es un programa utilizado para simular transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en sistemas eléctricos polifásicos de potencia. Inicialmente fue desarrollado con otros programas, como alternativa digital del Analizador de Transitorios en Redes (TNA – Transient Network Analyzer). Posteriormente, durante un período de quince años, se ha ampliado considerablemente, resultando actualmente un programa de amplia difusión y utilización en todo el mundo [17].

El EMTP-ATP fue desarrollado en la década de los años 60 por el Dr. Hermann Dommel, quien cedió el programa a la Bonneville Power Administration (BPA). Desde entonces, este programa ha sido expandido y distribuido bajo la dirección del BPA. Algunos modelos han sido desarrollados dentro de la misma y otros han sido desarrollados por otras empresas y universidades [17].

Los estudios que involucran el uso del EMTP-ATP, tienen objetivos encuadrados dentro de dos categorías. Una es el diseño, la cual incluye la coordinación del aislamiento, dimensionamiento de los equipos, especificación de los equipos de protección, diseño de los sistemas de control, etc. La otra es la solución de problemas de operación, tales como faltas en los sistemas y análisis de los transitorios que normalmente ocurren en la operación del sistema [17].

7.1.1. Módulos que se pueden representar en ATP

La representación de los circuitos eléctricos se realiza en la ventana ATPDraw. En esta sección se encuentran todos los componentes que pueden aparecer en un circuito. Todos estos componentes pueden ser dimensionados con los datos que corresponden al caso que se pretende estudiar [12].

La Tabla 7.1 muestra los principales elementos para la configuración de circuitos eléctricos que ofrece ATPDraw:

Sondas mono y trifásicas	<ul style="list-style-type: none"> - Puntas de prueba para la tensión de un nodo, la tensión de una rama, la corriente... - Trasposición de fases - Colector (Acoplador entre circuitos multifásicos y monofásicos)
Fuentes	<ul style="list-style-type: none"> - Fuentes DC y AC. Pueden conectarse o no a tierra - Generadores tipo rampa - Fuentes tipo impulso
Máquinas	<ul style="list-style-type: none"> - Máquinas síncronas - Máquinas de inducción - Máquina universal
Transformadores	<ul style="list-style-type: none"> - Transformador ideal monofásico - Transformador trifásico - Transformador saturable monofásico - Transformador saturable trifásico - Modelo híbrido - Subrutinas de obtención de parámetros
Interruptores	<ul style="list-style-type: none"> - Interruptor convencional controlado por tiempo - Interruptor controlado por tensión - Diodos, tiristores - Interruptor controlado por señales de control (TACS)
Líneas y cables	<ul style="list-style-type: none"> - De parámetros concentrados: equivalente PI y RL componentes acoplados - De parámetros distribuidos: componentes distribuidos con frecuencia constante
Ramas	<ul style="list-style-type: none"> - Ramas lineales: monofásicas y trifásicas con componentes no acoplados - Ramas no lineales: Resistencias monofásicas y bobinas saturables con componentes no lineales. - Pararrayos de óxidos metálicos
Sistemas de control	<ul style="list-style-type: none"> - TACS (Transient Analysis of Control Systems) - MODELS

Tabla 7.1: Componentes a diseñar en ATPDraw [12].

7.2 **MÓDULOS EMPLEADOS**

7.2.1 Módulo de fuente

En ATPDraw hay diferentes tipos de fuentes con las que simular circuitos, tales como Fuentes de Tipo Escalón, Tipo Rampa, de Tipo Impulso etc...

Sin embargo, en este Trabajo Fin de Grado se utilizarán las Fuentes de Tipo Senoidal para las simulaciones. El símbolo de este tipo de fuente representado en ATPDraw es el siguiente:



Figura 7.1: Símbolo de Fuente Senoidal en ATPDraw [Captura de pantalla en ATP].

El comportamiento de esta fuente en el tiempo viene definido en la Figura 7.2:

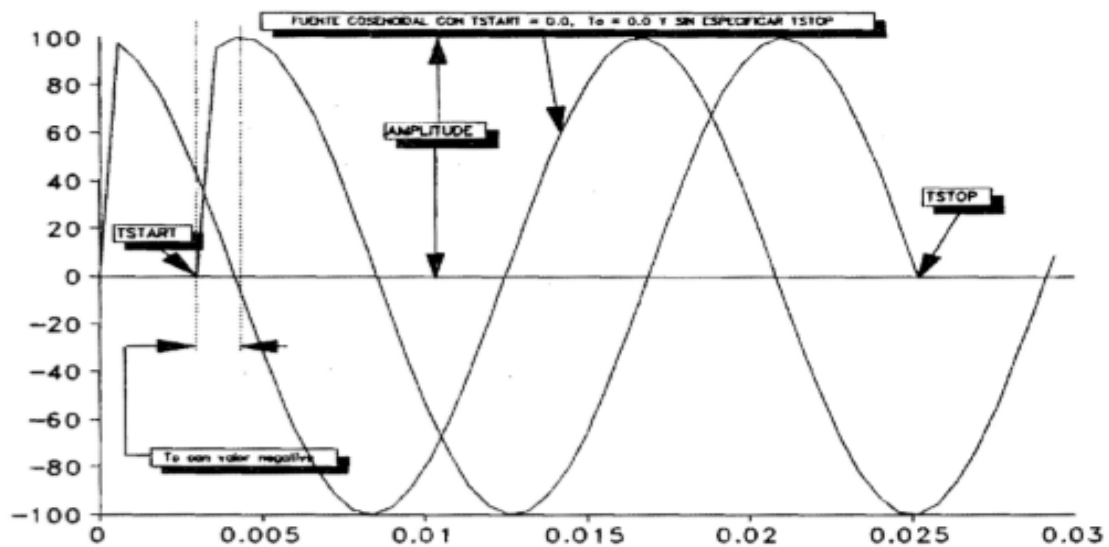


Figura 7.2: Comportamiento en el tiempo de la Fuente Tipo Senoidal [12].

Para diseñar esta onda de tensión tendremos que proceder a la configuración en ATPDraw que se representa en la Figura 7.3.

Estos son los parámetros a completar para la configuración de la Fuente de Tensión:

Component: ACSOURCE

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
AmplitudeA	Volt	1000	AC	1	
Frequency	Hz	50			
PhaseAngleA	degrees	0			
StartA	sec	-1			
StopA	sec	100			

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Type of source: Current Voltage

Num phases: Single 3-phase 3*1-phase

Angle units: Degrees Seconds

Amplitude: Peak L-G RMS L-G RMS L-L

Grounding: Grounded Ungrounded Hide

Figura 7.3: Configuración en ATPDraw de una Fuente Tipo Senoidal [Captura de pantalla en ATP].

Como podemos observar en la Figura 7.3, para la configuración de la fuente en ATPDraw tendremos que introducir los datos correspondientes al valor de amplitud de tensión, la frecuencia, el desfase o también introducir el tiempo en el que la fuente comienza a dar tensión, así como el momento en el dicha fuente deja de dar tensión. También se puede observar en la esquina inferior izquierda de la Figura 7.3 que también se puede tratar esta fuente como fuente de corriente. En la parte inferior también tenemos la opción de cambiar las unidades de ángulo, de número de fases, conexión a tierra de la fuente etc..

7.2.2 Módulo de Interruptor

ATPDraw dispone de varios tipos de interruptores, entre los que se encuentran los interruptores controlados por tensión, interruptores controlados por tiempo o interruptores de medida [12].

En las simulaciones realizadas en este Trabajo Fin de Grado se van a utilizar interruptores controlados por tiempo representados en ATPDraw con el icono de la Figura 7.4:



Figura 7.4: Interruptor trifásico controlado por tiempo [Captura pantalla ATP].

Los valores que hay que introducir para configurar el interruptor se representan en la Figura 7.5.

DATA	UNIT	VALUE
T-cl_1	s	-1
T-op_1	s	1000
T-cl_2	s	-1
T-op_2	s	1000
T-cl_3	s	-1
T-op_3	s	1000
I_max	Amps	0

NODE	PHASE	NAME
IN1	ABC	N2
OUT1	ABC	N3

Copy Paste Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output: 0 - No Hide

Figura 7.5: Configuración interruptor en ATPDraw [Captura pantalla ATP].

Como se observa en la Figura 7.5, se deberán introducir datos correspondientes al tiempo de cierre (puede ser negativo) y tiempo de apertura para cada una de las fases. También está la opción de establecer una corriente máxima de interrupción. Además, existe la posibilidad de realizar la configuración de un interruptor para una línea monofásica.

7.2.3 Módulo de Transformador

El módulo del transformador es el más importante debido a que el Trabajo Fin de Grado consiste en analizar el comportamiento de dos transformadores colocados en paralelo conectando sus secundarios entre sí.

ATPDraw dispone de varios modelos de transformadores, cada uno de los cuales tiene distintas características. Los más importantes son los siguientes modelos [19]:

1. BCTRAN
2. TRELEG
3. TROPMAG

Los tres modelos descritos en este capítulo detallan el comportamiento de un transformador a frecuencia industrial [19].

El modelo BCTRAN es el que vamos a emplear en este Trabajo Fin de Grado. Es por este motivo por el que se analizará con más detalle que el resto de modelos.

1. BCTRAN.

El modelo de transformador BCTRAN surgió a partir de un modelo llamado Saturable, el cual presentaba grandes limitaciones en el momento de modelar transformadores trifásicos. El modelo Saturable incorporaba en su entrada de datos una tabla en la cual se introducían los valores eficaces de tensión y corriente del ensayo de vacío y el programa ATP utilizaba estos datos para crear una curva característica mediante la rutina SATURA y así se representaba el núcleo conectándolo finalmente al primario del transformador. Este modelo consideraba a sus elementos como desacoplados y era ampliamente usado para representar transformadores monofásicos, mientras que no tuvo la misma aceptación para transformadores trifásicos. Por tanto, el modelo, el modelo Saturable evolucionó hasta llegar al modelo BCTRAN [19].

El modelo **BCTRAN** es una representación lineal simplificada de transformadores monofásicos y trifásicos de 2 ó 3 arrollamientos en forma de matrices de impedancias o admitancias en derivación teniendo en cuenta los acoplamientos mutuos entre devanados. La función para el cálculo de parámetros BCTRAN considera que, para un transformador trifásico con núcleo de tres columnas, la corriente de excitación para un ensayo de secuencia homopolar es relativamente alta y no puede ser despreciada. De esta forma, la admitancia en derivación de la rama de magnetización, se calcula a partir de los datos del ensayo de excitación [19].

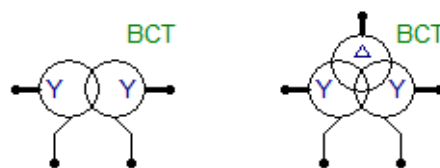


Figura 7.6: Izquierda: Símbolo de Modelo BCTRAN con dos arrollamientos y con conexión estrella-estrella y posibilidad de conectar neutro a tierra.

Derecha: Símbolo de Modelo BCTRAN con tres arrollamientos y con conexión estrella-estrella-triángulo con posibilidad de conectar neutro a tierra.

[Captura pantalla ATP]

Este modelo no permite la introducción de capacidades entre arrollamientos y entre éstos y el núcleo magnético.

En la Figura 7.7 nos encontramos con una de las partes de la ventana de configuración del Modelo BCTRAN. Como podemos observar, podremos elegir el número de fases (monofásico o trifásico), número de arrollamientos (2 ó 3), tipo de núcleo (banco de transformadores, acorazado...). También nos da la opción de elegir el tipo de conexión, y las tensiones asignadas a los arrollamientos de Alta Tensión y los de Baja Tensión.

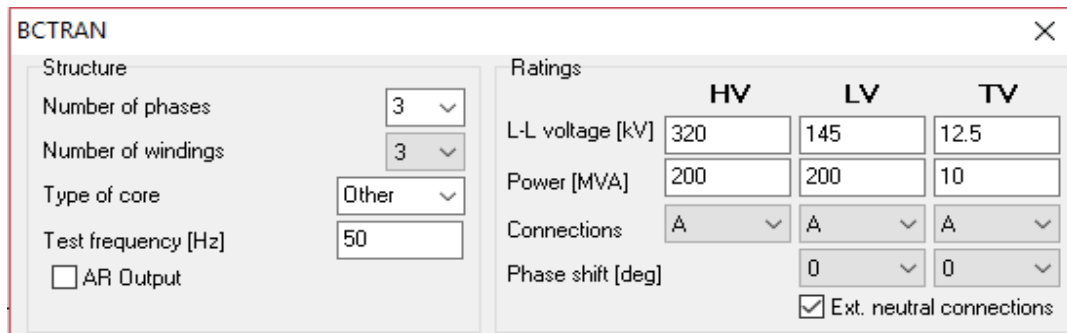


Figura 7.7: Primera parte de la ventana de configuración del Modelo BCTRAN.[Captura pantalla ATP]

La segunda parte de la ventana de configuración del Modelo BCTRAN se representa en la Figura 7.8. Aquí se introducen los datos correspondientes a los ensayos de fábrica del transformador. Hay dos tipos de valores; uno para los ensayos de secuencia directa y otro para los ensayos de secuencia homopolar. Finalmente, para completar el modelo, se requieren los datos del ensayo de cortocircuito realizado al transformador.

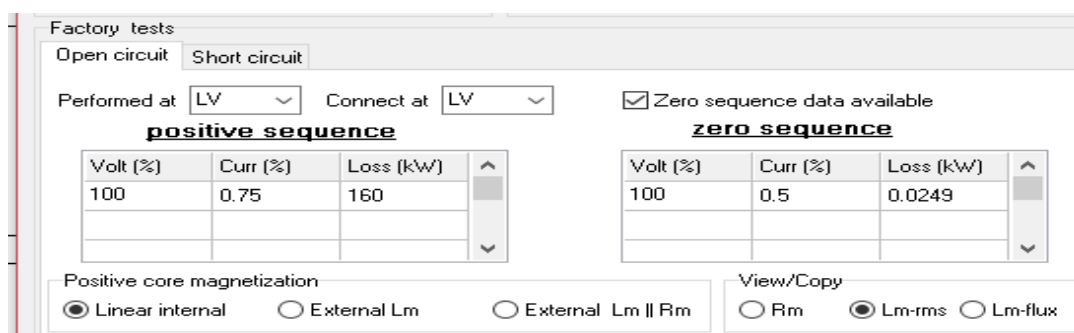


Figura 7.8: Segunda parte de la ventana de configuración del Modelo BCTRAN.
[Captura de pantalla ATP]

2. TRELEG

Este modelo representa un transformador con núcleo de tres columnas.

Los efectos de un núcleo de tres columnas en el modelado de un transformador se traducen en los diferentes valores determinados a partir de las impedancias de cortocircuito en secuencia directa y homopolar [19].

El circuito equivalente de secuencia homopolar del transformador depende del grupo de conexión del transformador, la puesta a tierra o no del neutro (rígidamente puesto a tierra o aislado en conexiones estrella) y del tipo de núcleo magnético (tres columnas, cinco columnas, acorazado o bancos monofásicos de transformación) [19].

En ausencia de cualquier tipo de dato de ensayo, la impedancia de magnetización de secuencia directa de los devanados (en p.u) puede asumirse como que aumenta conforme aumenta el diámetro, mientras que la impedancia de magnetización de secuencia homopolar decrece. También señala que las variaciones de un devanado con respecto al otro serán aproximadamente iguales a la reactancia de cortocircuito de secuencia directa entre los mismos [19].

3. TROPMAG

Este modelo toma en cuenta cualquier topología de un circuito magnético formado por un núcleo y sus devanados, para así crear una representación basada en un circuito eléctrico equivalente. Para unidades con tres o cinco columnas, cada columna es modelada individualmente y se agrega a una matriz de admitancias reproduciendo el correcto acoplamiento magnético entre devanados. Es necesario un tercer devanado adicional o devanado ficticio para establecer dicha interfaz, ya que las columnas del núcleo están aisladas eléctricamente de los devanados. Este modelo requiere la siguiente información eléctrica: datos de excitación, datos de los devanados (identificados y caracterizados por el usuario y datos del ensayo de cortocircuito [19].

Comparación de modelos

BCTRAN permite una impedancia de magnetización infinita, mientras que TRELEG supone que la impedancia de magnetización es finita (para grandes valores de la impedancia magnetizante TRELEG pueden producir un modelo mal diseñado) [19].

También TRELEG degenera a una matriz de impedancia acoplada en DC (que puede o no ser estable) mientras que BCTRAN se convierte en una matriz de resistencia no acoplada en corriente continua que representa resistencias de los bobinados [19].

En general, BCTRAN tiene un mejor comportamiento que TRELEG.

Aunque conceptualmente diferente, desde un punto de vista numérico, TROPMAG es una extensión de BCTRAN que permite la reproducción de los ensayos de secuencia homopolar específicos que BCTRAN no puede reproducir [19]. Sin embargo, TROPMAG requiere datos de ensayos que pueden no estar disponibles para las fichas de datos estándar de fábrica [19].

7.3 CIRCUITOS IMPLEMENTADOS

7.3.1 Implementación del Método de oposición en ATPDraw:

En la Figura 7.9 se representa el circuito en ATPDraw que representa el funcionamiento del Método de oposición de transformadores. Los elementos que aparecen en él han sido descritos en el apartado anterior, así como el proceso de configuración de cada uno de ellos. El resto de elementos que aparecen en el circuito son tanto voltímetros como amperímetros necesarios para medir las tensiones y corrientes para su posterior análisis. En bornas del interruptor de acoplamiento secundario se ha puesto un voltímetro diferencial, como se observa en la figura 7.9.

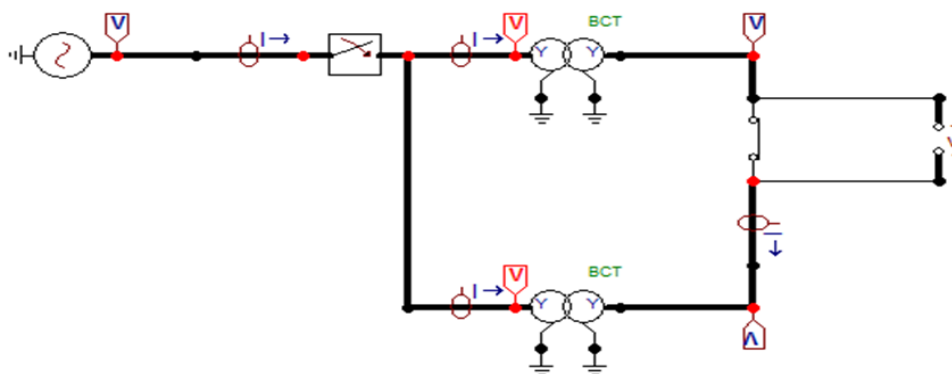


Figura 7.9: Método de oposición en ATPDraw [Captura de pantalla en ATP].

En el Capítulo 8 se mostrarán los resultados del estudio teórico, así como de las simulaciones reportadas por ATPDraw y se analizará que combinación de tomas del transformador ensayado en el Laboratorio de Alta Tensión (cuyos datos se describirán en el apartado 8) es la idónea para que por el secundario circule la corriente nominal del transformador.

7.3.2 *Implementación del Método de oposición con presencia de Falta Serie*

En la Figura 7.10 observamos que se han colocado resistencias de puesta a tierra en el neutro del lado primario de los transformadores. Estos elementos se colocan con el objetivo de asegurarnos que la secuencia homopolar influye en el lado secundario introduciendo un valor alto de resistencia para aproximarlos a un circuito abierto en dicho lado primario.

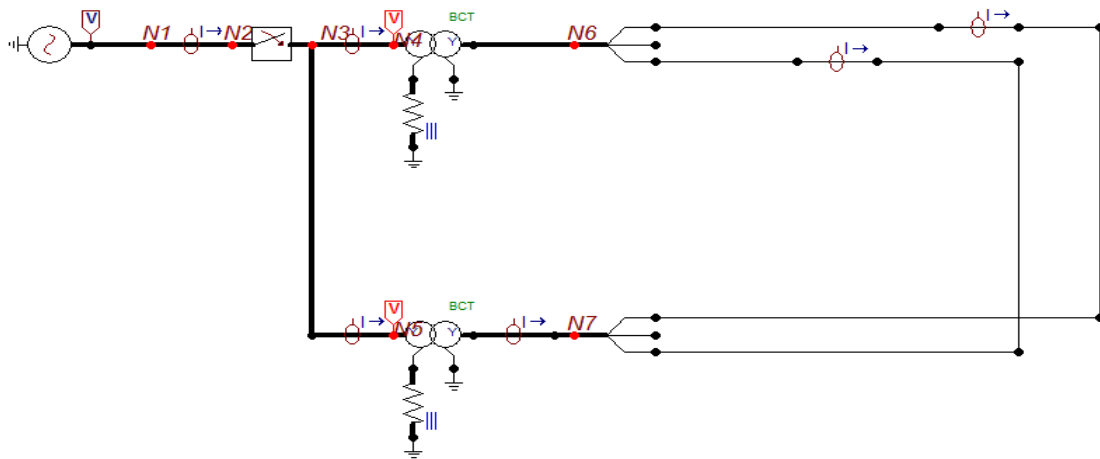


Figura 7.10: Método de oposición en ATPDraw con la presencia de Falta serie. [Captura de pantalla de ATP]

Capítulo 8

RESULTADOS

8.1 PLACA DE CARACTERÍSTICAS DEL TRANSFORMADOR A ENSAYAR

En los ensayos hemos utilizado un transformador trifásico de 50 Hz cuya potencia asignada es 25KVA. Los datos correspondientes a la placa característica de dicho transformador se exponen a continuación, tanto en la Figura 8.1 como en las Tablas 8.1, 8.2 y 8.3



Figura 8.1: Placa característica del transformador ensayado en el Laboratorio de Alta Tensión [Foto propia].

Como se puede observar tanto en la Figura 8.1 como en la Tabla 8.2, el transformador dispone de cinco tomas en el lado de Alta Tensión. Estas tomas son las que se van a ir combinando para observar el comportamiento del Ensayo del Método de Oposición de transformadores.

La placa de características del transformador ensayado se representa a continuación, en las Tablas 8.1, 8.2 y 8.3:

Norma UNE	21.429
Año de fabricación	2000
Potencia asignada (KV_a)	25
Símbolo de acoplamiento	Yzn11
Impedancia CC a 75°C (%)	4.03
Refrigeración	Natural
Líquido aislante	Aceite
Nivel de potencia acústica dB (A)	50
Material AT/BT	Cu
Volumen aislante a 20°C	95
Masa Total (Kg)	328
Masa a desencubrir (Kg)	182

Tabla 8.1: Datos de la placa del transformador [Elaboración propia].

En la Tabla 8.2 se exponen los valores correspondientes a la parte de Alta Tensión de la placa de características del transformador ensayado en el Laboratorio de Alta Tensión:

ALTA TENSIÓN		
Toma	Tensión (V)	Corriente (A)
1	16125	0.96
2	15750	
3	15375	
4	15000	
5	14625	

Tabla 8.2: Datos de la placa del transformador referidos a la parte de Alta Tensión [Elaboración propia].

En la Tabla 8.3 se exponen los valores correspondientes a la parte de Baja Tensión de la placa de características del transformador ensayado en el Laboratorio de Alta Tensión:

BAJA TENSIÓN		
Tensión (V)	Corriente (A)	Potencia (Kva)
420	34	25

Tabla 8.3: Datos de la placa del transformador referidos a la parte de Baja Tensión. [Elaboración propia].

Como se observa en la Figura 8.1 el grupo de conexión del transformador es Yz. Es de destacar que en la tapa del transformador sólo se han extraído tres terminales del arrollamiento de Alta Tensión, esto es, no se dispone de borna de neutro. Por el contrario del lado de Baja Tensión se han extraído cuatro bornas (tres fases más neutro).

8.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL TRANSFORMADO

8.2.1. Ensayo de vacío ante secuencia directa

En este caso se ha elegido realizar el ensayo alimentando el transformador por el lado de BT, ya que en el Laboratorio de Alta Tensión de la Escuela no se dispone de una fuente de alimentación de 15.000 V y además el trabajar con 15.000 V requeriría unas medidas de seguridad y la realización de un curso de riesgos laborales, que en este caso no se ha hecho.



Figura 8.2: Conexión del ensayo de vacío en el Lab. De Alta Tensión [Foto propia].

Los resultados del ensayo se muestran en la tabla 8.4. Los parámetros de la rama magnetizante del transformador se obtienen como con las ecuaciones que se muestran a continuación de la Tabla 8.4:

U1(V)	U2(V)	I ₁ (A)	I ₂ (A)	W ₁ (W)	W ₂ (W)
421	423	1,045	0,808	255	-135

Tabla 8.4: Datos obtenidos en el Laboratorio de Alta Tensión para el Ensayo de Vacío [Elaboración propia].

$$P_0 = W_1 + W_2 \qquad I_0 = \frac{2 \cdot I_1 + I_2}{3} \qquad \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} V_1 I_0}$$

$$I_m = I_0 \cdot \sin \varphi_0 \longrightarrow X_0 = \frac{\frac{V}{\sqrt{3}}}{I_m} \text{ (Reactancia de vacío)}$$

$$I_w = I_0 \cdot \cos \varphi_0 \longrightarrow R_0 = \frac{\frac{V}{\sqrt{3}}}{I_w} \text{ (Resistencia de vacío)}$$

Los resultados del ensayo de vacío vienen representados en la Tabla 8.5:

I ₀ (A)	I ₀ (%)	P ₀ (W)	cos φ ₀	I _m	I _w
0,966	2,8	120	0,17	0,95	0,164

Tabla 8.5: Resultados del Ensayo de Vacío [Elaboración propia].

Por tanto las impedancias del circuito son las que aparecen en la Tabla 8.6:

Resultados Ensayo Vacío	
R ₀ (Ω)	X ₀ (Ω)
1485	256,5

Tabla 8.6: Parámetros de la rama paralelo del circuito obtenidos mediante el Ensayo de Vacío [Elaboración propia].

8.2.2 Ensayo de cortocircuito ante secuencia directa

El ensayo de cortocircuito se llevó a cabo alimentando el transformador desde el lado de alta tensión del transformador, la razón de ello es que no se dispone en el laboratorio de una fuente de alimentación de 34 A mientras el lado de AT requiere tan sólo de 0,96 A para realizar el ensayo.

El montaje del ensayo se muestra en la figura 6.11 y los resultados obtenidos para las tres tomas principales del transformador (tomas 1, 3 y 5) se muestran en la Tabla 8.7

En la Figura 8.3 se muestra un imagen de las conexiones del transformador durante el día del ensayo en el Laboratorio de Alta Tensión:

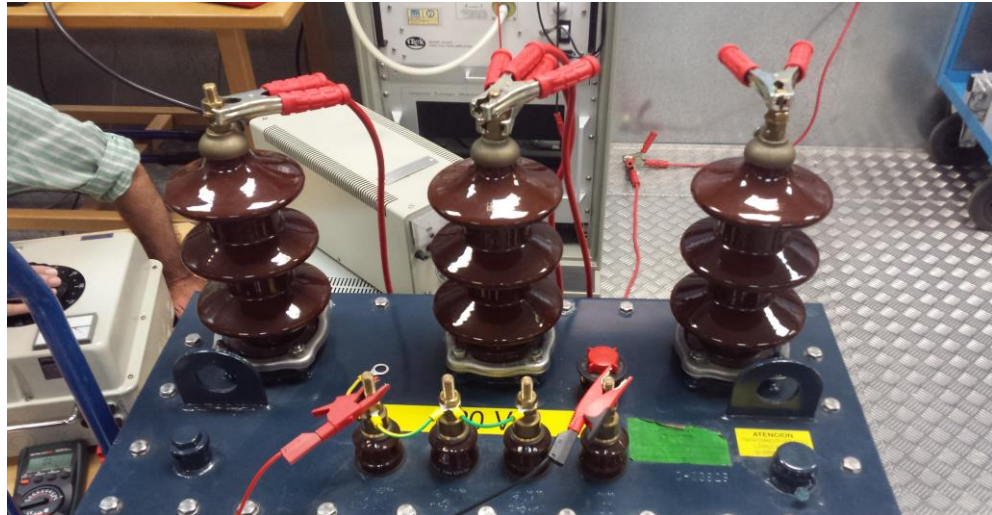


Figura 8.3: Conexión para el ensayo de cortocircuito [Foto propia].

Toma	U1(V)	U2(V)	I1(A)	I2(A)	W1(W)	W2(W)	U _{cc} (V)	P _{cc} (W)
1	421	420	0,596	0,626	49	252	420,5	301
3	421	420	0,643	0,670	52	270	420,5	322
5	421	419	0,689	0,720	58	289	420	347

Tabla 8.7: Datos obtenidos en el Laboratorio de Alta Tensión para el Ensayo de cortocircuito para las tomas 1,3 y 5 [Elaboración propia].

Los parámetros del circuito equivalente son:

Potencia cortocircuito:

$$P_{cc} = W_1 + W_2$$

Tensión cortocircuito:

$$U_{cc} = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

Corriente cortocircuito:

$$I_{cc} = \frac{I_1 + I_2}{2}$$

Resistencia cortocircuito:

$$R_{cc} = \frac{P_0}{3 \cdot I_{cc}^2}$$

Impedancia cortocircuito:

$$Z_{cc} = \frac{U_{cc}}{I_{cc}}$$

Reactancia cortocircuito:

$$X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

Con ello las impedancias del transformador se muestran en la Tabla 8.8:

Resultados ensayo cortocircuito		
Toma	Z _{cc} (%)	P _{cc} (W)
1	3,820	646
2	3,87	651
3	3,911	658
4	3,98	669
5	4,023	681

Tabla 8.8: Resultados del ensayo de cortocircuito [Elaboración propia].

8.2.3. Ensayo clásico de medida de la impedancia homopolar

El ensayo clásico de medida de la impedancia homopolar de un transformador trifásico, vista desde su lado primario o secundario, se puede obtener a partir de un ensayo consistente en alimentar las tres fases con una misma tensión. El circuito de ensayo se muestra en la Figura 8.4, siendo el valor V el de la tensión aplicada con la fuente de alimentación e I el valor de la corriente aportada por ella..

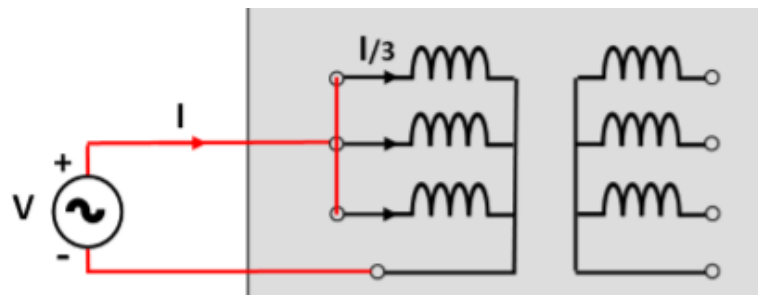


Figura 8.4: Circuito de ensayo clásico para la medida de la impedancia homopolar [10].

La impedancia homopolar se obtiene como:

$$Z_0 = \frac{U}{I/3}$$

Como se indicó en el apartado 6.3.2, este ensayo es el que se realiza en los transformadores con arrollamientos en estrella, pero no es válido para transformadores con arrollamientos en zig-zag.

Los resultados del ensayo clásico de impedancia homopolar se muestran en la Tabla 8.9:

Toma	U(V)	I(A)	P(W)	Z ₀ (Ω)	Z ₀ (%)
1	0,88	8,34	7,4	0,31	4,5
2	0,88	8,53	7,51	0,309	4,4
3	0,836	7,97	6,66	0,315	4,5
4	0,884	8,2	7,24	0,323	4,6
5	1,272	7,78	9,9	0,49	7,0

Tabla 8.9: Resultados del ensayo de medida de impedancia homopolar [Elaboración propia].

8.2.4. Ensayo de medida de la impedancia homopolar recomendado para transformadores con arrollamientos en zig-zag

Como se indicó en el apartado 6.3.4. para los transformadores con arrollamientos en zig-zag, el ensayo normalizado para obtener los parámetros del circuito equivalente ante secuencia homopolar es el ensayo de cortocircuito monofásico [6].

Las impedancias se obtienen de la ecuación (6.12), que es la proporcionada por Rosselli para transformadores con arrollamientos interconectados.

$$X_0(\%) = 300 * \left[\frac{V_{ENSAYO} * I_{NOMINAL}}{V_{NOMINAL} * I_{ENSAYO}} \right] - 2(X^+)\%$$

A continuación, en la Tabla 8.10 se muestran los resultados arrojados en el Ensayo de impedancia homopolar en el Laboratorio de Alta Tensión:

TOMA	V _{NOMINAL} (V)	I _{NOMINAL} (A)	V _{ENSAYO} (V)	I _{ENSAYO} (A)	X ⁺ [%]	X ₀ (%)
1	16.125	34	422	30	3,82	1,26
1	16.125	34	424	30,5	3,82	1,15
1	16.125	34	424	30,5	3,82	1,15
2	15.750	34	423	31	3,87	1,09
2	15.750	34	423	30,5	3,87	1,24
2	15.750	34	423	31	3,87	1,10
3	15.375	34	423	32	3,91	0,94
3	15.375	34	423	31	3,91	1,22
3	15.375	34	423	31,5	3,91	1,09
4	15.000	34	423	32	3,98	1,03
4	15.000	34	423	32	3,98	1,03
4	15.000	34	423	32	3,98	1,04
5	14.625	34	423	33	4,02	0,90
5	14.625	34	423	32	4,02	1,18
5	14.625	34	424	33	4,02	0,92

Tabla 8.10: Resultados de las impedancias homopolares para transformadores en zigzag (Ensayo de Rosselli) [Elaboración propia].

Calculando el valor medio de la impedancia entre los tres cortocircuitos realizados resultan los siguientes valores de impedancia homopolar, que aparecen en la Tabla 8.11

Toma	Z ₀ (%)
1	1,18
2	1,14
3	1,09
4	1,03
5	1

Tabla 8.11: Impedancia homopolar correspondiente a cada una de las tomas [Elaboración propia].

8.3 ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE LOS TRANSFORMADORES EN AUSENCIA DE FALTA

8.3.1 Estudio de la corriente en los transformadores en función de la combinación de tomas de los transformadores

El circuito que se va a analizar es el correspondiente a la Figura 8.5:

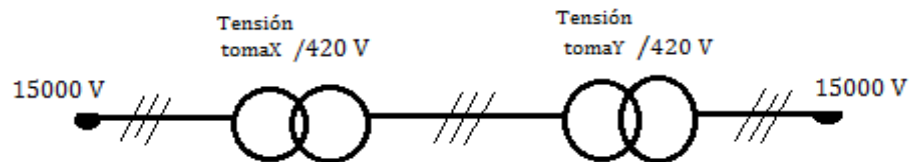


Figura 8.5: Método oposición ante comportamiento normal [Elaboración propia].

CASO 1: Toma 1/Toma 5:

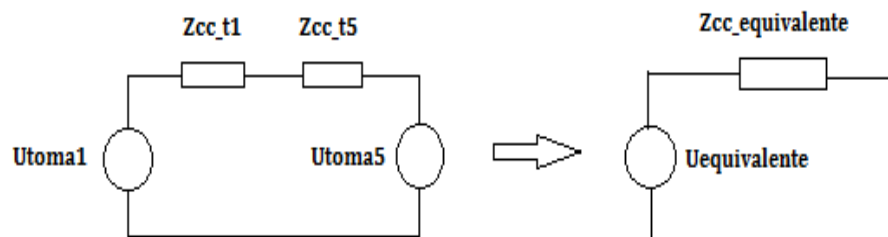


Figura 8.6: Circuito equivalente correspondiente al CASO 1 [Elaboración propia].

Para resolver el circuito trabajaremos desde el lado de BT. Las tensiones asignadas del primario de los dos transformadores son distintas aunque las tensiones secundarias de ambos transformadores coinciden (420V), por lo que

$$U_{TOMA1} = 15000 \frac{420}{16125 \cdot \sqrt{3}} = 391/\sqrt{3} \text{ V}$$

$$U_{TOMA5} = 15000 \frac{420}{14625 \cdot \sqrt{3}} = 431/\sqrt{3} \text{ V}$$

Al ser idéntico el índice horario las tensiones están en fase. Por tanto la tensión que queda aplicada a la impedancia de ambos transformadores es

$$U_{EQUIVALENTE} = 40/\sqrt{3} \text{ V}$$

Los datos de partida de los transformadores en las tomas 1 y 5 se muestran en la Tabla 8.12:

Transformador	ϵ_{cc}	P_{cc}	S_N
Toma1: 16125 V	3,82	646 W	25 KVA
Toma 5: 14625 V	4,023	681 W	25 KVA

Tabla 8.12: Datos conocidos para calcular el circuito equivalente del CASO 1 [Elaboración propia].

A partir de los datos de la Tabla 8.12 obtendremos las impedancias en ohmios referidos al lado de BT. Estas impedancias se muestran en la tabla 8.13:

$$Z_{CC} = \frac{\epsilon_{cc} \cdot U_N^2}{S_N \cdot 100} \quad I_N = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} \quad R_{cc} = \frac{P_{cc}}{3 \cdot I_N^2} \quad X_{cc} = \sqrt{Z_{cc}^2 - R_{cc}^2}$$

Transformador	I_{2N} (A)	Z_{cc} (Ω)	R_{cc} (Ω)	X_{cc} (Ω)
Toma1: 16125 V	34,36	0,269	0,182	0,198
Toma 5: 14625 V	34,36	0,283	0,192	0,207

Tabla 8.13 : Resultados circuito equivalente CASO 1 [Elaboración propia].

Con las impedancias se puede calcular el valor del fasor de la corriente del circuito equivalente, que es el siguiente:

$$I_{CASO1} = \frac{40/\sqrt{3}}{0,182+0,198j+0,192+0,207j} = 41,83[-47,28^\circ \text{ A}]$$

Esta corriente será utilizada para calcular la corriente de secuencia directa en el estudio de la falta serie.

Por tanto, el valor eficaz y el valor máximo de las corrientes en módulo correspondientes al ensayo en oposición en la toma indicada se reflejan en la Tabla 8.14:

$I_{EF_EQUIVALENTE}$ (A)	41,83
$I_{P_EQUIVALENTE}$ (A)	$41,83 \cdot \sqrt{2} = 59,15$

Tabla 8.14: Resultados corriente circuito equivalente [Elaboración propia].

CASO 2: Toma 1/Toma 3

Procediendo de la misma forma que en el apartado precedente

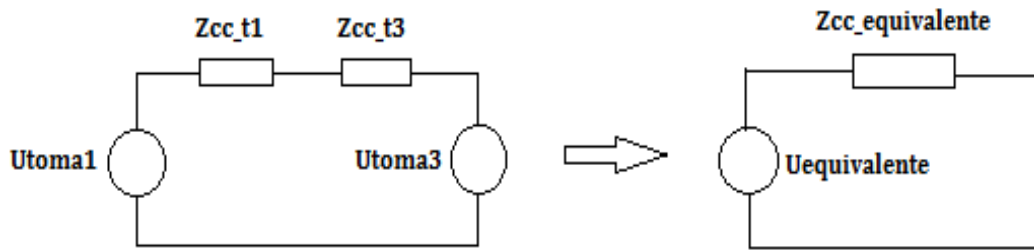


Figura 8.7: Circuito equivalente correspondiente al CASO 2 [Elaboración propia].

$$U_{TOMA1} = 15000 \frac{420}{16125 \cdot \sqrt{3}} = 391 / \sqrt{3} \text{ V}$$

$$U_{EQUIVALENTE} = 19 / \sqrt{3} \text{ V}$$

$$U_{TOMA3} = 15000 \frac{420}{15375 \cdot \sqrt{3}} = 410 / \sqrt{3} \text{ V}$$

Los datos de partida de los transformadores en las tomas 1 y 3 se muestran en la tabla 8.15:

Transformador	ϵ_{CC}	P_{CC}	S_N
Toma1: 16125 V	3,82	646 W	25 KVA
Toma 3: 15375 V	3,91	658 W	25 KVA

Tabla 8.15 : Datos conocidos para calcular el circuito equivalente del CASO 2 [Elaboración propia].

A partir de los datos de la Tabla 8.15, obtendremos las impedancias en ohmios referidos al lado de BT. Estas impedancias se muestran en la Tabla 8.16:

Transformador	I_N (A)	Z_{cc} (Ω)	R_{cc} (Ω)	X_{cc} (Ω)
Toma1: 16125 V	34,36	0,27	0,182	0,198
Toma 3: 15375 V	34,36	0,276	0,185	0,204

Tabla 8.16 : Resultados circuito equivalente CASO 2 [Elaboración propia].

Con estas impedancias se pueden obtener el valor eficaz y el valor máximo de las corrientes correspondientes al ensayo en oposición en las tomas indicadas. Estas corrientes se reflejan en la Tabla 8.17:

$I_{EF_EQUIVALENTE}$ (A)	20,09
$I_{P_EQUIVALENTE}$ (A)	$20,09 \cdot \sqrt{2} = 28,411$

Tabla 8.17: Resultados corriente circuito equivalente [Elaboración propia].

CASO 3: Toma 1/Toma 4

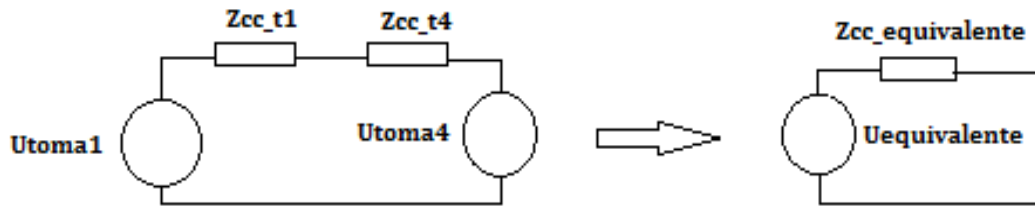


Figura 8.8: Circuito equivalente correspondiente al CASO 3 [Elaboración propia].

$$U_{TOMA3} = 15000 \frac{420}{16125 \cdot \sqrt{3}} = 391 / \sqrt{3} \text{ V}$$

$$U_{EQUIVALENTE} = 29 / \sqrt{3} \text{ V}$$

$$U_{TOMA5} = 15000 \frac{420}{15000 \cdot \sqrt{3}} = 420 / \sqrt{3} \text{ V}$$

Los datos de partida de los transformadores en las tomas 1 y 4 se muestran en la Tabla 8.18:

Transformador	ϵ_{CC}	P_{CC}	S_N
Toma 1: 16125 V	3,82	646 W	25 KVA
Toma 4: 15000 V	3,98	669 W	25 KVA

Tabla 8.18: Datos conocidos para calcular el circuito equivalente del CASO 3 [Elaboración propia].

A partir de los datos de la Tabla 8.18 obtendremos las impedancias en ohmios referidos al lado de BT. Estas impedancias se muestran en la Tabla 8.19:

Transformador	I_N (A)	Z_{CC} (Ω)	R_{CC} (Ω)	X_{CC} (Ω)
Toma 1: 16125 V	34,36	0,269	0,182	0,198
Toma 4: 15000 V	34,36	0,28	0,188	0,207

Tabla 8.19: Resultados circuito equivalente CASO 3 [Elaboración propia].

El fasor de corriente que circula por el circuito equivalente en este caso es la siguiente:

$$I_{CASO3} = \frac{29 / \sqrt{3}}{0,182 + 0,198j + 0,188 + 0,207j} = 30,49 [-47,28^\circ \text{ A}]$$

Se pueden obtener el valor eficaz y el valor máximo de las corrientes correspondientes al ensayo en oposición en la toma indicada. Estas corrientes se reflejan en la tabla 8.20:

$I_{EF_EQUIVALENTE} (A)$	30,49
$I_{P_EQUIVALENTE} (A)$	$30,49 \cdot \sqrt{2} = 43,13$

Tabla 8.20: Resultados corriente circuito equivalente [Elaboración propia]

Resumen de los resultados de todos los casos

En la Tabla 8.21 se resumen los valores eficaces de tensión y de las corriente en los tres casos en estudio. Se han estudiado más casos pero no aportan demasiada información adicional, por lo que no se reflejan en dicha tabla.

CASO 1(T1/T5)		CASO 2(T1/T3)		CASO 3(T1/T4)	
$I_{EF_EQUIVALENTE} (A)$	41,83	$I_{EF_EQUIVALENTE} (A)$	20,09	$I_{EF_EQUIVALENTE} (A)$	30,49
$I_{P_EQUIVALENTE} (A)$	59,15	$I_{P_EQUIVALENTE} (A)$	28,411	$I_{P_EQUIVALENTE} (A)$	43,13

Tabla 8.21; Comparación de los resultados obtenidos de los CASOS 1, 2 y 3 [Elaboración propia].

La corriente asignada en el lado de BT de los transformadores es 34 A. Como se puede ver cuando uno de los transformadores trabaja en la toma 1 y el otro en la toma 5 (CASO 1) los transformadores resultan sobrecargados. Sin embargo, trabajando uno de los transformadores en la toma 1 y otro en la toma 4 (CASO 3) la corriente es próxima a la nominal, lo cual sería adecuado para realizar el ensayo de calentamiento.

8.3.2 Simulación del Ensayo en oposición sin falta de los transformadores en función de la combinación de tomas de los transformadores.

El circuito implementado en el programa ATP es el que aparece en la figura 8.9:

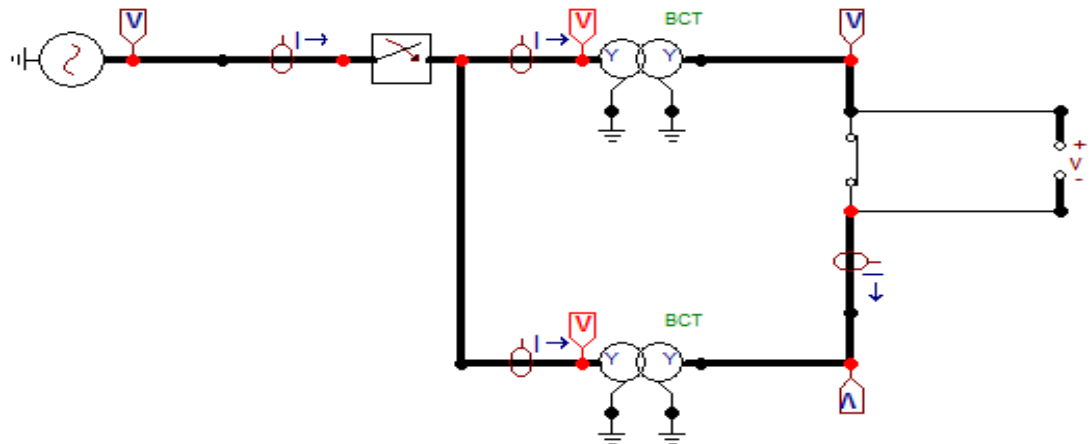


Figura 8.9: Circuito implementado en el programa ATP. [Captura de pantalla de ATP].

Los resultados se muestran a continuación:

CASO 1: Toma 1/Toma 5

Las simulaciones correspondientes a este caso se exponen a continuación, desde la Figura 8.10 a la Figura 8.13:

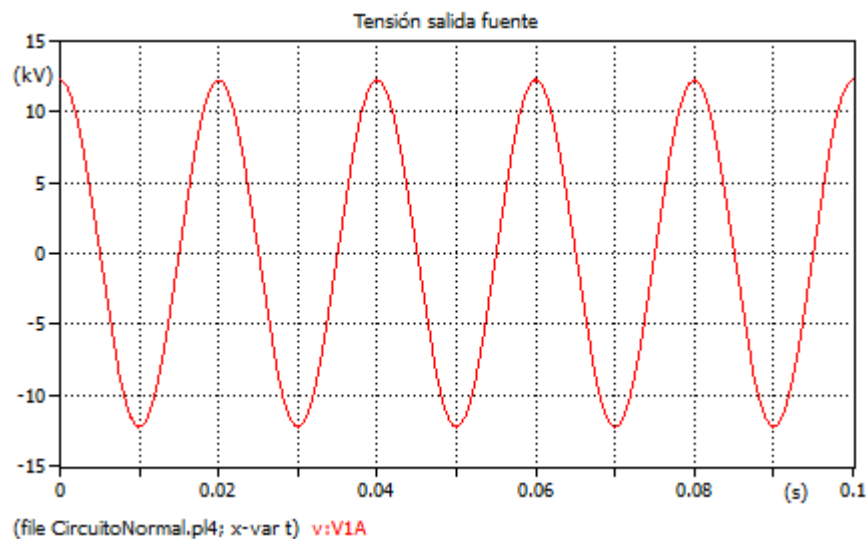


Figura 8.10: Tensión a la salida de la fuente.

Se puede observar que el valor pico de la tensión coincide con el que se ha introducido en la fuente como debe ocurrir:

$$V_p = 15 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 12,84 \text{ Kv}$$

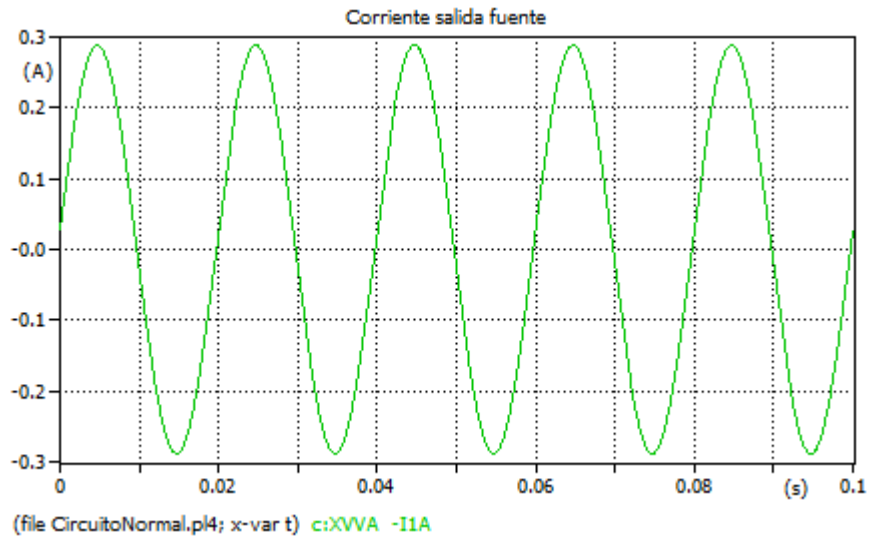


Figura 8.11: Corriente a la salida de la fuente.

Como se observa en la Figura 8.11, la fuente precisa para realizar este ensayo debe tener un dimensionado muy inferior al que se precisa para hacer el ensayo de calentamiento con el transformador en cortocircuito, que sería la mostrada en la Figura 8.12:

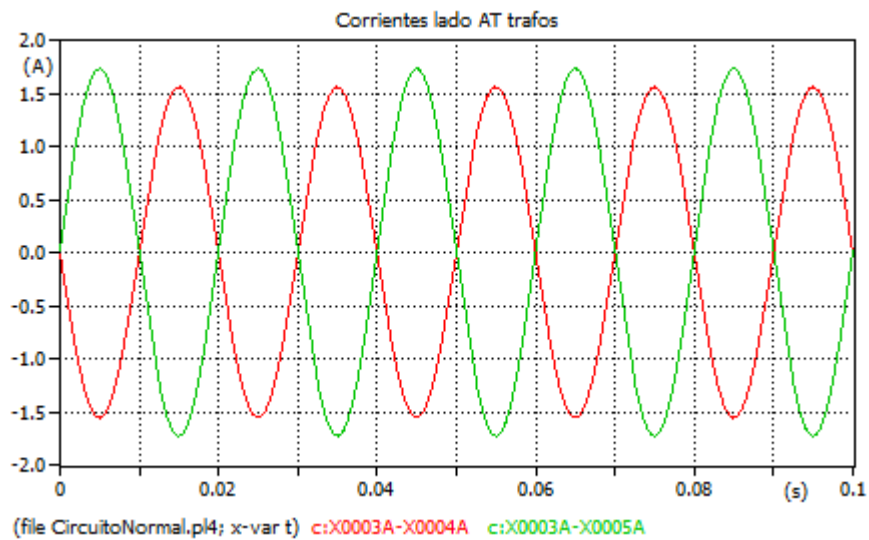


Figura 8.12: Corrientes a la entrada de los transformadores(AT).

Verde: Trafo con la Toma 5.

Rojo: Trafo con la Toma 1

Se observa que los valores pico coinciden con los cálculos de la corriente aplicando la relación de transformación para ambos transformadores en el lado de AT:

$$I_{p_{TOMA1}} = 59,15 \frac{420}{16125} = 1,54 \text{ A}$$

$$I_{p_{TOMA5}} = 59,15 \frac{420}{14625} = 1,69 \text{ A}$$

Dado que este apartado no se considera un objetivo fundamental del Trabajo fin de grado, en las simulaciones realizadas se ha utilizado una corriente de vacío del 0,5%, en lugar de la obtenida del ensayo de vacío del 2,8%, con el fin de que la corriente de vacío no tuviera influencia en el valor de la intensidad primaria de los transformadores. Caso de que se quisieran obtener resultados con mayor precisión, a la corriente calculada se le debería sumar fasorialmente (para el caso del transformador en la toma 5) o restar (para el caso del transformador en la toma 1) la corriente de vacío del transformador.

En la Figura 8.13 se muestra la corriente en el lado de BT de los transformadores:

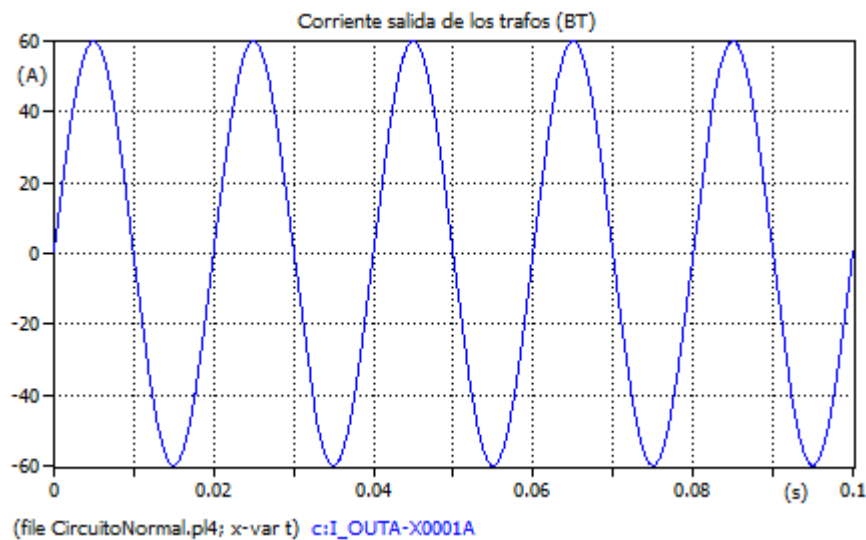


Figura 8.13: Corriente a la salida de los transformadores (BT).

En la Figura 8.13, podemos comprobar que el valor pico de la corriente coincide con el valor que hemos obtenido en el apartado 8.3.1.

CASO 2: Toma 1/Toma 3

En las siguientes figuras se muestran las corrientes en la fuente, en cada uno de los lados de AT y en el lado de BT en este caso:

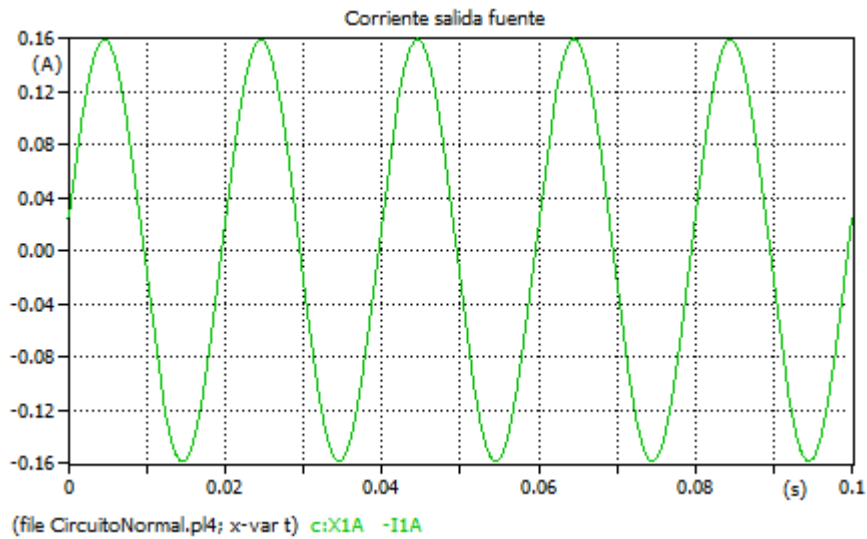


Figura 8.14: Corriente a la salida de la fuente.

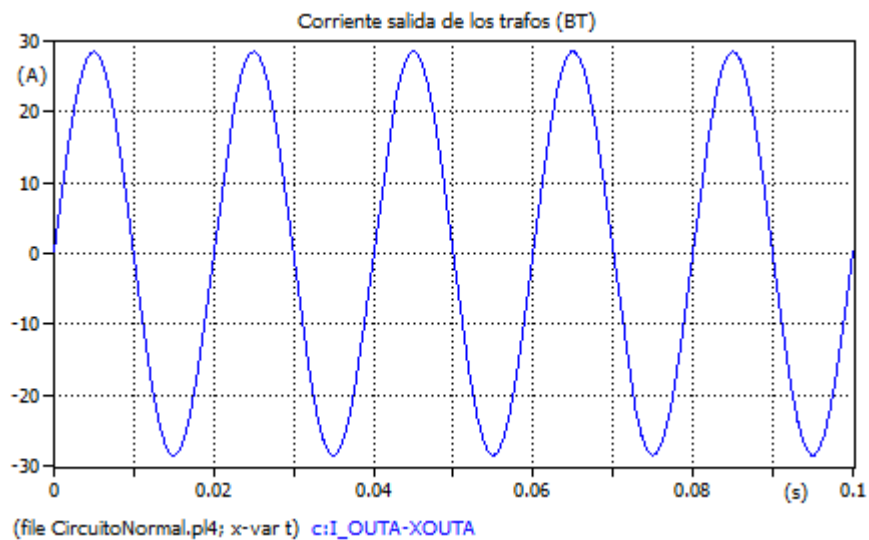


Figura 8.15: Corrientes a la salida de los transformadores (BT).

En la Figura 8.15, podemos comprobar que el valor pico de la corriente coincide con el valor que hemos obtenido en el apartado 8.3.1.

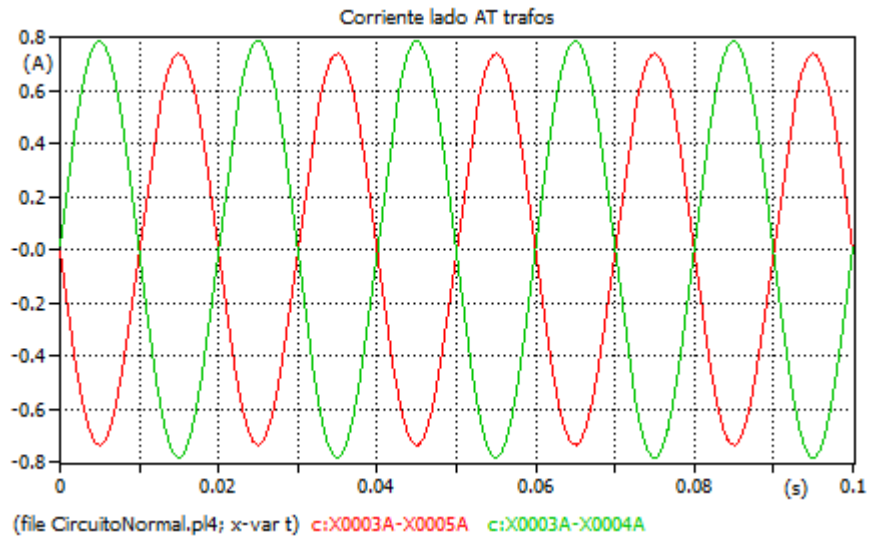


Figura 8.16: Corrientes a la entrada de los transformadores (AT)

Rojo: Corriente trafo Toma 1

Verde: Corriente trafo Toma 3

$$I_{p_{TOMA1}} = 28,411 \frac{420}{16125} = 0,74 \text{ A}$$

$$I_{p_{TOMA3}} = 28,411 \frac{420}{15375} = 0,78$$

CASO 3: Toma 1/Toma 4

En las siguientes figuras se muestran las corrientes en la fuente, en cada uno de los lados de AT y en el lado de BT en este caso.

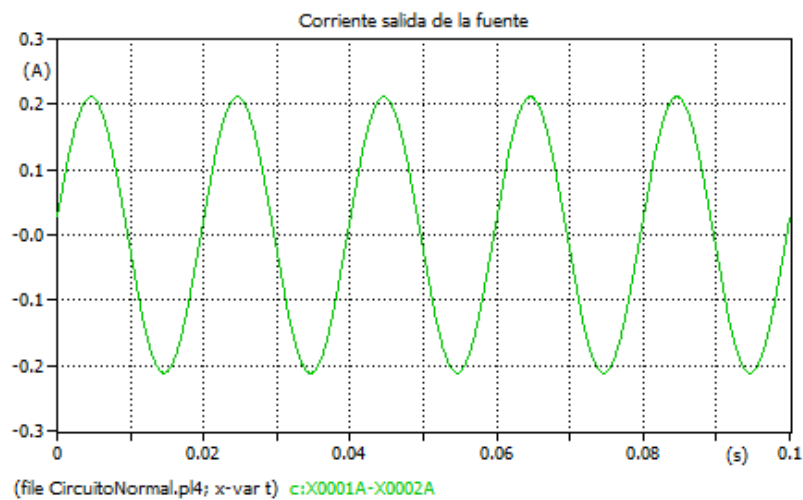


Figura 8.17: Corriente a la salida de la Fuente

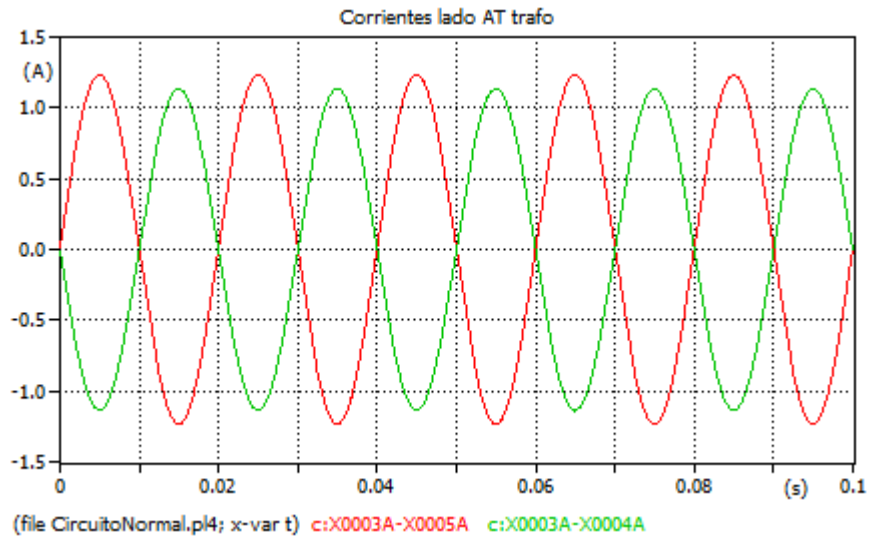


Figura 8.18: Corrientes a la entrada de los transformadores (AT)

Rojo: Corriente trafo Toma 4

Verde: Corriente trafo Toma 1

$$I_{pTOMA1} = 43,13 \frac{420}{16125} = 1,12 \text{ A}$$

$$I_{pTOMA4} = 43,13 \frac{420}{15000} = 1,207 \text{ A}$$

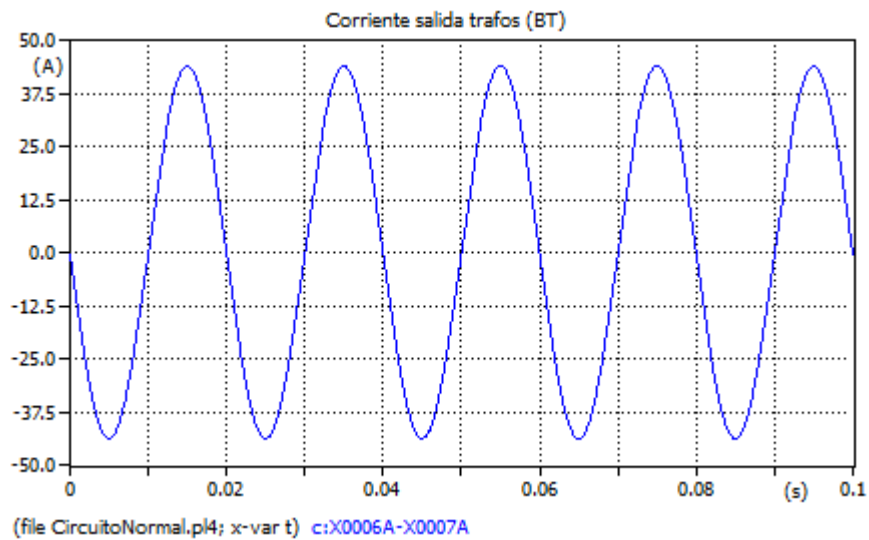


Figura 8.19: Corrientes a la salida de los transformadores.

En la Figura 8.19, podemos comprobar que el valor pico de la corriente coincide con el valor que hemos obtenido en el apartado 8.3.1.

8.4 ANÁLISIS DE LA FALTA SERIE

8.4.1 *Estudio de las corrientes de secuencia y las corrientes de fase de la Falta Serie en función de la combinación de tomas de los transformadores*

En este apartado, se aplicará toda la teoría explicada en el Capítulo 5. Es decir, se aplicarán las ecuaciones correspondiente a la Teoría de las componentes simétricas y también se utilizarán las ecuaciones correspondientes a la resolución de las faltas serie (desde la ecuación 5.26 hasta la ecuación 5.30)

En primer lugar, se comenzará calculando las impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar. Para el cálculo de cada una de estas impedancias se partirá de circuito representado en la Figura 8.20. En este circuito se representa la Falta Serie en la fase R entre los puntos F y F'

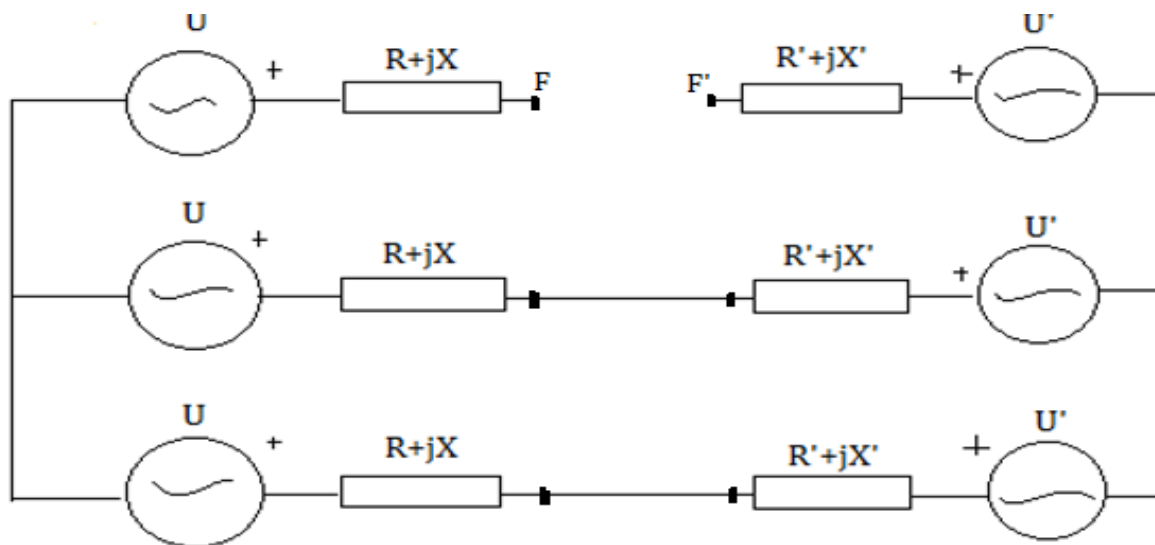


Figura 8.20: Representación de la Falta Serie en el Método de Oposición [Elaboración propia].

Las impedancias que se deben usar son las del equivalente Thévenin visto desde dicho punto de falta. Por tanto, tendremos que analizar el circuito pasivo en el cual se cortocircuitan las fuentes de tensión, mientras que las fuentes de corriente permanecen en circuito abierto. Este circuito es el que se representa en la Figura 8.21:

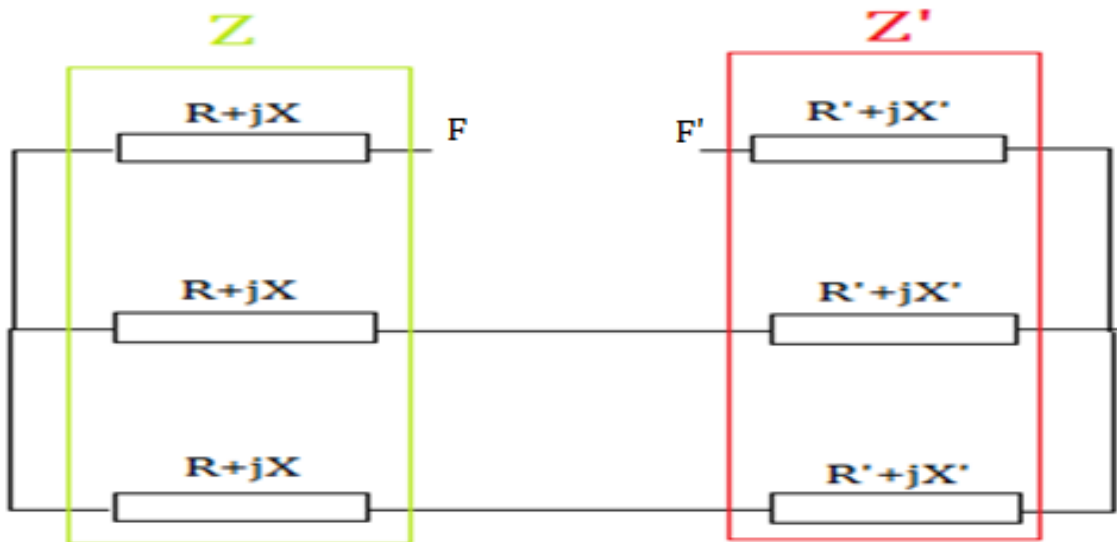


Figura 8.21: Eliminación de Fuentes (Circuito Thévenin)

Agrupando todas las impedancias queda el circuito de la Figura 8.22:

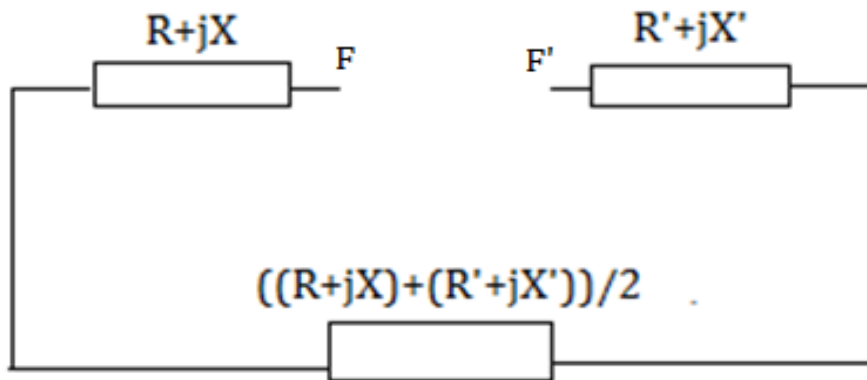


Figura 8.22: Simplificación del circuito Thévenin [Elaboración propia].

Por tanto podemos deducir la siguiente ecuación para el cálculo de la impedancia de secuencia directa, inversa y homopolar:

$$Z_{\substack{\text{Directa} \\ \text{Inversa} \\ \text{Homopolar}}} = \frac{3}{2} (Z + Z')$$

CASO 1 : Toma 1/ Toma 5

- **Secuencia directa**

En la Tabla 8.22 se muestran las impedancias de secuencia directa en esta combinación de tomas:

Transformador	Impedancia (Ω)
Toma 1: 16125/420 V	$Z_{D1} = 0,182 + 0,198j$
Toma 5: 14625/420 V	$Z_{D5} = 0,192 + 0,207j$

Tabla 8.22: Impedancias a secuencia directa CASO 1 [Elaboración propia].

Por tanto, la impedancia del equivalente Thévenin descrito en la Figura 8.22 de secuencia directa atenderá a esta ecuación:

$$Z_{DIRECTA} = \frac{3}{2} (Z_{D1} + Z_{D5})$$

Donde Z_{D1} es la impedancia de secuencia directa de la Toma 1 y Z_{D5} es la impedancia de secuencia directa de la Toma 5. El resultado es:

$$Z_{DIRECTA} = Z_1 = 0,826[47,278^\circ \Omega$$

- **Secuencia inversa**

Como se menciona en el apartado 5.1.4 los valores de impedancia de secuencia directa e inversa, Z_1 y Z_2 son los mismos, ya que la impedancia no depende del sentido de sucesión de fases. Por tanto

$$Z_{INVERSA} = Z_2 = 0,826[47,278^\circ \Omega$$

- **Secuencia homopolar**

Para calcular la impedancia homopolar, tendremos que obtener la impedancia en Ohmios a partir de la impedancias homopolar porcentual ($Z_0 \%$) para cada toma correspondiente que obtuvimos en el Ensayo de medida de la impedancia homopolar que se muestra en el apartado 8.2.3. De esta forma tenemos que:

$$Z_{0_1} = (Z_{0\%}) \frac{U^2}{S_N} = 0,018 \cdot \frac{420^2}{25000} = 0,127j \Omega$$

$$Z_{0_5} = (Z_{0\%}) \frac{U^2}{S_N} = 0,01 \cdot \frac{420^2}{25000} = 0,071j \Omega$$

Por tanto, la ecuación del equivalente Thévenin será la siguiente:

$$Z_{HOMOPOLAR} = Z_0 = \frac{3}{2} (Z_{0_1} + Z_{0_5})$$

Donde Z_{0_1} es la impedancia de secuencia homopolar de la Toma 1 y Z_{0_5} es la impedancia de secuencia homopolar correspondiente a la Toma 5. El resultado es:

$$Z_{HOMOPOLAR} = Z_0 = 0,297 \angle 90^\circ \Omega$$

Teniendo los resultados de las impedancias de secuencia, podemos proceder a calcular las corrientes de secuencia directa, inversa y homopolar utilizando el conjunto de ecuaciones que van desde la (5.26) hasta la (5.28).

La corriente I_L , que es la corriente prefault, necesaria para calcular la componente de secuencia directa es la calculada en el apartado 8.3.1 correspondiente al CASO 1. Esta corriente es:

$$I_{CASO1} = I_L = \frac{\frac{40}{\sqrt{3}}}{0,182 + 0,198j + 0,192 + 0,207j} = 41,83 \angle -47,28^\circ \text{ A}$$

Una vez obtenida esta corriente, podemos comenzar calculando la corriente de secuencia directa:

$$I_1 = \frac{I_L \cdot Z_1}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}} = \frac{(Z_2 + Z_0)}{(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1)} \cdot I_L Z_1 = 33,58 \angle -54,05^\circ \text{ A}$$

La corriente de secuencia inversa es la siguiente:

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_0}{(Z_2 + Z_0)} = 9,361 \angle 157,76^\circ \text{ A}$$

La corriente de secuencia homopolar es:

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{(Z_2 + Z_0)} = 26,09 \angle 115,047^\circ \text{ A}$$

Ahora se procede a calcular las corrientes de fase con la ecuación matricial (5.17)

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 26,09 \angle 115,047^\circ \\ 33,58 \angle -54,05^\circ \\ 9,361 \angle 157,76^\circ \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} I_{p,R} &= 0 \angle -36,06^\circ \text{ A} \\ I_{p,S} &= 14,88 \angle 165,92^\circ \text{ A} \\ I_{p,T} &= 20,28 \angle 80,39^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

CASO 2: Toma 1/ Toma 3

- **Secuencia directa**

En la Tabla 8.23 aparecen las impedancias a secuencia directa correspondientes a la combinación de tomas del CASO 2

Transformador	Impedancia (Ω)
Toma 1: 16125/420 V	$Z_{D1} = 0,182 + 0,198j$
Toma 3: 15375/420 V	$Z_{D3} = 0,185 + 0,204j$

Tabla 8.23: Impedancias secuencia directa CASO 2 [Elaboración propia].

Por tanto, la impedancia del equivalente Thévenin descrito en la Figura 8.22 de secuencia directa atenderá a esta ecuación:

$$Z_{DIRECTA} = \frac{3}{2} (Z_{D1} + Z_{D3})$$

Donde Z_{D1} es la impedancia de secuencia directa de la Toma 1 y Z_{D5} es la impedancia de secuencia directa de la Toma 5. El resultado es:

$$Z_{DIRECTA} = Z_1 = 0,816 \angle 47,605^\circ \Omega$$

- **Secuencia inversa**

Como se menciona en el apartado 5.1.4 los valores de impedancia de secuencia directa e inversa, Z_1 y Z_2 son los mismos, ya que la impedancia no depende del sentido de sucesión de fases. Por tanto

$$Z_{INVERSA} = Z_2 = 0,816 \angle 47,605^\circ \Omega$$

- **Secuencia homopolar**

Las impedancias de secuencia homopolar se obtienen de la misma forma que en el CASO 1. El cálculo se realiza a continuación:

$$Z_{0_1} = (Z_{0\%}) \frac{U^2}{S_N} = 0,018 \cdot \frac{420^2}{25000} = 0,127j \Omega$$

$$Z_{0_3} = (Z_{0\%}) \frac{U^2}{S_N} = 0,0109 \cdot \frac{420^2}{25000} = 0,0769j \Omega$$

Por tanto, la ecuación del equivalente Thévenin será la siguiente:

$$Z_{HOMOPOLAR} = Z_0 = \frac{3}{2} (Z_{0_1} + Z_{0_3})$$

Donde Z_{0_1} es la impedancia de secuencia homopolar de la Toma 1 y Z_{0_3} es la impedancia de secuencia homopolar correspondiente la Toma 3. El resultado es:

$$Z_{HOMOPOLAR} = Z_0 = 0,3058 \angle 90^\circ \Omega$$

La corriente pre-falta correspondiente al CASO 2 necesaria para calcular las corrientes de secuencia es la siguiente (Calculada de la misma forma que en CASO 1):

$$I_{CASO2} = I_L = \frac{\frac{19}{\sqrt{3}}}{0,182+0,198j+0,185+0,204j} = 20,09 \angle -47,28^\circ \text{ A}$$

Una vez obtenida esta corriente, podemos comenzar calculando la corriente de secuencia directa:

$$I_1 = \frac{I_L \cdot Z_1}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}} = \frac{(Z_2 + Z_0)}{(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1)} \cdot I_L Z_1 = 16,01 \angle -54,05^\circ \text{ A}$$

La corriente de secuencia inversa es la siguiente:

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_0}{(Z_2+Z_0)} = 4,6 [157,12^\circ \text{ A}]$$

La corriente de secuencia homopolar es:

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{(Z_2+Z_0)} = 12,3 [114,725^\circ \text{ A}]$$

Ahora se procede a calcular las corrientes de fase con la ecuación matricial (5.17)

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 12,3 [114,725^\circ] \\ 16,01 [-54,05^\circ] \\ 4,6 [157,12^\circ] \end{bmatrix}$$

$$I_{p_R} = 0 [2,53^\circ \text{ A}]$$

$$I_{p_S} = 7,45 [166,42^\circ \text{ A}]$$

$$I_{p_T} = 9,67 [79,9^\circ \text{ A}]$$

CASO 3: Toma 1/Toma 4

- **Secuencia directa**

En la Tabla 8.24 se representan las impedancias a secuencia directa correspondientes a esta combinación de tomas del CASO 3:

Transformador	Impedancia (Ω)
Toma 1: 16125/420 V	$Z_{D1} = 0,182 + 0,198j$
Toma 4: 15000/420 V	$Z_{D4} = 0,188 + 0,207j$

Tabla 8.24: Impedancias a secuencia directa del CASO 3 [Elaboración propia].

Por tanto, la impedancia del equivalente Thévenin descrito en la Figura 8.22 de secuencia directa atenderá a esta ecuación:

$$Z_{DIRECTA} = \frac{3}{2} (Z_{D1} + Z_{D4})$$

Donde Z_{D1} es la impedancia de secuencia directa de la Toma 1 y Z_{D4} es la impedancia de secuencia directa de la Toma 4. El resultado es:

$$Z_{DIRECTA} = Z_1 = 0,826[47,278^\circ \Omega$$

- **Secuencia inversa**

Como se menciona en el apartado 5.1.4 los valores de impedancia de secuencia directa e inversa, Z_1 y Z_2 son los mismos, ya que la impedancia no depende del sentido de sucesión de fases. Por tanto

$$Z_{INVERSA} = Z_2 = 0,826[47,278^\circ \Omega$$

- **Secuencia homopolar**

Las impedancias de secuencia homopolar se obtienen de la misma forma que en el CASO 1. El cálculo se realiza a continuación:

$$Z_{0_1} = (Z_{0\%}) \frac{U^2}{S_N} = 0,018 \cdot \frac{420^2}{25000} = 0,127j \Omega$$

$$Z_{0_4} = (Z_{0\%}) \frac{U^2}{S_N} = 0,0103 \cdot \frac{420^2}{25000} = 0,072j \Omega$$

Por tanto, la ecuación del equivalente Thévenin será la siguiente:

$$Z_{HOMOPOLAR} = Z_0 = \frac{3}{2} (Z_{0_1} + Z_{0_4})$$

Donde Z_{0_1} es la impedancia de secuencia homopolar de la Toma 1 y Z_{D4} es la impedancia de secuencia homopolar correspondiente la Toma 4. El resultado es:

$$Z_{HOMOPOLAR} = Z_0 = 0,2985 [90^\circ \Omega$$

La corriente pre-falta correspondiente al CASO 3 necesaria para calcular las corrientes de secuencia es la siguiente (Calculada de la misma forma que en CASO 1):

$$I_{CASO3} = I_L = \frac{\frac{29}{\sqrt{3}}}{0,182+0,198j+0,188+0,207j} = 30,49[-47,28^\circ \text{ A}$$

Una vez obtenida esta corriente, podemos comenzar calculando la corriente de secuencia directa:

$$I_1 = \frac{I_L \cdot Z_1}{Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_0}{Z_2 + Z_0}} = \frac{(Z_2 + Z_0)}{(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1)} \cdot I_L Z_1 = 24,449 \angle -54,07^\circ \text{ A}$$

La corriente de secuencia inversa es la siguiente:

$$I_2 = -I_1 \frac{Z_0}{(Z_2 + Z_0)} = 6,85 \angle 157,68^\circ \text{ A}$$

La corriente de secuencia homopolar es:

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_2}{(Z_2 + Z_0)} = 18,96 \angle 114,96^\circ \text{ A}$$

Ahora se procede a calcular las corrientes de fase con la ecuación matricial (5.17)

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{R0} \\ I_{R1} \\ I_{R2} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 18,96 \angle 114,96^\circ \\ 24,449 \angle -54,07^\circ \\ 6,85 \angle 157,68^\circ \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} I_{p_R} &= 0 \angle -36,06^\circ \text{ A} \\ I_{p_S} &= 10,791 \angle 165,92^\circ \text{ A} \\ I_{p_T} &= 14,77 \angle 80,39^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Y la tensión entre los puntos FF' de la fase que queda en circuito abierto es (aunque en este caso, solo nos interesa el valor de las corrientes):

$$V_R = \frac{(Z_2 Z_0)}{(Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1)} \cdot 3 I_L Z_1 = 16,98 \angle 24,9^\circ \text{ V}$$

8.4.2 Simulación del Ensayo en oposición de transformadores con la presencia de Falta Serie en función de la combinación de tomas de los transformadores

El circuito implementado en el programa ATP es el que aparece en la figura 8.23. Se trata de una falta serie en la que se va a analizar el comportamiento del circuito cuando una de las fases de salida de los transformadores permanece en circuito abierto como se muestra a continuación:

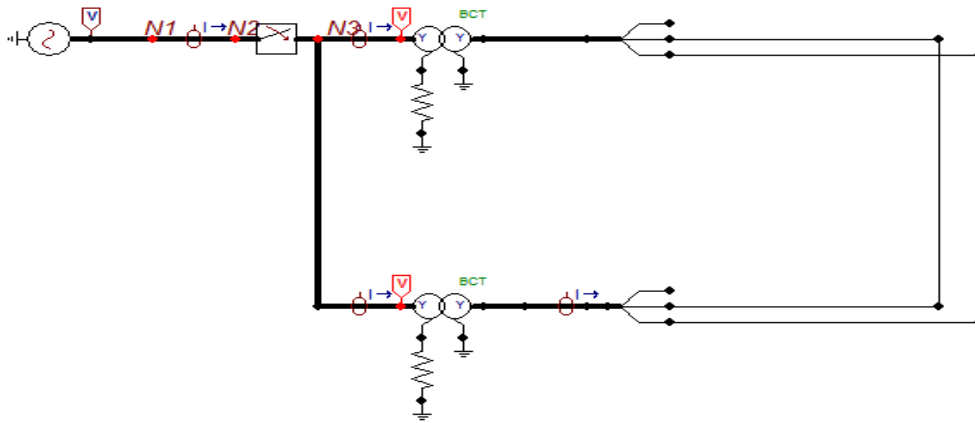


Figura 8.23: Circuito implementado en el programa ATP con la presencia de una Falta Serie [Captura de pantalla de ATP].

CASO 1: Toma 1/ Toma 5

En la Figura 8.24 se representan las corrientes por las fases R,S y T en la Falta Serie en el CASO 1:

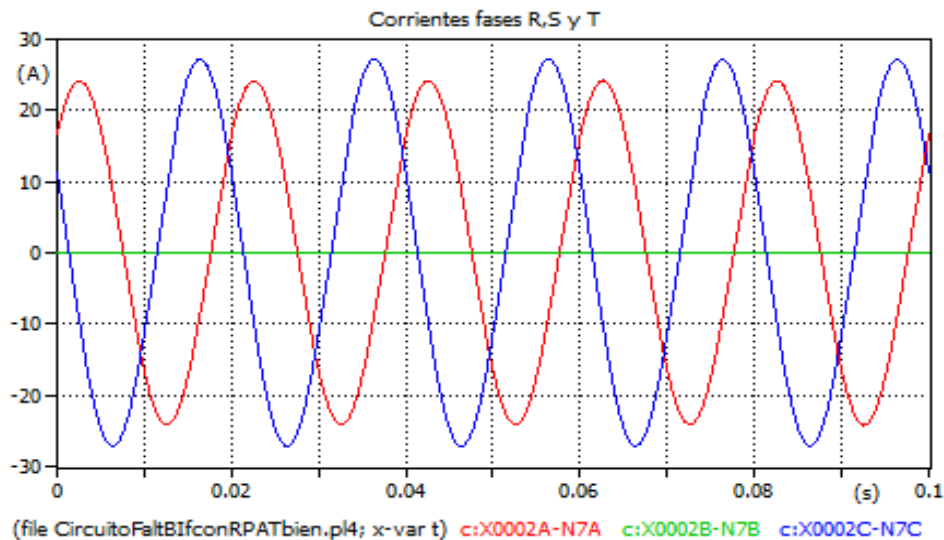


Figura 8.24: Corrientes por el secundario de los transformadores por las fases R,S y T en la Falta serie. (Verde: corriente fase R; Azul: corriente fase T; Rojo: corriente fase S)

Para obtener el valor pico de las corrientes, se multiplica por $\sqrt{2}$ el módulo de las corrientes:

$$I_R = 0$$

$$I_S = 14,88 \cdot \sqrt{2} = 21,05 \text{ A}$$

$$I_T = 20,28 \cdot \sqrt{2} = 28,68 \text{ A}$$

CASO 2: Toma1/Toma 3

En la Figura 8.25 se representan las corrientes por las fases R,S y T en la Falta Serie en el CASO 2:

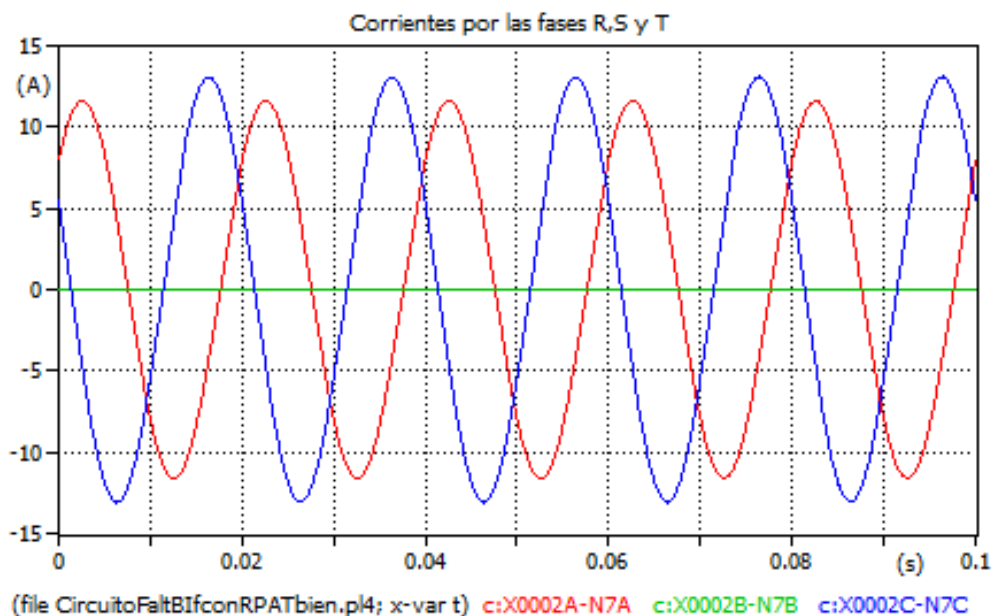


Figura 8.25: Corrientes por el secundario de los transformadores por las fases R, S y T en la Falta serie.
(Verde: corriente fase R; Azul: corriente fase T; Rojo: corriente fase S)

Para obtener el valor pico de las corrientes, se multiplica por $\sqrt{2}$ el módulo de las corrientes:

$$I_R = 0 \text{ A}$$

$$I_S = 7,45 \cdot \sqrt{2} = 10,6 \text{ A}$$

$$I_T = 9,67 \cdot \sqrt{2} = 13,67 \text{ A}$$

CASO 3: Toma 1/ Toma 4

En la Figura 8.26 se representan las corrientes por las fases R, S y T en la Falta Serie correspondiente al CASO 3:

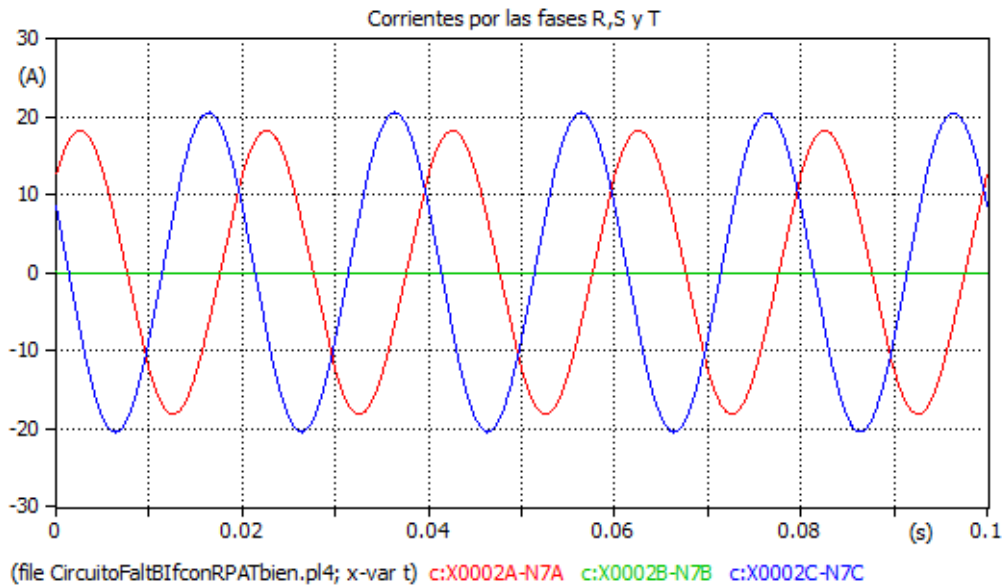


Figura 8.26: Corrientes por el secundario de los transformadores por las fases R,S y T en la Falta serie.

(Verde: corriente fase R; Azul: corriente fase T; Rojo: corriente fase S)

Para obtener el valor pico de las corrientes, se multiplica por $\sqrt{2}$ el módulo de las corrientes

$$I_R = 0 \text{ A}$$

$$I_S = 10,79 \cdot \sqrt{2} = 15,26 \text{ A}$$

$$I_T = 14,77 \cdot \sqrt{2} = 20,88 \text{ A}$$

Comparación de todos los casos

En la Tabla 8.25 se resumen los resultados del valor de cresta de las corrientes secundarias de los transformadores.

CASO 1 (T1/T5)	CASO 2 (T1/T3)	CASO 3 8T1/T4)
$I_R = 0 \text{ A}$ $I_S = 21,05 \text{ A}$ $I_T = 28,68 \text{ A}$	$I_R = 0 \text{ A}$ $I_S = 10,6 \text{ A}$ $I_T = 13,67 \text{ A}$	$I_R = 0 \text{ A}$ $I_S = 15,26 \text{ A}$ $I_T = 20,88 \text{ A}$

Tabla 8.25: Comparación de corrientes de todos los casos analizados [Elaboración propia].

La corriente asignada en el lado de BT de los transformadores es 34 A. En el apartado 8.3 se llegó a la conclusión de que la mejor combinación de tomas para obtener una corriente próxima a la nominal era el CASO 3. Sin embargo, con la presencia de la Falta Serie observamos que esto ya no se cumple debido a que el valor de las corrientes disminuye considerablemente. Se puede comprobar que la combinación de tomas correspondiente al CASO 1 es la que más se aproxima a la corriente nominal del transformador.

Capítulo 9

CONCLUSIONES

9.1 RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO

El principal objetivo de este Trabajo Fin de Grado es la simulación del comportamiento de los transformadores durante el Ensayo de Oposición. Sin embargo, para llegar a este objetivo principal se han tenido que alcanzar varios objetivos secundarios.

El primer objetivo secundario fue obtener los conocimientos para la instalación y el manejo del programa ATP. Aquí surgieron las primeras dificultades debido a que en la Universidad existen muy pocos antecedentes de personas que hayan utilizado esta herramienta para el análisis de circuitos eléctricos. La instalación del programa supuso una dificultad debido a que tanto mi tutor como yo desconocíamos los pasos exactos para que dicha instalación se desarrollara con éxito. Tras leer varios manuales de ATP y ponernos en contacto con especialistas en el programa, pudimos solucionar dicho contratiempo. A continuación, se comenzó a utilizar el programa implementando circuitos sencillos (por ejemplo, con una resistencia y una bobina) con el objetivo de ir adquiriendo las capacidades necesarias para su utilización y conocer cuáles son los datos necesarios para la configuración de cada uno de los elementos que componen el Método de Oposición (transformadores, fuentes, interruptores...).

Los datos implantados en el programa referidos a los transformadores fueron obtenidos a partir de los ensayos que realizamos en el Laboratorio de Alta Tensión. A partir de las pruebas realizadas a un transformador con varias tomas se obtuvieron los datos de impedancia a secuencia directa, inversa y homopolar para cada toma correspondiente. Para ello, realizamos ensayos de vacío, de cortocircuito y el ensayo de impedancia homopolar. Fue éste último el que nos causó más problemas en esta etapa del TFG.

En primer lugar realizamos dicho ensayo basándonos en los pasos dictados por la norma IEEE-C57.12.90 asumiendo que el transformador ensayado tenía conexión estrella-estrella. Sin embargo, tras haber obtenido todos los datos, al documentar los resultados obtenidos pudimos comprobar en el Capítulo 6 de la norma que al tener el transformador los arrollamientos interconectados (zig-zag) el ensayo realizado no es el indicado para este tipo de conexión en transformadores. Por tanto, hubo que repetir ensayo basándonos en el que propone la norma para este tipo de transformadores, diseñado por Rosselli. En el artículo de Rosselli y en la propia norma figura la disposición de los aparatos de medida para realizar el ensayo, sin embargo, al analizar los resultados obtenidos pudimos comprobar que se precisaba la tensión aplicada al transformador durante el ensayo, que no figura en los mencionados esquemas de cableado (en los esquemas figura la tensión en

el secundario del transformador). Ello obligó a repetir el ensayo por tercera vez para poder obtener dicha tensión.

Por tanto, esta fase del TFG ha sido una de las que más contratiempos han acarreado, ya que sin esos datos procedentes de los ensayos, no se podían configurar los transformadores en ATP y por tanto, no se podían realizar las simulaciones.

Tras reunir todos los datos necesarios, se procedió a comenzar con las simulaciones. Se decidió realizar varios casos, con diferentes combinaciones de tomas del transformador para observar el comportamiento.

También se decidió tratar el caso de la Falta Serie, eliminando una de las fases que unen los secundarios de los transformadores. Esta propuesta se realizó con el objetivo de comprobar si el margen de tomas disponible en el transformador es el adecuado para realizar un ensayo de calentamiento ante secuencia homopolar con una corriente próxima a la nominal por el secundario.

Para asegurarnos de los resultados reportados por el programa ATP se decidió realizar un estudio teórico para analizar si los resultados coincidían con la teoría documentada en la bibliografía. En este sentido debe tenerse en cuenta que, por falta de tiempo, el estudio de la falta serie no está incluido en los programas de las asignaturas de la titulación.

9.2 CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas en este Trabajo Fin de Grado han sido extraídas a partir de los resultados obtenidos en el Capítulo 8. Hay dos conclusiones principales que dan respuesta a los objetivos mencionados en el Capítulo 1.

La primera conclusión trata sobre el comportamiento de los transformadores en el Ensayo de Oposición en condiciones trifásicas equilibradas. Tras el estudio de varias combinaciones de tomas, fueron tres los casos que se presentan como más adecuados para realizar un ensayo de calentamiento. Es el CASO 3 (combinación Toma 1 y Toma 4) en el que circula una corriente de aproximadamente 31 A por el secundario de los transformadores. Por tanto, ésta debería ser la combinación de tomas elegida para realizar el Ensayo de Oposición para la determinación del calentamiento del transformador ante secuencia directa, ya que la corriente es próxima a la nominal (en concreto el 91% de

ésta). Si elegimos la combinación de tomas correspondiente al CASO 1 (Toma 1/ Toma 5), vemos que el transformador estaría sobrecargado en un 21%, ya que circularía una corriente de valor 41 A, con lo que no es muy adecuado para realizar un ensayo de una duración prolongada. Por el contrario, con la combinación de tomas del CASO 2 (Toma 1/ Toma 3) con la que circularía un valor de corriente de aproximadamente 20 A, muy inferior al nominal (grado de carga del 59%).

Como se ha visto del estudio teórico el funcionamiento de un transformador en régimen desequilibrado conlleva un calentamiento adicional. En concreto el calentamiento de la cuba debido a los flujos homopolares producidos por las componentes homopolares de corriente es superior al que se tiene ante condiciones equilibradas. Especialmente preocupante es el caso en el que puedan circular corrientes homopolares por uno de los arrollamientos pero no por el otro (caso de transformadores estrella-estrella o estrella-zigzag con un neutro puesto a tierra y el otro aislado).

La segunda conclusión obtenida trata sobre el comportamiento de los transformadores en el Ensayo de Oposición con la presencia de una Falta Serie. En esta situación, es la combinación de tomas correspondiente al CASO 1 la que conlleva una circulación de corriente más próxima a la nominal del transformador, ya que por una de las fases sanas circulan aproximadamente 29 A (el 85% de la intensidad asignada). Esta sería la combinación de tomas elegida para llevar a cabo el ensayo de calentamiento que emule la Falta Serie mediante el Método de Oposición. Tanto en el CASO 2 como en el CASO 3 el valor de las corrientes de las fases sanas que circulan por los secundarios es muy inferior a la corriente nominal, por tanto no sería la elección de tomas apropiada para realizar el ensayo en cuestión.

Por tanto, la elección de la combinación de tomas más apropiada no coincide en ambas situaciones.

Todos los resultados obtenidos con el estudio teórico han sido comparados con las simulaciones con el programa ATPDraw y dichos resultados han salido muy aproximados.

9.3 SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS

Como sugerencias para trabajos futuros se proponen las siguientes:

- Repetir el estudio realizado utilizando el modelo híbrido de transformador (XFORMER), ya que este modelo incorpora la posibilidad de tratar transformadores con arrollamientos en zigzag, mientras que en el modelo BCTTAN hubo que modelar el transformador como si se tratara de un estrella-estrella (si bien con las impedancias del arrollamiento zig-zag).
- Realizar físicamente el ensayo de calentamiento del transformador en condiciones asimétricas (falta serie) y comprobar si la temperatura que alcanza la cuba es preocupante.

9.4 CONCLUSIONES PERSONALES

Con la realización de este Trabajo Fin de Grado finalizo mi etapa de estudio en el Grado de Ingeniería Eléctrica. Durante estos meses, he aplicado todos mis conocimientos técnicos adquiridos durante estos cuatro años para poder cumplir unos objetivos impuestos.

Creo que todas y cada una de las fases en las que se compone este Trabajo Fin de Grado me van a servir para el desarrollo de mi vida profesional a partir de ahora. Desde el manejo de aparatos complejos como transformadores en el Laboratorio de Alta Tensión hasta la utilización de herramientas informáticas como ATPDraw que, en mi opinión, facilitan en gran medida el análisis del comportamiento de los circuitos eléctricos.

Por otro lado, he aplicado todos los conocimientos adquiridos, sobre todo en los dos últimos años de la carrera ampliando mis conocimientos en la asignatura “Circuitos Magnéticos y Transformadores”. Haber pasado tantas horas realizando ensayos con el transformador en el laboratorio me ha ayudado a comprender mejor el complejo funcionamiento de dicho elemento.

Me siento orgulloso de haber llegado a cumplir los objetivos impuestos, a pesar de todos los problemas que han ido surgiendo durante estos meses. Ha sido gratificante haber podido ir superando todos estos contratiempos a pesar de las numerosas horas que he tenido que invertir para resolverlos.

Además creo que puede ser interesante incorporar la herramienta ATPDraw en las prácticas de algunas asignaturas como Circuitos Magnéticos y Transformadores o Instalaciones Eléctricas como propone mi tutor Juan Carlos Burgos Díaz ya que son de gran ayuda a la hora de calcular y analizar circuitos eléctricos.

Capítulo 10

PRESUPUESTO

10.1 DESGLOSE DEL PRESUPUESTO

En este apartado se presenta el presupuesto aproximado del proyecto realizado.

En primer lugar se tendrán en cuenta los costes del personal, que dependen del número de meses empleados en la realización del proyecto y del coste por hora del ingeniero que lo realiza.

En este caso, el proyecto ha sido realizado por un ingeniero junior, con la supervisión de un ingeniero senior. Los costes que supone dicha actividad se exponen en la Tabla 8.26.

En cuanto a los costes informáticos, la licencia del programa ATP es completamente gratuita, por lo que solo se tienen en cuenta los costes y la amortización del equipo informático para el período de duración del proyecto.

El período de trabajo empleado en la realización del proyecto fue el comprendido entre los meses de septiembre de 2016 y febrero de 2017, esto es seis meses. Sin embargo, durante el primer mes se adquieren los conocimientos necesarios para el manejo del programa ATP y también se definen los pasos para llevar adelante el proyecto. Este tiempo incluye el requerido para realizar los ensayos en un laboratorio.

No se han tenido en cuenta los costes de los elementos utilizados para la realización de los diferentes ensayos, tales como transformadores, fuentes de tensión, amperímetros, voltímetros, pinzas amperimétricas, cables, etc., pues se dispone de ellos en el Laboratorio de Alta Tensión del Departamento de Ingeniería Eléctrica. Si se sumaran estos costes, el presupuesto del proyecto aumentaría en un gran porcentaje, debido a que el coste de todos estos aparatos es elevado.

En la Tabla 8.26 se desglosan los diferentes costes que llevan consigo este proyecto hasta llegar al coste total:

PROYECTO	Meses estimados para realizar el proyecto	Días laborables/meses	Jornada laboral (horas/día)	Nº de horas empleadas	Coste/hora (€/horas)
Modelado del Método de Oposición de transformadores mediante ATP	5	22	4	440	13
Dirección y supervisión del trabajo realizado	5			30	35
Coste trabajo realizado	6,770,00 €				
Coste de Seguridad Social (35%)	2.369,5 €				
Costes informáticos durante 5 meses	60,00 €				
SUBTOTAL	9.199,00 €				
IVA (21%)	1.931,9 €				
COSTE TOTAL	11.130,9 €				

Tabla 8.26: Presupuesto del proyecto [Elaboración propia].

Capítulo 11

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. **Fraile Mora, Jesús.** *Circuitos Eléctricos.* Madrid : Pearson, 2012.
- [2]. **Haginomori, Eiichi, y otros.** *Power System Transient Analysis.* s.l. : Wiley, 2016.
- [3]. **Grainger, John J. y Stevenson Jr., William D.** *Análisis de Sistemas de Potencia.* s.l. : Mc Graw Hill, 1996.
- [4]. **Tleis, Nasser.** *Power Systems Modelling and Fault Analysis.* s.l. : Newnes, 2008.
- [5]. *Determination of Z0 sequence Equivalent Circuits for Three-Phase Three-Legged YNyd Transformers Based on Onsite Low-Voltage Tests.* **Angel Ramos, y otros, y otros.** s.l. : IEEE Transactions and Power Delivery, Julio de 2013, Vol. 28.
- [6]. *Transformer Test to Calculate Z0 for Interconnected Windings Transformers Using Symmetrical Sequence Components.* **Rosselli, Girolamo.** s.l. : IEEE PES General Meeting, 2005.
- [7]. **International Standard IEEE-C57.12.90.** *"IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers".* Nueva York : s.n., 2010.
- [8]. **International Standard IEC 60076-1.** *Generalities.* 2013.
- [9]. **International Standard IEC 60076-2.** *Power Transformers-Part 2: Temperature rise for liquid-immersed transformers.* 2013.
- [10]. **Burgos Díaz, Juan Carlos.** *Apuntes de la asignatura "Circuitos magnéticos y transformadores.* Leganés : Universidad Carlos III de Madrid, 2016.
- [11]. **Ramos Gómez, Ángel.** *Consideraciones acerca de la utilización de arrollamientos de estabiización en transformadores estrella-estrella.* Leganés : Universidad Carlos III de Madrid, 2015.
- [12]. **Cardona Correa, Leonardo Jesús.** *Teoría y práctica con el ATP.* Medellín : s.n., 1995.
- [13]. **Andrade Guerrero, Daniel Marcelo y Contreras Ortiz, Carlos Felipe.** Monografías. *Tipo de conexión y aplicaciones de transformadores trifásicos.* [En línea] [Citado el: 26 de Diciembre de 2016.] <http://www.monografias.com/trabajos78/tipos-aplicaciones-conexiones-transformadores-trifasicos/tipos-aplicaciones-conexiones-transformadores-trifasicos2.shtml>.
- [14]. **Universidad de Córdoba.** Grupo de investigación de Ingeniería Eléctrica. [En línea] [Citado el: 15 de Diciembre de 2016.] http://www.uco.es/grupos/giie/cirweb/teoria/tema_10/tema_10_01.pdf.
- [15]. **Fravedsa.** Ingeniería Eléctrica. *Ensayos del Transformador.* [En línea] [Citado el: 15 de Octubre de 2016.] <http://ingenieriaelectricafravedsa.blogspot.com.es/2014/12/ensayos-transformador.html>.
- [16]. **INDUCOR: Electrical Testing Group.** Control y Diseño de Máquinas Eléctricas. *Potencia nominal y sobrecarga de Transformadores.* [En línea] [Citado el: 3 de Enero de

2016.] <http://www.inducor.com.ar/academicos/calculo-de-maquinas-electricas/maquinas-electricas-capitulo8.html>.

[17]. **Comité Argentino de Usuarios del EMTP/ATP(CAUE)**. El ATP/EMTP. [En línea] Junio de 2003. [Citado el: 7 de Octubre de 2016.] <https://sites.google.com/site/atpcaue/el-atp-empt>.

[18]. **Wikipedia**. Ensayo de Cortocircuito. [En línea] 30 de Agosto de 2016. [Citado el: Octubre de 27 de 2016.] https://es.wikipedia.org/wiki/Ensayo_de_cortocircuito.

[19].

Electronic Edition of the ATP RuleBook. **Rifaldi, Alfredo y Bianchi Lastra, Raúl**. 4, Buenos Aires : s.n., Diciembre de 2001, Revista Iberoamericana del ATP, Vol. 3.

ANEXO I

Ejemplo de Reporte de solución del Método de oposición
de transformadores en ATP

Reporte del Método de Oposición equilibrado:

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDRAW febrero, lunes 20, 2017
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Høidalen at SEFAS/NTNU - NORWAY 1994-2009
C -----
C dT >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
  1.E-5      .1
    500      1      1      1      1      0      0      1
0
C      1      2      3      4      5      6      7
8
C
3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012
34567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
$VINTAGE, 1,
  1X0001A      708.46646031835
  USE RL
$UNITS, 0.50E+02 , 0.
  1NZA      2.0801249996949 212663.00114391
  2X0001A      0.0 5528.7814501121
      .00141119996439 144.00546852204
$VINTAGE, -1,
$UNITS, -1.,-1.
  USE OLD
$VINTAGE, 1,
  1X0001B      708.46646031835
  USE RL
$UNITS, 0.50E+02 , 0.
  1NZB      2.0801249996949 212663.00114391
  2X0001B      0.0 5528.7814501121
      .00141119996439 144.00546852204
$VINTAGE, -1,
$UNITS, -1.,-1.
  USE OLD
$VINTAGE, 1,
  1X0001C      708.46646031835
  USE RL
$UNITS, 0.50E+02 , 0.
  1NZC      2.0801249996949 212663.00114391
  2X0001C      0.0 5528.7814501121
      .00141119996439 144.00546852204
$VINTAGE, -1,
$UNITS, -1.,-1.
  USE OLD
$VINTAGE, 1,
  1X0002A      708.46646031835
  USE RL
$UNITS, 0.50E+02 , 0.
  1NYA      1.8911250005154 193348.96756151
  2X0002A      0.0 5271.6288256308
      .00141119996439 144.00546852205
$VINTAGE, -1,
$UNITS, -1.,-1.
  USE OLD
$VINTAGE, 1,

```

Modelado mediante ATP del Método de Transformadores en Oposición

```

1X0002B          708.46646031835
USE RL
$UNITS, 0.50E+02 , 0.
1NYB            1.8911250005154 193348.96756151
2X0002B          0.0 5271.6288256308
                .00141119996439 144.00546852205

$VINTAGE, -1,
$UNITS, -1.,-1.
USE OLD
$VINTAGE, 1,
1X0002C          708.46646031835
USE RL
$UNITS, 0.50E+02 , 0.
1NYC            1.8911250005154 193348.96756151
2X0002C          0.0 5271.6288256308
                .00141119996439 144.00546852205

$VINTAGE, -1,
$UNITS, -1.,-1.
USE OLD
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
N2A  N3A          -1.      1.E3
0
N2B  N3B          -1.      1.E3
0
N2C  N3C          -1.      1.E3
0
N1A  N2A                                MEASURING
1
N1B  N2B                                MEASURING
0
N1C  N2C                                MEASURING
0
N3A  NYA                                MEASURING
1
N3B  NYB                                MEASURING
0
N3C  NYC                                MEASURING
0
N3A  NZA                                MEASURING
1
N3B  NZB                                MEASURING
0
N3C  NZC                                MEASURING
0
X0001AX0002A                                MEASURING
1
X0001BX0002B                                MEASURING
1
X0001CX0002C                                MEASURING
1
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART
>< TSTOP >
14N1A  12247.4487      50.      -1.
100.
14N1B  12247.4487      50.      -120.      -1.
100.
14N1C  12247.4487      50.      -240.      -1.
100.
/OUTPUT

```

N1A NZA NYA
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK