

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**PROYECTO FIN DE CARRERA**

INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL  
ELECTRICIDAD

DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE  
TRANSFORMADORES DE POTENCIA

**Autor:** Estefanía Reyes Ruíz  
**Tutor:** Ángel Ramos Gómez

Leganés, Enero de 2012





# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>12</b>
<b>1.1. CONTEXTO DEL PROYECTO</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO FIN DE CARRERA</b> .....	<b>14</b>
<b>1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO</b> .....	<b>14</b>
<b>2. LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2. IMPORTANCIA DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR</b> .....	<b>18</b>
<b>2.3. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE DOS ARROLLAMIENTOS</b> .....	<b>22</b>
<b>2.4. CIRCUITOS EQUIVALENTES EN T Y EN <math>\pi</math> DE UN TRANSFORMADOR</b> .....	<b>23</b>
<b>2.5. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE TRES ARROLLAMIENTOS</b> .....	<b>25</b>
<b>2.6. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE LOS DIFERENTES GRUPOS DE CONEXIÓN DE LOS TRANSFORMADORES</b> .....	<b>28</b>
2.6.1. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR YNyn .....	<b>29</b>



---

2.6.1.1. Banco trifásico de transformadores monofásicos YNyn .....	29
2.6.1.2. Transformador trifásico YNyn de tres columnas .....	34
2.6.1.3. Transformador trifásico YNyn de cinco columnas.....	40
2.6.1.4. Transformador de núcleo trifásico acorazado .....	41
2.6.2. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR YNy .....	42
2.6.3. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR Yy .....	44
2.6.4. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR YNd .....	44
2.6.4.1. Banco trifásico de transformadores monofásicos YNd .....	44
2.6.4.2. Transformador trifásico YNd de tres columnas .....	46
2.6.4.3. Transformador trifásico YNd de cinco columnas.....	50
2.6.4.4. Transformador de núcleo trifásico acorazado .....	51
2.6.5. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR Yd .....	51
2.6.6. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR YNynd.....	51
<b>2.7. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS HOMOPOLARES DE LAS CONFIGURACIONES MÁS HABITUALES .....</b>	<b>54</b>
<b>2.8. IMPEDANCIA HOMOPOLAR EN CONFIGURACIONES ESPECIALES DE TRANSFORMADORES.....</b>	<b>57</b>
2.8.1. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE AUTOTRANSFORMADORES Y AUTOTRANSFORMADORES CON TERCARIO .....	57
2.8.2 TRANSFORMADORES EN ZIG-ZAG .....	59
2.8.3. TRANSFORMADORES CON DOBLE SECUNDARIO .....	61
<b>2.9. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR .....</b>	<b>64</b>
2.9.1. INFLUENCIA DE LA UBICACIÓN DE LOS ARROLLAMIENTOS .....	64
2.9.2. INFLUENCIA DE LA CUBA .....	65
2.9.3. INFLUENCIA DE LA EXISTENCIA DE PANTALLAS MAGNÉTICAS EN LA CUBA .....	68
<b>2.10. ALTERNATIVAS AL CIRCUITO EQUIVALENTE ANTE SECUENCIA HOMOPOLAR CONVENCIONAL.....</b>	<b>68</b>
<b>3. DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR A PARTIR DE LAS DIMENSIONES GEOMÉTRICAS .....</b>	<b>72</b>
<b>3.1. MÉTODOS DESCRITOS EN LA LITERATURA .....</b>	<b>72</b>
<b>3.2. EJEMPLOS DE CÁLCULO .....</b>	<b>79</b>
<b>3.3. RESUMEN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>95</b>
<b>4. ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR .....</b>	<b>96</b>
<b>4.1. ENSAYOS CONTEMPLADOS EN LA NORMATIVA ESPAÑOLA .....</b>	<b>97</b>

---



---

<b>4.2. ENSAYOS DE SECUENCIA HOMOPOLAR RECOMENDADOS POR LA NORMATIVA AMERICANA .....</b>	<b>98</b>
4.2.1. TRANSFORMADORES CON UN SOLO NEUTRO EXTERNO ACCESIBLE (EXCEPTO TRANSFORMADORES EN CONEXIÓN ZIGZAG) .....	99
4.2.2. TRANSFORMADORES CON DOS NEUTROS EXTERNOS ACCESIBLES (EXCEPTO TRANSFORMADORES EN CONEXIÓN ZIGZAG) .....	99
<b>4.3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR.....</b>	<b>102</b>
<b>4.4. CONJUNTO DE ENSAYOS QUE PERMITEN UNA CARACTERIZACIÓN COMPLETA DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR Y CÁLCULO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE .....</b>	<b>105</b>
4.4.1. CÁLCULO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE CON TERCIARIO CERRADO .....	106
4.4.2. CÁLCULO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE CON TERCIARIO ABIERTO .....	108
<b>4.5. ENSAYOS EN FÁBRICA .....</b>	<b>110</b>
4.5.1. EJEMPLO DE CÁLCULO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE CON RESULTADOS DE ENSAYOS EN FÁBRICA.....	113
<b>4.6. ENSAYOS EN CAMPO.....</b>	<b>118</b>
4.6.1. EJEMPLO DE CÁLCULO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE CON RESULTADOS DE ENSAYOS EN CAMPO.....	121
<b>4.7. VALIDACIÓN DEL MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE EN T. CONCLUSIONES.....</b>	<b>126</b>
<b>5. ANÁLISIS COMPARATIVO .....</b>	<b>127</b>
<b>5.1. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN     FÁBRICA CON LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN CAMPO     .....</b>	<b>127</b>
<b>5.2. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CALCULADOS A PARTIR DE     DIMENSIONES GEOMÉTRICAS CON LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EN     FÁBRICA Y LOS ENSAYOS EN CAMPO.....</b>	<b>132</b>
<b>6. RESUMEN Y CONCLUSIONES .....</b>	<b>134</b>
<b>6.1. RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO.....</b>	<b>134</b>
<b>6.2. CONCLUSIONES.....</b>	<b>136</b>
<b>6.3. PROPUESTA DE TRABAJOS FUTUROS .....</b>	<b>138</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>139</b>

---

# Índice de figuras

Figura 2.1. Definición de impedancia de secuencia homopolar.....	17
Figura 2.2. Esquema de conexiones para el cálculo del cortocircuito unipolar a tierra .	19
Figura 2.3. Intensidad de la corriente de cortocircuito unipolar, comparada con la del cortocircuito tripolar en función del cociente entre la impedancia homopolar y la impedancia de secuencia directa (eje de abscisas) tomando como parámetro la diferencia entre el argumento de la impedancia de secuencia directa y el argumento de la impedancia de secuencia homopolar.....	20
Figura 2.4. Contacto unipolar a tierra. Tensión a frecuencia de servicio de la fase S respecto a tierra en función del cociente entre la impedancia de secuencia homopolar y la impedancia de secuencia directa.....	21
Figura 2.5. Circuito equivalente exacto de un transformador real reducido al primario	23
Figura 2.6. Circuito equivalente T de un transformador .....	23
Figura 2.7. Circuito equivalente $\pi$ de un transformador.....	24
Figura 2.8. Circuito equivalente de un transformador con tres arrollamientos .....	26
Figura 2.9. Circuito equivalente en $\pi$ ante secuencia directa e inversa de un transformador de tres arrollamientos .....	27
Figura 2.10. Representación de un transformador de tres arrollamientos.....	28
Figura 2.11. Ensayo de cortocircuito de un banco trifásico YNyn.....	29
Figura 2.12. Banco de transformación YNyn (a) y circuito equivalente ante secuencia homopolar del mismo (b).....	30
Figura 2.13. Líneas de flujo disperso de un transformador de dos arrollamientos.....	31
Figura 2.14. Circuito equivalente básico con la impedancia del lado de baja tensión referida al lado de alta tensión .....	32

---

Figura 2.15. Circuito equivalente de un transformador monofásico en unidades físicas reales .....	33
Figura 2.16. Esquema de los caminos magnéticos de un transformador trifásico de 3 columnas .....	34
Figura 2.17. Transformador YNyn de núcleo trifásico (a) y circuito equivalente ante secuencia homopolar del mismo (b) .....	35
Figura 2.18. Circuito equivalente propuesto por Oels para los transformadores YNyn de núcleo trifásico .....	36
Figura 2.19. Relación entre la impedancia magnetizante para la secuencia homopolar y la impedancia de cortocircuito en función de la potencia aparente del transformador .....	37
Figura 2.20. Circulación del flujo homopolar alrededor de los arrollamientos interno y externo.....	38
Figura 2.21. Corte lateral de un transformador de dos arrollamientos. Efecto de la circulación de la corriente homopolar en las bobinas en un transformador de dos arrollamientos.....	39
Figura 2.22. Circulación del flujo homopolar en un transformador trifásico de cinco columnas .....	41
Figura 2.23. Distribución del flujo homopolar en un transformador trifásico acorazado. ....	42
Figura 2.24. Banco de transformación YNy (a) y circuito equivalente ante secuencia homopolar del mismo (b) .....	43
Figura 2.25. Transformador YNy de núcleo trifásico (a) y circuito equivalente ante secuencia homopolar del mismo (b) .....	43
Figura 2.26. Representación gráfica del efecto producido por las f.e.m.s en el interior del triángulo .....	45
Figura 2.27. Comportamiento de cada transformador monofásico en un banco trifásico YNd.....	45
Figura 2.28. Banco de transformación YNd (a) y circuito equivalente ante secuencia homopolar del mismo (b) .....	46
Figura 2.29. Comportamiento de los núcleos ferromagnéticos (abiertos) en un transformador trifásico de tres columnas YNd .....	47
Figura 2.30. Transformador YNd de núcleo trifásico (a) y circuito equivalente ante secuencia homopolar del mismo (b) .....	47
Figura 2.31. Transformador estrella-triángulo dispuesto para el ensayo de cortocircuito .....	48
Figura 2.32. Flujos en un transformador YNd durante el ensayo de determinación de la impedancia homopolar a) Flujos reales b) Situación equivalente.....	49
Figura 2.33. Relación entre la impedancia homopolar y la impedancia de cortocircuito en secuencia directa para un transformador Yd con el lado en triángulo próximo al núcleo .....	49

---

---

Figura 2.34. Distribución de flujos en un transformador Dy con el arrollamiento en triángulo más alejado del núcleo magnético. ....	50
Figura 2.35. Circuito equivalente de un transformador Yy0d1 con disposición de arrollamientos Terciario-Baja-Alta (contados a partir del núcleo) teniendo en cuenta el efecto de la cuba [Kul04].....	53
Figura 2.36. Autotransformador trifásico estrella-estrella con arrollamiento terciario en triángulo .....	57
Figura 2.37. Obtención del circuito equivalente homopolar de un autotransformador estrella-estrella con arrollamiento terciario en triángulo .....	58
Figura 2.38. Transformador en conexión zigzag.....	59
Figura 2.39. Reactancia zigzag de puesta a tierra.....	60
Figura 2.40. Transformadores con dos arrollamientos secundarios: disposición en la columna de los secundarios.....	61
Figura 2.41. Circuitos equivalentes de transformadores con doble secundario para cada uno de los dos casos mostrados anteriormente .....	62
Figura 2.42. Representación en H de un transformador .....	62
Figura 2.43. Circuito equivalente para un transformador con cuatro arrollamientos.....	63
Figura 2.44. Circuito equivalente general para un transformador de cuatro arrollamientos .....	63
Figura 2.45. Impedancias del circuito equivalente ante secuencia directa de un transformador Yyd 50MVA, 132/21/9,5 kV con disposición de arrollamientos BATR .....	65
Figura 2.46. Impedancias del circuito equivalente ante secuencia directa de un transformador Yyd 30MVA, 132/16,05/10 kV con disposición de arrollamientos TBAR .....	65
Figura 2.47. Variación de la impedancia magnetizante homopolar en función de la corriente en un transformador de tres columnas sin arrollamiento conectado en triángulo .....	67
Figura 2.48. Modelo convencional .....	69
Figura 2.49. Rama magnetizante con inductancia serie .....	69
Figura 2.50. Pérdidas magnetizantes representadas por resistencias conectadas a los terminales .....	70
Figura 2.51. Rama magnetizante conectada al terminal del devanado interno .....	70
Figura 2.52. Modelo a partir de datos geométricos .....	71
Figura 2.53. Circuito equivalente propuesto por Oels para un transformador Yyd .....	71
Figura 3.1. Líneas de flujo disperso en un transformador .....	73
Figura 3.2. (a) Líneas de flujo disperso de altura equivalente (b) Diagrama de densidad de flujo o fuerza magnetomotriz .....	74
Figura 3.3. (a) Porción de flujo considerada (b) diagrama de la fuerza magnetomotriz .....	75
Figura 3.4. Esquema con las dimensiones geométricas del núcleo magnético para el transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA .....	81

---

---

Figura 3.5. Disposición de los arrollamientos respecto de la cuba para el transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA.....	82
Figura 4.1. Circuito equivalente ante secuencia homopolar para transformadores con un solo neutro accesible .....	99
Figura 4.2. Circuito equivalente ante secuencia homopolar para transformadores con dos neutros accesibles.....	100
Figura 4.3. Circuito equivalente ante secuencia homopolar para transformadores con dos neutros externos disponibles si $Z_{1N_0}$ y $Z_{2N_0}$ se aproximan a infinito.....	101
Figura 4.4. Circuito equivalente ante secuencia directa (a) y ante secuencia homopolar (b) de un transformador de tres arrollamientos (Yyd) .....	103
Figura 4.5. Ensayos de impedancia de secuencia homopolar.....	103
Figura 4.6. Representación de los circuitos equivalentes de los ensayos de impedancia de secuencia homopolar .....	104
Figura 4.7. Circuito equivalente ante secuencia homopolar de un transformador Yyd	106
Figura 4.8. Circuito equivalente homopolar para un transformador Yyd con el terciario abierto.....	108

# Índice de tablas

Tabla 2.1. Circuitos equivalentes ante secuencia homopolar de un transformador con impedancia magnetizante infinita .....	54
Tabla 2.2. Circuitos equivalentes ante secuencia homopolar de un transformador para todos los casos.....	55
Tabla 2.3. Valores típicos de la impedancia homopolar en función del grupo de conexión y del tipo de núcleo magnético .....	56
Tabla 3.1. Tensiones y corrientes nominales para el transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA .....	80
Tabla 3.2. Dimensiones del núcleo magnético para el transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA .....	80
Tabla 3.3. Tipología de los arrollamientos para el transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA .....	81
Tabla 3.4. Dimensiones y posiciones relativas de los arrollamientos para el transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA .....	81
Tabla 3.5. Impedancias homopolares calculadas a partir de las dimensiones geométricas del transformador .....	95
Tabla 4.1. Ensayo A1 en fábrica.....	110
Tabla 4.2. Valores base característicos del transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA .....	110
Tabla 4.3. Ensayo A2 en fábrica.....	111
Tabla 4.4. Ensayo A3 en fábrica.....	111
Tabla 4.5. Ensayo A4 en fábrica.....	111
Tabla 4.6. Ensayo B5 en fábrica.....	112
Tabla 4.7. Ensayo B6 en fábrica.....	112

---



---

Tabla 4.8. Ensayo B7 en fábrica.....	112
Tabla 4.9. Ensayo B8 en fábrica.....	112
Tabla 4.10. Impedancias de secuencia homopolar obtenidas de los ensayos en fábrica del transformador de características 45/15 kV y 25 MVA .....	113
Tabla 4.11. Ensayo A1 en campo .....	119
Tabla 4.12. Ensayo A2 en campo .....	119
Tabla 4.13. Ensayo A3 en campo .....	119
Tabla 4.14. Ensayo A4 en campo .....	120
Tabla 4.15. Ensayo B5 en campo .....	120
Tabla 4.16. Ensayo B6 en campo .....	120
Tabla 4.17. Ensayo B7 en campo .....	121
Tabla 4.18. Ensayo B8 en campo .....	121
Tabla 4.19. Impedancias de secuencia homopolar obtenidas de los ensayos en fábrica del transformador de características 45/15 kV y 25 MVA .....	122
Tabla 5.1. Comparación entre los ensayos A1 de fábrica y campo.....	128
Tabla 5.2. Comparación entre los ensayos A2 de fábrica y campo.....	128
Tabla 5.3. Comparación entre los ensayos A3 de fábrica y campo.....	128
Tabla 5.4. Comparación entre los ensayos A4 de fábrica y campo.....	129
Tabla 5.5. Comparación entre los ensayos B5 de fábrica y campo.....	129
Tabla 5.6. Comparación entre los ensayos B6 de fábrica y campo.....	129
Tabla 5.7. Comparación entre los ensayos B7 de fábrica y campo.....	130
Tabla 5.8. Comparación entre los ensayos B8 de fábrica y campo.....	130
Tabla 5.9. Comparación entre las impedancias calculadas a partir de las dimensiones geométricas y las impedancias medidas en los ensayos .....	132

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1. CONTEXTO DEL PROYECTO

Los transformadores son, junto con los generadores, los equipos más importantes de los sistemas eléctricos. Estos equipos permiten convertir un sistema de tensiones dado en otro sistema de la misma frecuencia y de diferente valor eficaz. La conversión en estos aparatos se efectúa con rendimientos muy próximos a la unidad por lo que las potencias de entrada y salida serán prácticamente iguales y esto conlleva que, para una determinada potencia transformada, las intensidades en los sistemas de alta y baja tensión son inversamente proporcionales a las tensiones asignadas en cada lado.

La importancia de los transformadores se debe a que gracias a ellos ha sido posible el enorme desarrollo en la utilización de la energía eléctrica, haciendo posible la realización práctica y económica del transporte de la energía a grandes distancias.

La transmisión de la energía eléctrica desde las centrales eléctricas donde se produce hasta los numerosos centros de consumo es más económica cuanto más alta es la tensión de las líneas, ya que la corriente se hace menor y, en consecuencia, se reduce la sección de los conductores.

Sin embargo, las tensiones generadas en los alternadores de las centrales eléctricas están limitadas, por consideraciones tecnológicas, a valores que oscilan entre los 5 kV y los 20 kV, que son insuficientes para alcanzar tal objetivo.

Por otro lado, las tensiones de transporte son excesivas para una utilización directa de la energía eléctrica, ya que los aparatos de utilización requieren normalmente de tensiones más bajas y, por tanto, será preciso, al final de la línea, reducir la tensión hasta valores que sean prácticos para su utilización. De esta función se encargan también los transformadores.

Los transformadores permiten conciliar de una forma idónea estas necesidades opuestas.

Por ello, la utilización de un transformador que transforme un nivel de tensión en otro superior permitirá transmitir la energía eléctrica a grandes distancias con menores corrientes por las líneas y, por consiguiente, con una atenuación de las pérdidas en la transmisión de dicha energía.

En los centros receptores otros transformadores realizan el proceso inverso, reduciendo la tensión hasta los niveles que se consideren convenientes para la distribución y consumo de esta energía. De esta forma, se puede trabajar con tensiones más bajas que permitan disponer de equipos con menor aislamiento y, por tanto, más económicos, y trabajar así en unas condiciones de mayor seguridad.

Actualmente, el contexto de los sistemas eléctricos está caracterizado por unas mayores exigencias en el ámbito de la calidad de suministro y por unas redes cada vez más potentes y malladas que implican mayores requerimientos en el comportamiento ante cortocircuitos.

Los cortocircuitos más frecuentes son los cortocircuitos asimétricos y entre ellos, cabe destacar, los cortocircuitos monofásicos y los cortocircuitos bifásicos a tierra.

El estudio del comportamiento ante cortocircuitos tanto del propio transformador como de la red en su conjunto requiere un conocimiento detallado del comportamiento homopolar del transformador.

Al estudio detallado de las características del funcionamiento homopolar del transformador se dedicará el presente Proyecto Fin de Carrera.

## 1.2. OBJETIVO DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

El principal objetivo de este Proyecto Fin de Carrera es realizar una caracterización detallada de la impedancia homopolar en transformadores.

Para tal fin se analiza la impedancia homopolar de los transformadores de potencia en función de los distintos grupos de conexión y tipos de núcleos magnéticos y se presentan dos ámbitos importantes en la caracterización de la impedancia homopolar:

- Determinación de la impedancia homopolar a partir de las dimensiones geométricas
- Ensayos para la determinación de la impedancia homopolar, ya sea mediante los ensayos finales en fábrica o mediante ensayos en campo.

Finalmente, estos ensayos conducirán a un objetivo muy importante como es la validación de los modelos de circuito equivalente. Estos ensayos se realizan con el fin de poder validar y dar parámetros a estos modelos.

## 1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La estructura del Proyecto Fin de Carrera es la siguiente:

En el Capítulo 1 se realiza una breve introducción de la importancia de los transformadores de potencia en los sistemas eléctricos. Se plantea cuál es el contexto actual de estos sistemas eléctricos y el por qué se requiere un conocimiento detallado del comportamiento homopolar del transformador. También se presentan los objetivos del trabajo a realizar.

En el Capítulo 2 se define la impedancia homopolar y se analiza su importancia en los transformadores, para permitir una primera visión general de la magnitud del tema que se aborda. A continuación, se realiza un amplio estudio de la impedancia homopolar así como del circuito equivalente ante secuencia homopolar de los transformadores de potencia en función de los distintos grupos de conexión y tipos de núcleos magnéticos. Finalmente se analizan distintos factores que influyen en el valor de la impedancia homopolar y se citan algunas alternativas al circuito equivalente ante secuencia homopolar convencional.

En el Capítulo 3 se analiza en profundidad un método descrito en la literatura para la determinación de la impedancia homopolar a partir de las dimensiones geométricas del transformador y se combina con la aplicación de este método al cálculo real de la impedancia homopolar de un determinado transformador. Se muestran diferentes casos de cálculo de la impedancia homopolar en función del arrollamiento alimentado y del estado de los distintos arrollamientos.

En el Capítulo 4 se hace un estudio de los ensayos existentes para la determinación de la impedancia homopolar, haciendo distinción entre ensayos finales en fábrica y ensayos en campo. En primer lugar, se citan los ensayos contemplados en la normativa española así como los recomendados por la normativa americana para después contrastar con el conjunto de ensayos que permiten una completa caracterización de la impedancia homopolar y aquellos extraídos de una revisión bibliográfica. Finalmente se muestran resultados obtenidos en ensayos reales en fábrica y en campo y se lleva a cabo la validación de los modelos de circuito equivalente mostrados, así como las conclusiones que se extraen de este hecho.

En el Capítulo 5 se realiza un estudio comparativo para el mismo transformador, de características 45/16,05 kV y 25 MVA, entre las impedancias calculadas a partir de las dimensiones geométricas del transformador, las medidas en fábrica y las medidas en campo.

Por último, en el Capítulo 6, se expone un breve resumen del trabajo realizado y se extraen las principales conclusiones del estudio realizado, sintetizando los aspectos más destacables y recomendando propuestas para estudios futuros.

# Capítulo 2

## LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE LOS TRANSFORMADORES DE POTENCIA

### 2.1. INTRODUCCIÓN

En diversos estudios de redes, relativos a estados de desequilibrio, es preciso conocer las impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar, de los elementos integrantes de las líneas como son generadores, transformadores, etc.

Cuando se estudian estos diversos fenómenos en redes de potencia trifásica en condiciones de desequilibrio es una práctica muy común emplear el sistema de componentes simétricas. Cuando la red es operada con una carga simétrica, sólo las impedancias de secuencia directa son de importancia; sin embargo, la magnitud de las perturbaciones asimétricas, tales como corrientes de cortocircuito o sobretensiones en estado estacionario en el caso de faltas monofásicas a tierra, es en gran parte gobernada por las impedancias de secuencia homopolar de la red.

---

En el caso concreto de los transformadores, y en general de cualquier elemento no rotativo, las impedancias de secuencia directa e inversa son iguales por lo que sólo deberemos prestar especial atención a la impedancia de secuencia homopolar. Por el contrario, puede ser que estos transformadores que tienen valores iguales de impedancia directa e inversa tengan características homopolares desiguales dependiendo del tipo de circuito magnético, de la conexión y posición de los diferentes arrollamientos, de la manera de guiar el flujo de dispersión, etc. [IEC768].

Según la norma UNE-EN 60076-1, la impedancia de secuencia homopolar de un transformador se define como *la impedancia (expresada en ohmios/fase) a la frecuencia asignada entre los bornes de línea de un arrollamiento trifásico en estrella o zig-zag conectados juntos, y su borne neutro* [U761] (figura 2.1).

Dado que para que existan las corrientes homopolares es preciso que el sistema tenga hilo de neutro, esta impedancia sólo tendrá un valor diferente de infinito en transformadores trifásicos que tengan sus arrollamientos conectados en estrella o zig-zag.

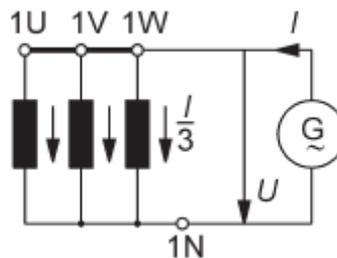


Figura 2.1. Definición de impedancia de secuencia homopolar

Para el caso de la figura 2.1, la impedancia de cada fase individual será tres veces el valor medido.

$$Z_0 = 3 \cdot \frac{U}{I} \quad (2.1)$$

Donde:

$U$  = Tensión aplicada (fase-neutro)

$I$  = Corriente en el neutro

La impedancia de secuencia homopolar consta, como cualquier impedancia, de dos componentes: la resistencia de secuencia homopolar ( $R_0$ ) y la reactancia de secuencia homopolar ( $X_0$ ). Aunque la parte resistiva de las impedancias homopolares es bastante mayor que en las impedancias de secuencia directa; aun así la parte resistiva es mucho menor que la inductiva ( $R_0 \ll X_0$ ), por lo que la parte resistiva puede ser despreciada y se habla de impedancia de secuencia homopolar en términos de reactancia de secuencia homopolar.

Se podrá hablar de aquí en adelante de, básicamente, dos tipos de reactancias de secuencia homopolar para un arrollamiento:

1. Reactancia a circuito abierto vista desde un arrollamiento, cuando los terminales del resto de arrollamientos se mantienen a circuito abierto.
2. Reactancia de cortocircuito vista desde un arrollamiento, cuando los terminales de otro de los arrollamientos se tiene cortocircuitado.

La definición dada para la impedancia homopolar es aplicable a ambos tipos de reactancias.

## **2.2. IMPORTANCIA DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR**

Como ha sido indicado anteriormente, cuando una máquina o un sistema eléctrico funcionan en condiciones equilibradas, el comportamiento del sistema no está determinado por la impedancia de secuencia homopolar. La impedancia homopolar de un sistema eléctrico interviene en cualquier condición de funcionamiento en la que las corrientes de las diferentes fases no sean iguales y estén decaladas  $120^\circ$ .

Entre las condiciones desequilibradas particularmente importantes se encuentran los cortocircuitos desequilibrados. Para calcular las corrientes y tensiones que tienen lugar cuando se produce un cortocircuito asimétrico se utiliza un circuito obtenido combinando adecuadamente las redes de secuencia del sistema. Así, por ejemplo, en el caso de un cortocircuito fase-neutro, la corriente de cortocircuito y la tensión en las fases sanas se puede determinar poniendo en serie las redes de secuencia directa, inversa y homopolar como se muestra en la figura 2.2.

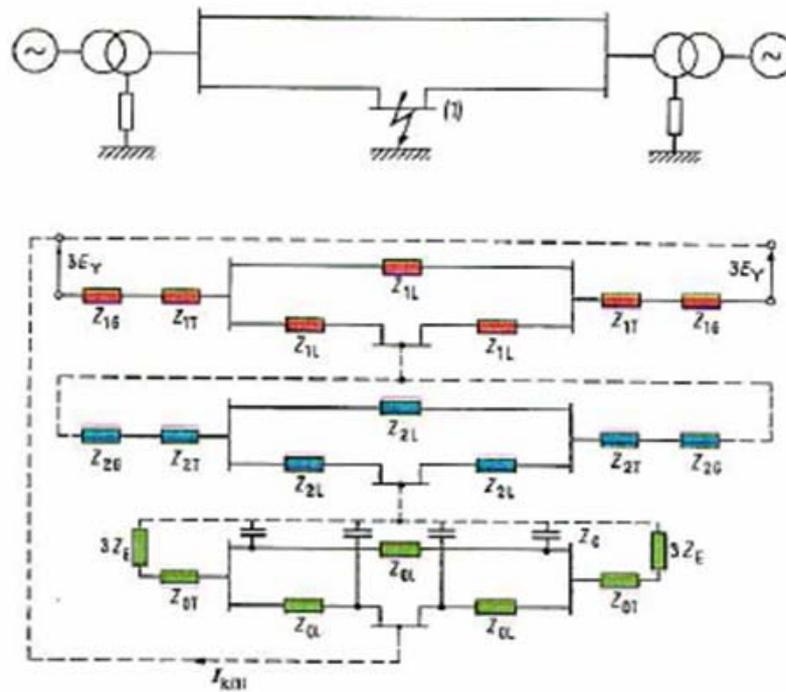


Figura 2.2. Esquema de conexiones para el cálculo del cortocircuito unipolar a tierra

Esto significa que la cuantía de las corrientes de cortocircuito depende de la cuantía de la impedancia homopolar de la red, que está estrechamente relacionada con la impedancia homopolar de los transformadores de potencia de los que dispone (figura 2.3) [Roe70]. La cuantía de las corrientes de cortocircuito influye en los esfuerzos térmicos y dinámicos que soportan los diferentes elementos de la red cuando en ella se produce un cortocircuito y determina de forma decisiva la elección de las protecciones de la red.

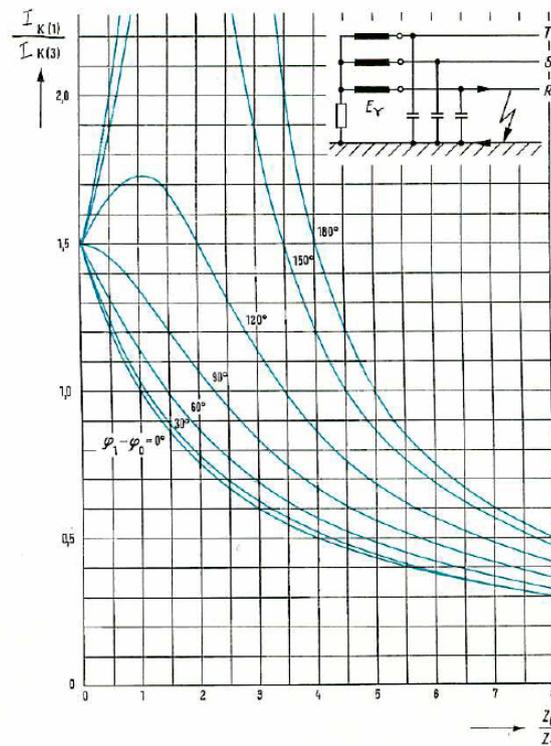


TABLA V

Intensidad de la corriente del cortocircuito unipolar, comparada con la del cortocircuito tripolar

$E_Y$  Fuerza electromotriz

$Z_0$  Impedancia del sistema homopolar

$Z_1$  Impedancia del sistema directo

$Z_2$  Impedancia del sistema inverso

$\varphi_1 - \varphi_0$  Desfase entre las impedancias  $Z_1$  y  $Z_2$

$$I_{K(1)} = I_{K(3)} = \frac{3 E_Y}{Z_0 + Z_1 + Z_2}$$

$$Z_1 = Z_2$$

25

Figura 2.3. Intensidad de la corriente de cortocircuito unipolar, comparada con la del cortocircuito tripolar en función del cociente entre la impedancia homopolar y la impedancia de secuencia directa (eje de abscisas) tomando como parámetro la diferencia entre el argumento de la impedancia de secuencia directa y el argumento de la impedancia de secuencia homopolar.

NOTA: los valores de  $\varphi_1 - \varphi_0$  superiores a  $90^\circ$  corresponden al caso de red puesta a tierra a través de una impedancia capacitiva, lo cual tiene un valor meramente teórico

Cuando en un sistema trifásico se produce un cortocircuito monofásico, en las fases sanas aparece una sobretensión cuyo valor viene determinado también por la impedancia homopolar de la red [Roe70] (figura 2.4).

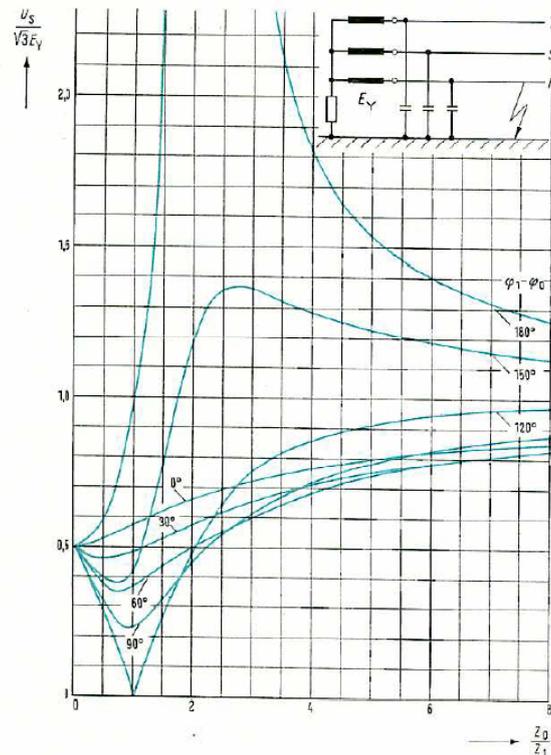


TABLA VI

Contacto unipolar a tierra  
Tensión a frecuencia de servicio de la fase S respecto a tierra  
 $E_Y$  Fuerza electromotriz  
 $Z_0$  Impedancia del sistema homopolar  
 $Z_1$  Impedancia del sistema directo  
 $Z_2$  Impedancia del sistema inverso  
 $\varphi_1 - \varphi_0$  Desfase entre las impedancias  $Z_1$  y  $Z_2$

$$U_S = \left[ a^2 - \frac{Z_0 + a^2 Z_1 + a Z_2}{Z_0 + Z_1 + Z_2} \right] E_Y$$

$Z_1 = Z_2$

36

Figura 2.4. Contacto unipolar a tierra. Tensión a frecuencia de servicio de la fase S respecto a tierra en función del cociente entre la impedancia de secuencia homopolar y la impedancia de secuencia directa

Se dice que un sistema está efectivamente puesto a tierra cuando la relación  $X_0/X_1$  es menor a 3 y  $R_0/X_1$  es menor a 1; en estos casos la tensión en las fases sanas no sobrepasa el valor de 1,4 veces la tensión simple de servicio [Wil56] [Cre75]. Esto permite abaratar sustancialmente el aislamiento de los equipos eléctricos conectados en dicha red (aisladores de las líneas, aislamiento de los transformadores de intensidad y de tensión, etc.) e influye de forma decisiva en la elección de la tensión de cebado de las autoválvulas que se instalan en la red. En este tipo de sistemas, una gran parte de los neutros de los aparatos está puesta a tierra.

## 2.3. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE DOS ARROLLAMIENTOS

El cálculo de los problemas relacionados con las tensiones y las corrientes en los transformadores resulta laborioso por lo que suele recurrirse a la sustitución del transformador por un circuito equivalente simplificado que incorpore todos los fenómenos físicos que se producen en la máquina real.

En un transformador de dos arrollamientos, el circuito equivalente habitualmente usado está basado en la existencia de dos tipos de flujos: el flujo común, que es aquel que concatena ambos arrollamientos y el flujo disperso, que es aquel que sólo concatena uno de los arrollamientos. El flujo común está creado por la suma aritmética de los amperios-vuelta producidos por ambos arrollamientos, mientras que los flujos dispersos están creados sólo por los amperios-vuelta que aparecen en uno de ellos.

La fuerza electromotriz del arrollamiento primario para un transformador de dos arrollamientos debe ser numéricamente igual a la diferencia entre la tensión aplicada al primario y las caídas de tensión en el mismo.

$$\bar{E}_1 = \bar{U}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 - jX_{1d} \cdot \bar{I}_1 \quad (2.2)$$

De igual forma, la tensión en bornes del secundario se obtiene restando las caídas de tensión en el arrollamiento correspondiente de la fuerza electromotriz inducida en dicho arrollamiento.

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - R_2 \cdot \bar{I}_2 - jX_{2d} \cdot \bar{I}_2 \quad (2.3)$$

La relación entre las fuerzas electromotrices inducidas en cada uno de los arrollamientos por el flujo común es aproximadamente igual al cociente de las tensiones nominales de cada arrollamiento.

$$r_{12} = m = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \approx \frac{E_1}{E_2} \quad (2.4)$$

Si ambos arrollamientos se encuentran conectados en estrella, el cociente anterior es numéricamente igual al cociente del número de espiras de cada arrollamiento.

Al ser las caídas de tensión de la ecuación (2.2) reducidas, se puede afirmar que el flujo en vacío es aproximadamente igual al flujo en carga, con lo que los amperios-vuelta precisos para crear el flujo son idénticos en ambas circunstancias.

$$N_1 \cdot \bar{I}_1 + N_2 \cdot \bar{I}_2 = N_1 \cdot \bar{I}_0 \quad (2.5)$$

Finalmente, con el fin de obtener un circuito equivalente conexo, se tendrán que referir todos los valores al arrollamiento primario por medio de las siguientes relaciones:

$$\bar{E}' = \bar{E} \cdot r_t \quad (2.6)$$

$$\bar{Z}' = \bar{Z} \cdot r_t^2 \quad (2.7)$$

$$\bar{I}' = \frac{\bar{I}}{r_t} \quad (2.8)$$

Con todo lo anterior, el circuito equivalente de un transformador de dos arrollamientos es el representado en la figura 2.5 [Fra03].

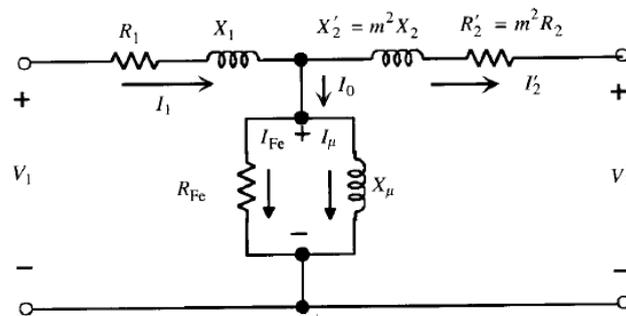


Figura 2.5. Circuito equivalente exacto de un transformador real reducido al primario

## 2.4. CIRCUITOS EQUIVALENTES EN T Y EN $\pi$ DE UN TRANSFORMADOR

El circuito equivalente convencional de un transformador de dos arrollamientos es el mostrado en la figura 2.6, y recibe el nombre de circuito en T.

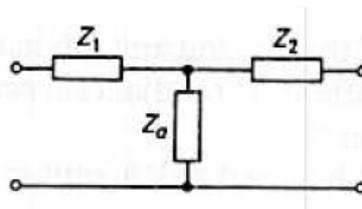


Figura 2.6. Circuito equivalente T de un transformador

Donde:

$Z_1$  = Impedancia del arrollamiento de alta tensión

$Z_2$  = Impedancia del arrollamiento de baja tensión

$Z_0$  = Impedancia de la rama de excitación compuesta por una parte resistiva que representa las pérdidas en el hierro y una parte reactiva que representa la reactancia de magnetización del núcleo

Además del circuito equivalente en T, el transformador también puede ser representado por un circuito equivalente con dos ramas paralelas, designado con el nombre de circuito  $\pi$  (figura 2.7).

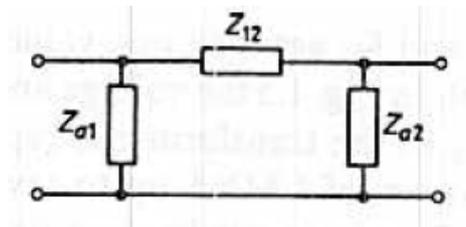


Figura 2.7. Circuito equivalente  $\pi$  de un transformador

Cada uno de estos dos circuitos puede ser obtenido a partir del otro mediante las siguientes relaciones:

$$Z_1 + Z_2 = Z_{12} \quad (2.9)$$

$$Z_0 = \frac{Z_{01} \cdot Z_{02}}{Z_{01} + Z_{02}} \quad (2.10)$$

El modelo  $\pi$  satisface la condición de que, cuando un lado del circuito es cortocircuitado, en una de las impedancias en paralelo aparece la tensión completa mientras que la otra impedancia paralela tendrá tensión cero.

El circuito en  $\pi$  es comúnmente muy empleado y apropiado para análisis de redes mediante cálculos por ordenador, si bien el circuito en T es apropiado para análisis cualitativos por su sencillez.

## 2.5. CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE TRES ARROLLAMIENTOS

El circuito equivalente habitualmente usado para transformadores de tres arrollamientos está basado en la existencia de dos tipos de flujos: aquel que concatena los tres arrollamientos y aquellos que sólo concatenan uno de ellos; dicho de otra forma, se desprecian los flujos que concatenan a dos arrollamientos pero no al tercero. El flujo común está creado por la suma aritmética de los amperios-vuelta de las tres fases, mientras que los flujos dispersos están creados sólo por los amperios-vuelta de la fase que concatenan.

En un transformador de tres arrollamientos la fuerza electromotriz del arrollamiento primario debe ser numéricamente igual a la diferencia entre la tensión aplicada al primario y las caídas de tensión en el mismo.

$$\bar{E}_1 = \bar{U}_1 - R_1 \cdot \bar{I}_1 - jX_{1d} \cdot \bar{I}_1 \quad (2.11)$$

De igual forma, la tensión en bornes del secundario o del terciario se obtiene restando las caídas de tensión en el arrollamiento correspondiente de la fuerza electromotriz inducida en dicho arrollamiento.

$$\bar{U}_2 = \bar{E}_2 - R_2 \cdot \bar{I}_2 - jX_{2d} \cdot \bar{I}_2 \quad (2.12)$$

$$\bar{U}_3 = \bar{E}_3 - R_3 \cdot \bar{I}_3 - jX_{3d} \cdot \bar{I}_3 \quad (2.13)$$

La relación entre las fuerzas electromotrices inducidas en cada arrollamiento por el flujo común es aproximadamente igual al cociente de las tensiones nominales de cada arrollamiento.

$$r_{12} = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} \approx \frac{E_1}{E_2} \quad (2.14)$$

$$r_{13} = \frac{U_{1N}}{U_{3N}} \approx \frac{E_1}{E_3} \quad (2.15)$$

Para el caso de que ambos arrollamientos estén conectados en estrella, el cociente anterior es numéricamente igual al cociente del número de espiras de los arrollamientos respectivos.

Para obtener un circuito equivalente conexo se tendrán que referir todos los valores al arrollamiento primario por medio de la relación:

$$\bar{Z}' = \bar{Z} \cdot r_t^2 \quad (2.16)$$

Dado que las caídas de tensión de la ecuación (2.11) son reducidas, se puede afirmar que el flujo en vacío es aproximadamente igual al flujo en carga, con lo que los amperios-vuelta precisos para crear el flujo son idénticos en ambas circunstancias.

$$N_1 \cdot \bar{I}_1 + N_2 \cdot \bar{I}_2 + N_3 \cdot \bar{I}_3 = N_1 \cdot \bar{I}_0 \quad (2.17)$$

Por tanto la corriente que toma el primario de la red es la suma de la corriente necesaria para crear el flujo más que se precisa para vencer los amperios vuelta de los arrollamientos conectados a la carga.

Con todo lo anterior, el circuito equivalente de un transformador de tres arrollamientos es el representado en la figura 2.8 [San 02].

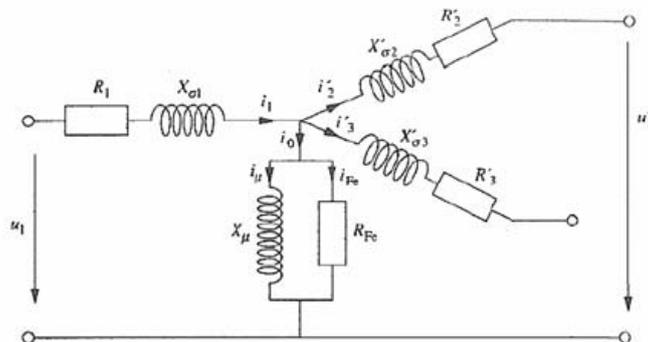


Figura 2.8. Circuito equivalente de un transformador con tres arrollamientos

Las impedancias del circuito anterior se pueden expresar en porcentaje sobre una impedancia base que suele ser el cociente entre la tensión nominal y la intensidad nominal.

$$\varepsilon_{Zi} = \frac{Z_i I_{iN}}{U_{iN(FN)}} 100 \quad (2.18)$$

Donde el subíndice i hace referencia al arrollamiento primario, secundario o terciario.

Por lo que se refiere a la impedancia magnetizante:

$$\varepsilon_{Z0} = \frac{Z_0}{Z_B} 100 = \frac{I_0}{\frac{U_N}{I_N}} 100 = \frac{I_N}{I_0} 100 \quad (2.19)$$

De modo que la impedancia magnetizante, expresada en por unidad, es la inversa de la corriente de vacío expresada en por unidad.

A continuación, en la figura 2.9 [T1e08], se muestra el circuito equivalente en  $\pi$  para un transformador de tres arrollamientos, apropiado para realizar cálculos por ordenador con los programas actuales.

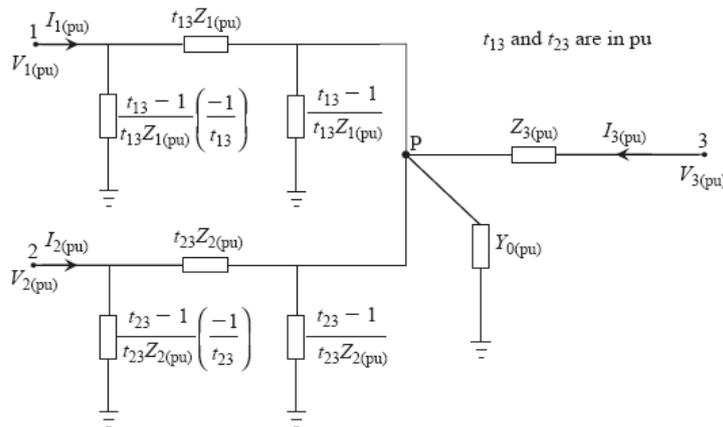


Figura 2.9. Circuito equivalente en  $\pi$  ante secuencia directa e inversa de un transformador de tres arrollamientos

Algunos autores [Rif10] [Oom99] representan el transformador de tres arrollamientos como un modelo aproximado de la siguiente forma:

1. Se simplifica el circuito omitiendo la rama de magnetización y se representan las tres ramas del transformador como una conexión triángulo (H-X, H-Y y X-Y).
2. La conexión triángulo es convertida en una conexión estrella con un punto neutro ficticio (O), que no tiene significado físico pero es necesario en la representación, y sus tres ramas (H-O, O-X y O-Y) (figura 2.10).

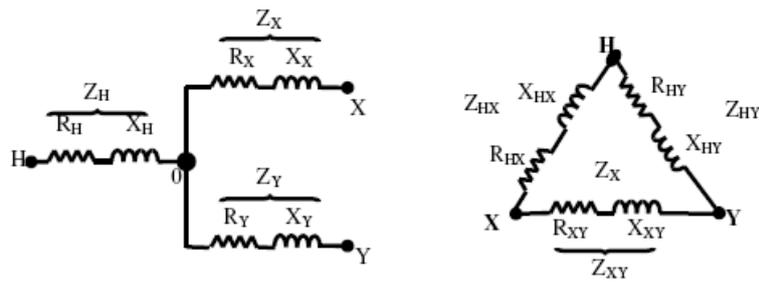


Figura 2.10. Representación de un transformador de tres arrollamientos

## 2.6. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE LOS DIFERENTES GRUPOS DE CONEXIÓN DE LOS TRANSFORMADORES

Como se mencionó anteriormente en la introducción de este capítulo, la impedancia de secuencia homopolar de un transformador puede diferir de manera considerable de la impedancia de secuencia directa dependiendo, entre otras cosas, del grupo de conexión del mismo.

A continuación, se estudiarán los tipos de conexión entre arrollamientos que resultan más relevantes.

Se denotará con **YN** a los arrollamientos primarios en estrella con neutro puesto a tierra, **Y** a los arrollamientos primarios en estrella con neutro aislado, **yn** a los arrollamientos secundarios en estrella con neutro puesto a tierra, **y** a los arrollamientos secundarios en estrella con neutro aislado, **D** a los arrollamientos primarios en triángulo y **d** a los arrollamientos secundarios en triángulo.

Es importante distinguir, a su vez, entre los diferentes tipos de núcleos magnéticos más importantes que nos podemos encontrar ya que cada uno de ellos presentará un comportamiento diferente ante esta situación [Wan09].

## 2.6.1. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR YNyn

### 2.6.1.1. Banco trifásico de transformadores monofásicos YNyn

Atendiendo a la figura 2.11, en la que se muestra el esquema del ensayo de obtención de la impedancia homopolar, se comprende que este ensayo es equivalente a hacer tres ensayos de cortocircuito simultáneos a tres transformadores monofásicos idénticos.

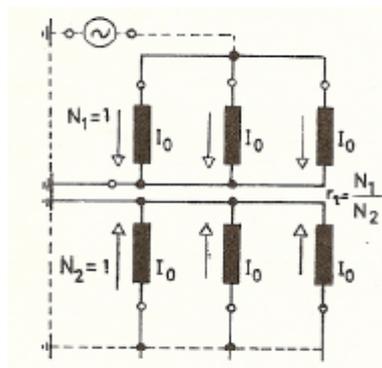


Figura 2.11. Ensayo de cortocircuito de un banco trifásico YNyn

En un banco de transformación la impedancia magnetizante<sup>1</sup> se puede despreciar por su elevado valor (entre 10.000% y 100.000%, expresado como porcentaje de la impedancia base [ABB03])<sup>2</sup>, debido al elevado valor de la permeabilidad del circuito magnético por el que transcurre el flujo común.

<sup>1</sup>La impedancia magnetizante se define como el número de enlaces de flujo común (esto es, el flujo que concatena a los dos arrollamientos de un transformador) por amperio de corriente precisa para crear tal flujo. En el circuito equivalente del transformador, la impedancia magnetizante se coloca en paralelo, de forma que sea recorrida por la diferencia de corrientes primaria y secundaria, esto es, por la corriente de magnetización.

En este sentido, debe distinguirse la impedancia magnetizante de la impedancia de dispersión, definida como el número de enlaces de flujo disperso (flujo que concatena un arrollamiento pero no al otro) dividido entre la corriente del arrollamiento al que concatena. En el circuito equivalente la reactancia de dispersión se conecta en serie. Frecuentemente la reactancia de dispersión primaria y secundaria se suman para dar la impedancia de cortocircuito del transformador.

<sup>2</sup>Recuérdese que en el circuito equivalente la impedancia magnetizante se encuentra en paralelo con la impedancia de dispersión, y que si se tienen dos impedancias en paralelo y una de ellas es mucho mayor que la otra (la impedancia serie tiene un valor entre el 10 y el 15% de la impedancia base), de forma aproximada se puede despreciar aquella que tiene mayor impedancia.

En estas condiciones, la impedancia de secuencia homopolar tendrá el mismo valor que las correspondientes impedancias de secuencia directa y secuencia inversa del circuito. La impedancia homopolar expresada en % respecto de la impedancia base tiene típicamente valores de entre el 10% y el 15%.

En la figura 2.12 se muestra el circuito equivalente del transformador ante secuencia homopolar.  $Z_H$  representa el flujo de dispersión del primario del transformador,  $Z_L$  el flujo de dispersión del secundario,  $Z_N$  la impedancia de puesta a tierra del neutro del primario y  $Z_n$  la impedancia de puesta a tierra del neutro del secundario.

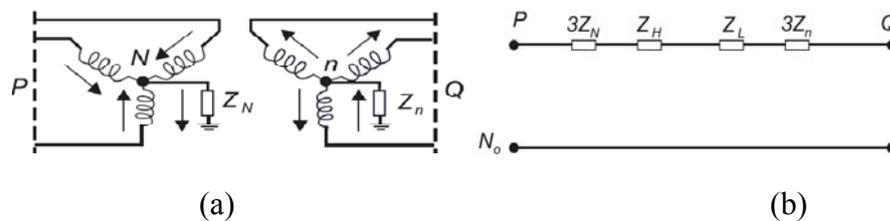


Figura 2.12. Banco de transformación YNyn (a) y circuito equivalente ante secuencia homopolar del mismo (b)

Finalmente se incluirá un breve razonamiento demostrando por qué razón la impedancia de secuencia directa es igual a la impedancia de secuencia homopolar.

### Relación entre las impedancias de secuencia directa y las impedancias de secuencia homopolar en transformadores Yy

Los fenómenos que tienen lugar cuando se alimenta el transformador ante secuencia directa son idénticos a los que tienen lugar cuando se alimenta ante secuencia homopolar: al aplicar al primario una tensión se crea un flujo, una parte del cual es el flujo común y otra parte flujo disperso.

El flujo disperso es aquel flujo que concatena un arrollamiento pero no el otro; por eso es obligado que las líneas de flujo disperso transcurran por el canal entre los arrollamientos primario y secundario (figura 2.13).

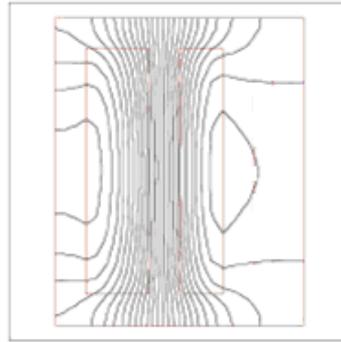


Figura 2.13. Líneas de flujo disperso de un transformador de dos arrollamientos

La inductancia de dispersión se define como el número de enlaces de flujo disperso por amperio:

$$X_H = \omega L_H = \omega \frac{N_H \Phi_{dH}}{I_H} \quad (2.20)$$

Otro tanto se puede decir del arrollamiento de BT.

El flujo disperso de cada una de las fases discurre por caminos independientes (sin interacción entre sí), por ello para una misma corriente circulando por las bobinas el flujo creado es idéntico en un caso que en otro (figura 2.13). Por eso  $X_H$  y  $X_L$  son idénticos para secuencia directa y para secuencia homopolar.

La inductancia magnetizante se define como el número de enlaces de flujo común por cada amperio de corriente de vacío.

$$L_M = \frac{N_1 \Phi}{I_0} \quad (2.21)$$

La relación entre el flujo común y la corriente precisa para crearlo (corriente de vacío) es:

$$\Phi = \frac{N_1 I_0}{\mathfrak{R}} \quad (2.22)$$

Donde  $\mathfrak{R}$  es la reluctancia que se ofrece al paso del flujo común<sup>3</sup> (reluctancia del núcleo magnético).

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu} \frac{l_{Fe}}{S_{Fe}} \quad (2.23)$$

Donde  $\mu$  es la permeabilidad del hierro,  $l_{Fe}$  la longitud del circuito magnético y  $S_{Fe}$  la sección del mismo.

A diferencia del flujo disperso, el flujo común discurre por el núcleo magnético. En secuencia directa el flujo que sube por una columna se anula en el resto, ya que los flujos son idénticos y están decalados. Sin embargo, esto no ocurre ante secuencia homopolar, donde las sinusoides se encuentran en fase.

Por eso, a diferencia de la reactancia de dispersión, la reactancia que tiene en cuenta el flujo común será diferente ante secuencia directa que ante secuencia homopolar.

Como se ha citado anteriormente, en un banco de transformación la impedancia magnetizante se puede despreciar por su alto valor debido al elevado valor de la permeabilidad del circuito magnético por el que transcurre el flujo común y, por tanto, en estas condiciones la impedancia de secuencia homopolar será igual a la impedancia de secuencia directa.

La figura 2.14 [Tle08] muestra el circuito equivalente con todos sus valores referidos al lado de alta tensión y con la rama paralela de magnetización despreciable.

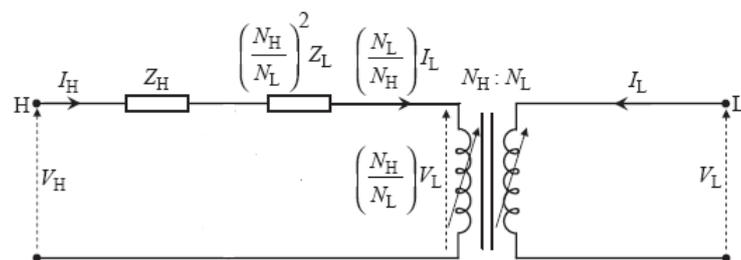


Figura 2.14. Circuito equivalente básico con la impedancia del lado de baja tensión referida al lado de alta tensión

<sup>3</sup>La reluctancia en un circuito magnético juega un papel semejante a la resistencia en un circuito eléctrico.

La relación que guarda la impedancia de magnetización con las impedancias de dispersión de cada uno de los arrollamientos para que la impedancia de magnetización pueda considerarse despreciable y afirmar que la impedancia de secuencia homopolar será igual a la impedancia de secuencia directa es de un factor 400-1.

En el caso de no haber despreciado la impedancia magnetizante el circuito equivalente sería el de la figura 2.15 [Tle08].

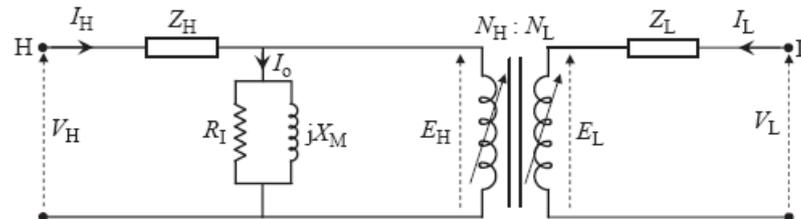


Figura 2.15. Circuito equivalente de un transformador monofásico en unidades físicas reales

Donde:

$$Z_H = R_H + jX_H \quad (2.24)$$

$R_H$  = Resistencia del arrollamiento de alta tensión

$X_H$  = Reactancia de dispersión del arrollamiento de alta tensión

$$Z_L = R_L + jX_L \quad (2.25)$$

$R_L$  = Resistencia del arrollamiento de baja tensión

$X_L$  = Reactancia de dispersión del arrollamiento de baja tensión

$R_I$  = Resistencia que representa las pérdidas en el hierro y que varían con el cuadrado de la tensión aplicada en el arrollamiento de alta tensión

$X_M$  = Reactancia magnetizante del núcleo referida al lado de alta tensión

$N_H$  y  $N_L$  representan el número de vueltas reales de los arrollamientos de alta y baja tensión, respectivamente.

### 2.6.1.2. Transformador trifásico YNyn de tres columnas

Cuando se realiza un ensayo de cortocircuito es preciso que en el núcleo haya un cierto flujo para que se engendre en el secundario la f.e.m. precisa para que circule corriente.

En un transformador trifásico, a diferencia de un banco de transformación compuesto por tres unidades monofásicas, los circuitos magnéticos de las tres fases están ligados (figura 2.16).

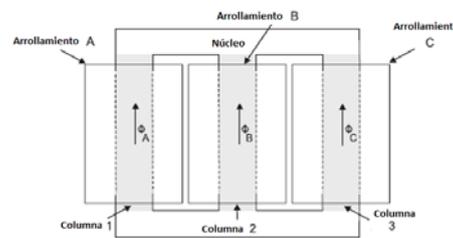


Figura 2.16. Esquema de los caminos magnéticos de un transformador trifásico de 3 columnas

En el punto común del circuito magnético se debe cumplir:

$$\phi_A + \phi_B + \phi_C = \phi_{RESULTANTE} \quad (2.26)$$

En el caso de los flujos de secuencia directa e inversa, los flujos  $\phi_A$ ,  $\phi_B$  y  $\phi_C$  son iguales y desfasados  $120^\circ$  por lo que su suma en el punto común es cero. A diferencia de esto, los flujos homopolares son tres flujos iguales y en fase en las tres columnas, por lo que este flujo homopolar resultante ya no es cero, como ocurre en secuencia directa. Pero dado que las líneas de inducción deben ser cerradas, el flujo homopolar resultante debe tener su camino de retorno por el exterior del circuito magnético (aceite, cuba, pantallas magnéticas, etc.). Este camino tiene una reluctancia muy elevada, por lo que se precisa mucha corriente para crear el flujo, y la corriente magnetizante no puede ser despreciada. Por ello, la impedancia magnetizante del circuito tendrá un valor mucho más reducido y ya no podrá ser despreciada frente a la impedancia de la rama serie; la impedancia magnetizante en este caso es entre 5 y 10 veces mayor que la impedancia de la rama serie [ABB03], de forma que su valor<sup>4</sup> está comprendido entre el 50% y el 100% [Chr65]<sup>5</sup>.

<sup>4</sup>Expresado en porcentaje respecto de la impedancia base.

<sup>5</sup>Algunos autores dan cifras un poco diferentes, como [Wan09] que da un margen entre el 40% y el 150% o [J&P98] que da un margen del 75% al 200%.

La impedancia magnetizante ante secuencia homopolar de un transformador depende del diámetro de la columna [Chr65]<sup>6</sup>. Por ello, los transformadores de grandes potencias tienen mayores impedancias magnetizantes homopolares que los transformadores pequeños. No obstante, este crecimiento no es uniforme, ya que en transformadores muy grandes las restricciones debidas al transporte del transformador imponen unas relaciones geométricas diferentes que en los transformadores más pequeños, y es por eso que en transformadores muy grandes la impedancia magnetizante ante secuencia homopolar no aumenta tanto como cabría esperar<sup>7</sup>.

En la figura 2.17 se muestra el circuito equivalente ante secuencia homopolar para este caso.

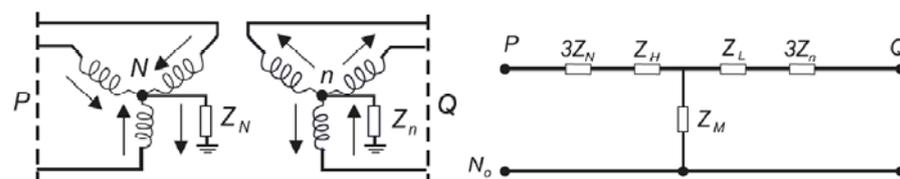


Figura 2.17. Transformador YNyn de núcleo trifásico (a) y circuito equivalente ante secuencia homopolar del mismo (b)

Para el caso de que los neutros de AT y BT estén puestos rígidamente a tierra ( $Z_N=0$ ,  $Z_n=0$ ) la impedancia homopolar que presenta el transformador con el secundario en cortocircuito es:

$$Z_0 = Z_H + \frac{Z_M Z_L}{Z_M + Z_L} \quad (2.27)$$

Pero como  $Z_M + Z_L > Z_M$  se tiene que:

$$Z_0 = Z_H + \frac{Z_M Z_L}{Z_M + Z_L} < Z_H + Z_L = Z_{cc} \quad (2.28)$$

<sup>6</sup>La expresión aproximada para la impedancia homopolar expresada en porcentaje respecto de la impedancia base es:

$$X_0 = 1,1 \frac{S_N}{\omega D^3} 100 \quad (\text{con la potencia en MVA})$$

Admitiendo que la potencia nominal depende de la cuarta potencia del diámetro de la columna, la impedancia homopolar resulta aproximadamente proporcional al diámetro de la columna.

<sup>7</sup>Esto tiene su repercusión en el factor de defecto a tierra.

Esto es, la impedancia homopolar es menor que la impedancia de cortocircuito (o impedancia de secuencia directa). En la práctica se toma que la impedancia de secuencia homopolar está entre el 80% y el 90% de  $Z_{cc}$ <sup>8</sup>.

La norma IEC 60076-8 cita esta impedancia, aproximadamente, entre el 90% y el 95% de la impedancia directa de cortocircuito.

En el circuito de la figura 2.12 es irrelevante cómo se reparte la impedancia de cortocircuito ( $Z_{cc}$ ) entre sus dos sumandos ( $Z_H$  y  $Z_L$ ). Sin embargo, en el circuito de la figura 2.17 el reparto de  $Z_{cc}$  entre sus dos componentes ( $Z_H$  y  $Z_L$ ) sí que tiene influencia en el valor de la impedancia del transformador. Debido a ello la impedancia homopolar vista desde el arrollamiento de AT tiene un valor distinto (en concreto un valor menor<sup>9</sup>) que la impedancia homopolar vista desde el arrollamiento de BT.

La suma de los dos elementos de la impedancia en serie ( $Z_H$  y  $Z_L$ ) es igual a la impedancia de cortocircuito para secuencia directa. La subdivisión entre los dos elementos es arbitraria, e incluso puede tomarse un valor igual a cero [IEC768].

Para este grupo de conexión (Ynyn), Oels [Oel68] da el circuito equivalente de la figura 2.18, donde la reactancia  $X_{12}$  es la reactancia del transformador ante secuencia directa y  $F_2$  depende de la potencia del transformador<sup>10</sup>, como se muestra en la figura 2.19.

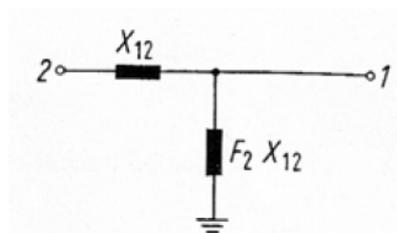


Figura 2.18. Circuito equivalente propuesto por Oels para los transformadores YNyn de núcleo trifásico

<sup>8</sup>Los valores más pequeños (80%) aplican a transformadores de grandes potencias, mientras que los más grandes (90%) lo hacen para transformadores de potencias reducidas. En [Cop70] y en [Oel68] se proporciona una gráfica que relaciona el cociente entre la impedancia de secuencia homopolar y la impedancia de secuencia directa en función de la potencia, si bien ese tipo de gráficas deben ser tomadas con cierto cuidado, ya que son muy dependientes del tamaño del transformador.

<sup>9</sup>Para transformadores de columnas, y suponiendo, como es habitual, que el arrollamiento de AT es más externo al arrollamiento de BT.

<sup>10</sup>En realidad  $F_2$  no sólo depende de la potencia nominal del transformador, sino de si éste dispone de un arrollamiento en serie (caso de autotransformador), de si dispone de un arrollamiento de regulación, etc.

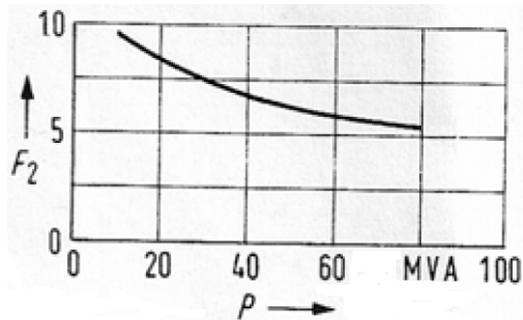


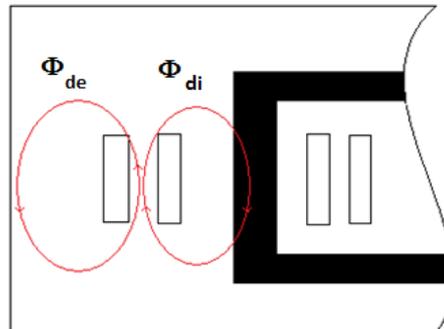
Figura 2.19. Relación entre la impedancia magnetizante para la secuencia homopolar y la impedancia de cortocircuito en función de la potencia aparente del transformador

Para el análisis del funcionamiento de un transformador en una red eléctrica, el circuito de la figura 2.17 (que llamaremos circuito en T) se puede representar como un circuito en  $\pi$ , tal como se mostró en el apartado 2.4.

### **Impedancia homopolar vista desde el arrollamiento de AT y el arrollamiento de BT**

La impedancia de secuencia homopolar adquiere un valor diferente dependiendo de si el arrollamiento alimentado es el arrollamiento externo o el arrollamiento interno.

La razón de ello es el diferente camino por el que se cierran las líneas de flujo de dispersión. El flujo disperso transcurre por el canal que separa los arrollamientos. En la figura 2.20 se muestran dos de esas líneas de flujo disperso. La línea  $\phi_{de}$  concatena al arrollamiento interno pero sí al externo. Por el contrario, la línea  $\phi_{di}$  concatena al arrollamiento interno pero no concatena al arrollamiento externo, ya que la línea  $\phi_{di}$  pincha dos veces la superficie delimitada por el arrollamiento interno, una hacia arriba y otra hacia abajo, por lo que el flujo neto es nulo.



**Figura 2.20. Circulación del flujo homopolar alrededor de los arrollamientos interno y externo**

Las líneas de inducción tienden a circular por los caminos de menor reluctancia<sup>11</sup>, por eso la mayoría de las líneas de flujo disperso cierran su camino por los elementos ferromagnéticos. En el arrollamiento interno, el elemento ferromagnético más próximo es el núcleo magnético, por lo que las líneas de flujo disperso del arrollamiento interno cierran su camino por el núcleo. Por el contrario, en el arrollamiento externo las líneas de flujo disperso cierran su camino por la cuba, ya que el arrollamiento interno apantalla el camino hacia el núcleo.

Si representamos un corte lateral de un transformador de dos arrollamientos (figura 2.21), se pueden considerar dos casos [Cop70]:

- El arrollamiento alimentado es el interno (el situado más cercano al núcleo)
- El arrollamiento alimentado es externo (más alejado del núcleo)

<sup>11</sup>Ya que la reluctancia es la oposición de un medio al paso del flujo.

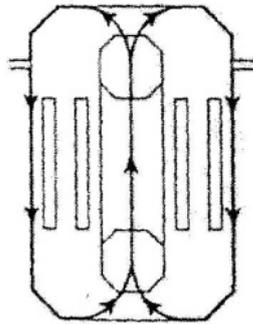


Figura 2.21. Corte lateral de un transformador de dos arrollamientos. Efecto de la circulación de la corriente homopolar en las bobinas en un transformador de dos arrollamientos

La reactancia homopolar  $X_0$  se expresa como:

$$X_0 = w \cdot L_0 \quad (2.29)$$

siendo:

$$L_0 = \frac{N^2}{R} \quad (2.30)$$

Donde:

$w = 2 \cdot \pi \cdot f$  es la pulsación de la tensión

$N$  es el número de espiras

$R$  es la reluctancia del circuito magnético

Si el arrollamiento alimentado es interno, el flujo homopolar encontrará un camino de retorno de baja reluctancia a través del circuito magnético (flujo  $\Phi_{di}$ ) y, por tanto, atendiendo a la ecuación (2.30), la inductancia homopolar será elevada. Como consecuencia, según la ecuación (2.29), la reactancia homopolar también tendrá un valor elevado.

Con un razonamiento similar al anterior, en este caso, si el arrollamiento alimentado es externo, el flujo homopolar debe tener su camino de retorno por el exterior del circuito magnético (flujo  $\Phi_{de}$ ), siendo éste de mayor reluctancia y, por tanto, la inductancia homopolar de menor valor. Como consecuencia, la reactancia homopolar también será menor.

Por tanto, se puede concluir que el valor de la impedancia homopolar dependerá del arrollamiento que se esté alimentando y su valor será menor si el arrollamiento alimentado es el externo (normalmente el arrollamiento de AT) y mayor si el arrollamiento alimentado es el interno (típicamente el de BT).

### **Influencia de la cuba**

Como se indicará posteriormente en el apartado 2.9, la cuba influye en el valor de la impedancia magnetizante ( $Z_M$  en la figura 2.17).

Además de lo anterior, cuando el flujo homopolar cierra su camino a través de la cuba se inducen en las paredes de la misma corrientes parásitas (llamadas corrientes de Foucault o corrientes eddy) que tienden a eliminarlo, por lo que la impedancia de secuencia homopolar adquirirá un valor distinto según el transformador se encuentre o no introducido en su cuba.

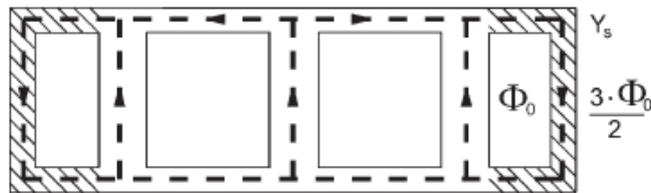
Para tener en cuenta el efecto de la cuba, el transformador YNyn puede ser considerado como un transformador de tres arrollamientos con un tercer arrollamiento en triángulo que tenga en cuenta el efecto de la cuba [Kul04] [Tle08] [Chr65].

En la práctica, el ensayo de determinación de la impedancia homopolar se hace con la parte activa introducida en la cuba. Así, en este caso, ocurre que la impedancia homopolar es algo menor que la impedancia de secuencia directa e inversa ya que la cuba, que encierra las 3 fases, actúa como un arrollamiento cortocircuitado reduciendo la impedancia debido a las corrientes que circulan por ella.

#### **2.6.1.3. Transformador trifásico YNyn de cinco columnas**

Normalmente los transformadores con núcleo de cinco columnas disponen de un arrollamiento terciario de estabilización [ABB03], aunque también es importante analizar el caso de transformadores YNyn sin arrollamiento terciario.

En el supuesto de que el arrollamiento terciario no existiera, el flujo de secuencia homopolar, a diferencia de lo que ocurría con un transformador de tres columnas, tendrá un camino de retorno a través de las columnas laterales y las culatas y el valor de la impedancia de secuencia homopolar dependerá fuertemente de la tensión de excitación (figura 2.22).



$\phi_0$  = flujo homopolar,  $Y_s$ =columna lateral

**Figura 2.22. Circulación del flujo homopolar en un transformador trifásico de cinco columnas. Las columnas laterales sombreadas corresponden a partes del circuito magnético propensas a saturarse frente a la secuencia homopolar**

Para una tensión de excitación de hasta el 30% de la tensión de fase, la impedancia magnetizante de secuencia homopolar es tan alta como la impedancia de magnetización de secuencia directa (valores entre 10.000% y 100.000%) [ABB03]. Para tensiones mayores las columnas laterales y las culatas se aproximan a la saturación completa (dado que su sección es demasiado pequeña para llevar el flujo de secuencia homopolar que corresponde a la tensión nominal de las tres fases) y la impedancia magnetizante para tensiones próximas a la nominal tendrá valores entre 50% y 150% [Wan09] (expresada en % respecto de la impedancia base).

#### 2.6.1.4. Transformador de núcleo trifásico acorazado

Los transformadores de tipo acorazado conectados en estrella-estrella normalmente tienen un arrollamiento terciario de estabilización [ABB03]. No obstante, en caso de que el arrollamiento terciario no exista, la impedancia de secuencia homopolar dependerá fuertemente de la tensión de excitación.

Si la tensión de secuencia homopolar es más alta que la mitad de la tensión nominal de fase, las culatas y columnas se saturan y presentan una gran reluctancia al paso del flujo homopolar. Por tanto, el comportamiento del transformador será similar al de un transformador de cinco columnas, con la diferencia de que dado que la distribución de flujos en el núcleo es diferente (figura 2.23), el núcleo magnético de los transformadores acorazados suele saturar para una tensión homopolar superior al 50% de la tensión nominal [ABB03] [Cog59].

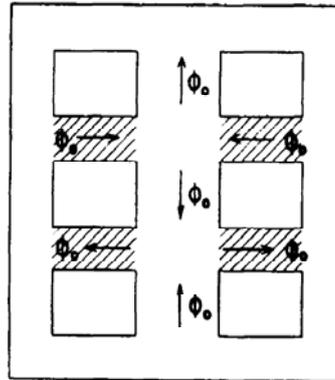


Figura 2.23. Distribución del flujo homopolar en un transformador trifásico acorazado. Las zonas sombreadas representan las partes del circuito magnético propensas a saturarse debido a que por ellas pasa un flujo superior al que pasaría en caso de secuencia directa

## 2.6.2. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR YNy

Un transformador YNy, visto desde el secundario, se comporta como un circuito abierto para la corriente homopolar ya que al carecer de hilo de neutro de retorno, por el secundario de este transformador no pueden circular corrientes homopolares.

Por el contrario, por el primario del transformador sí podrán circular corrientes homopolares. Como es bien sabido, el primario de un transformador debe tomar una corriente igual a la suma de la corriente que se precisa para vencer los amperios-vuelta del secundario más la necesaria para crear el flujo común.

$$i_1 = i_m + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2 \quad (2.31)$$

Pero como en este caso, la corriente del secundario es nula resulta:

$$i_1 = i_m \quad (2.32)$$

Por tanto, la impedancia que se observa desde el primario será tan solo la impedancia magnetizante del transformador.

El orden de magnitud de la impedancia homopolar variará según se tenga un banco trifásico compuesto por tres unidades monofásicas o un transformador de núcleo trifásico. Según se indicó en el apartado 2.6.1, la impedancia magnetizante tiene un valor entre 10.000 y 100.000% (expresada en % respecto de la impedancia base) para el caso de bancos de transformación formados por tres unidades monofásicas, entre 50% y 100% [Chr65] para transformadores de núcleo trifásico de tres columnas y valores intermedios entre los mencionados (60%-120%) [Tle08], y dependientes de la tensión aplicada, para transformadores de cinco columnas.

En las figuras 2.24 y 2.25 se muestra el circuito equivalente ante secuencia homopolar para el caso de un banco de transformación (impedancia magnetizante de valor infinito) y de un transformador de núcleo trifásico (impedancia magnetizante de valor finito). El circuito abierto en la parte derecha de las figuras recoge el hecho de que por el secundario del transformador no pueden circular corrientes de secuencia homopolar.

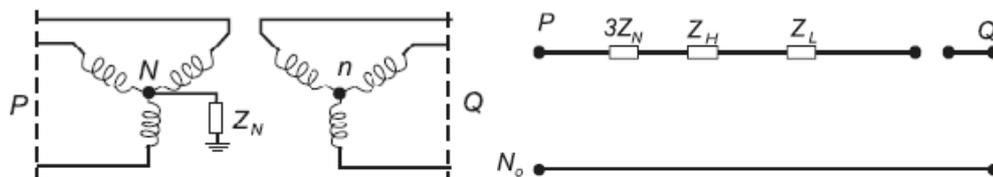


Figura 2.24. Banco de transformación YNy (a) y circuito equivalente ante secuencia homopolar del mismo (b)

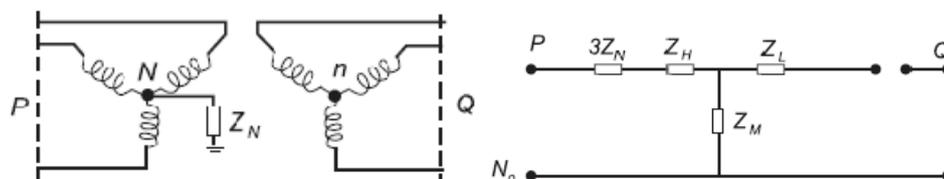


Figura 2.25. Transformador YNy de núcleo trifásico (a) y circuito equivalente ante secuencia homopolar del mismo (b)

En el caso de transformadores de núcleo trifásico de tres columnas, es de señalar que el flujo de secuencia homopolar puede causar calentamiento excesivo en las partes metálicas de la estructura del transformador por las que circula como, por ejemplo, la cuba, por lo que la corriente con la que se efectúen los ensayos de recepción en fábrica no deberá ser mayor del 30% de la corriente nominal [ABB03] (corrientes hasta la corriente nominal sólo son permitidas durante unos pocos segundos), y la tensión aplicada no deberá sobrepasar la tensión fase-neutro que se produce durante una operación normal.

En el caso de transformadores en los que los amperios-vuelta entre arrollamientos están equilibrados (transformadores YNyn, transformadores YNd), el flujo en el núcleo es reducido, y en ese caso la corriente de medida sí podrá ser tan alta como la corriente nominal.

### **2.6.3. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR Yy**

Un transformador Yy se comporta como un circuito abierto ante la corriente homopolar ya que carece de hilo de neutro de retorno tanto en el lado de alta tensión como en el lado de baja tensión y, por tanto, no pueden circular corrientes homopolares ni por el arrollamiento primario ni secundario del transformador. El circuito equivalente ante secuencia homopolar es un circuito abierto. En este caso no influye el tipo de núcleo magnético.

### **2.6.4. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR YNd**

En este apartado, haremos distinción entre los diferentes tipos de núcleos magnéticos.

#### **2.6.4.1. Banco trifásico de transformadores monofásicos YNd**

Ante secuencia homopolar, las tres tensiones aplicadas al primario del transformador son tres sinusoides idénticas, con lo que en el núcleo magnético se tiene un flujo homopolar. En el secundario del transformador los flujos homopolares inducen fuerzas electromotrices que pulsan en fase en cada una de las tres fases del triángulo (figura 2.26). Esas f.e.m.s hacen que por el interior del triángulo circule una intensidad aun cuando en bornes del secundario no exista carga alguna o cortocircuito (figura 2.26).

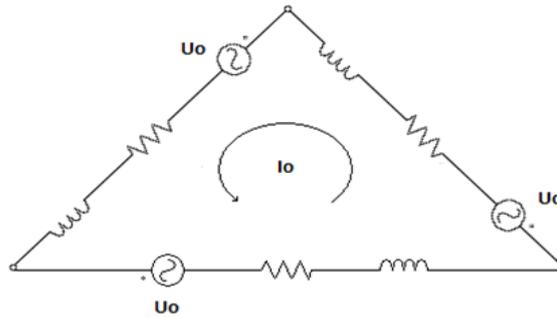


Figura 2.26. Representación gráfica del efecto producido por las f.e.m.s en el interior del triángulo

Cuando se realiza un ensayo de cortocircuito en un banco trifásico de transformadores YNd, el comportamiento de cada uno de los transformadores monofásicos es idéntico al que se tendría si cada una de las fases estuviera en cortocircuito (figura 2.27). El crear el flujo común preciso para este ensayo no requiere una corriente de magnetización muy elevada, ya que existe un camino de baja reluctancia disponible para el flujo en el circuito magnético.

Por tanto, para un banco de transformación compuesto por tres unidades monofásicas, la impedancia de secuencia homopolar es igual a la impedancia de secuencia directa entre los arrollamientos conectados en estrella y triángulo. La impedancia homopolar expresada en % respecto de la impedancia base toma valores de alrededor del 10% [ABB03].

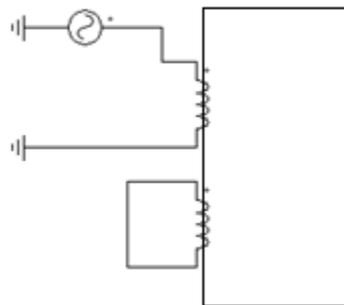


Figura 2.27. Comportamiento de cada transformador monofásico en un banco trifásico YNd

Aunque por dentro del triángulo circulen corrientes homopolares, por el exterior del mismo no circula corriente homopolar alguna, ya que el triángulo carece de hilo de neutro por el que puedan retornar dichas corrientes. El circuito equivalente ante secuencia homopolar en este caso se muestra en la figura 2.28. Dicho circuito equivalente recoge el hecho de que las corrientes homopolares del primario pueden circular pero no así las del secundario.

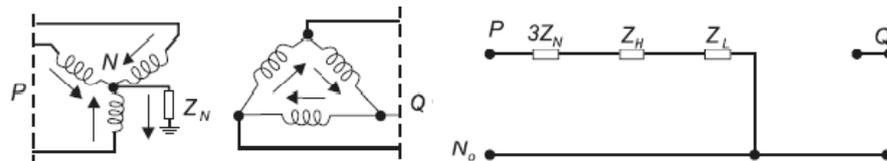


Figura 2.28. Banco de transformación YNd (a) y circuito equivalente ante secuencia homopolar del mismo (b)

#### 2.6.4.2. Transformador trifásico YNd de tres columnas

Se comenzará dando una visión simplificada aunque físicamente un tanto más imprecisa.

Dado que el primario del transformador es alimentado mediante un sistema de secuencia homopolar, en este caso los flujos en las tres columnas tendrán la misma dirección y estarán en fase. Como se ha indicado anteriormente, en un transformador de tres columnas los flujos homopolares no disponen de camino de retorno y deben retornar por el exterior del circuito magnético (figura 2.29) [Ras75], lo que supone que la corriente magnetizante requerida para crearlos es elevada, con lo que según la ecuación (2.31), para una corriente secundaria dada la corriente primaria aumenta, y según la ecuación (2.1) la impedancia homopolar es ligeramente menor que la impedancia de secuencia directa  $Z_{cc}$  y tiene un valor de aproximadamente  $0,8-1,0 Z_{cc}$  [ABB03].

En realidad los fenómenos son un poco distintos dependiendo de si el arrollamiento en triángulo está más próximo al núcleo que el arrollamiento en estrella. Para el caso de que el lado en triángulo esté más próximo al núcleo (transformadores reductores Yd) la impedancia homopolar es menor a la de secuencia directa, mientras que para el caso de que el lado en triángulo sea el más exterior (transformadores reductores Dy) ambas impedancias son prácticamente idénticas.

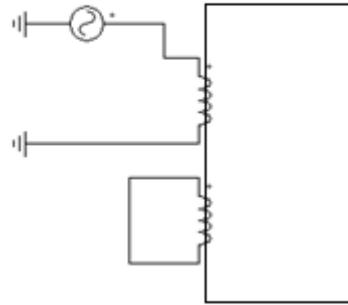


Figura 2.29. Comportamiento de los núcleos ferromagnéticos (abiertos) en un transformador trifásico de tres columnas YNd

En la figura 2.30 se muestra el circuito equivalente ante secuencia homopolar para este caso.

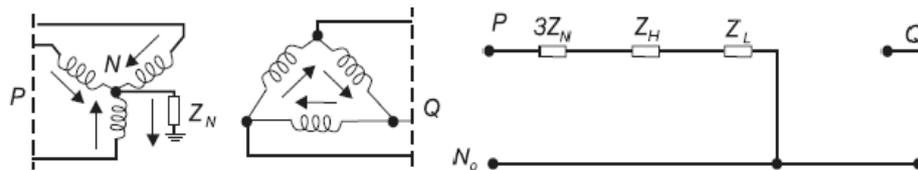


Figura 2.30. Transformador YNd de núcleo trifásico (a) y circuito equivalente ante secuencia homopolar del mismo (b)<sup>12</sup>

A continuación se expone una visión más precisa de los fenómenos que tienen lugar en este caso.

### Justificación de la diferente impedancia homopolar de los transformadores Dy frente a los Yd

Como se ha indicado, la impedancia homopolar de los transformadores Yd se encuentra entre 0,8 y 1,0  $Z_{cc}$ . Oels [Oel68] precisa más esta afirmación, y para ello distingue entre transformadores Yd con el lado del triángulo más próximo al núcleo magnético y transformadores Dy con el lado de estrella más próximo al núcleo magnético.

<sup>12</sup>Esta figura también aplica al caso de transformadores de cinco columnas y acorazados.

En la figura 2.31 se muestra el transformador estrella-triángulo conectado para el ensayo de determinación de la impedancia homopolar. En dicha figura se observa que la tensión de salida de cada fase del arrollamiento en triángulo es cero, ya que las tres fases de salida están unidas entre sí y en configuración triángulo la tensión que queda aplicada al arrollamiento es la tensión de línea.

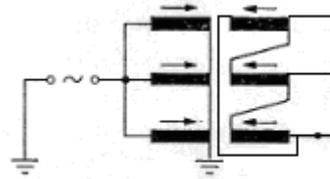


Figura 2.31. Transformador estrella-triángulo dispuesto para el ensayo de cortocircuito

En el arrollamiento secundario se verifica:

$$u_2 = -R_2 i_2 + N_2 \frac{d\Phi_{2T}}{dt} = 0 \quad (2.33)$$

Si por un momento se admite que la resistencia del arrollamiento secundario es nula, se puede escribir:

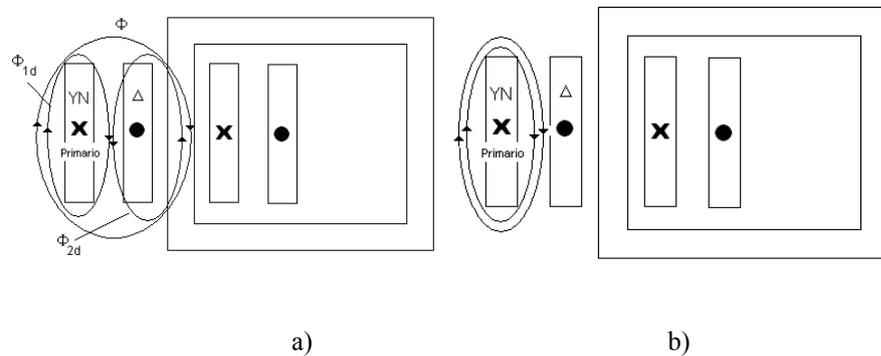
$$u_2 = N_2 \frac{d\Phi_{2T}}{dt} = 0 \quad (2.34)$$

Donde  $\Phi_{2T}$  es el flujo total que concatena el secundario, suma del flujo común ( $\Phi$ ) y del flujo disperso del secundario ( $\Phi_{2d}$ ). En las figuras 2.32a y 2.34a se muestran dichos flujos.

$$u_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} + N_2 \frac{d\Phi_{2d}}{dt} = 0 \quad (2.35)$$

Con lo que el flujo disperso del secundario es igual y de sentido contrario al flujo primario. Las figuras 2.32 y 2.34 reflejan lo dicho aquí.

Para el caso de que el arrollamiento en estrella sea el arrollamiento más externo, la distribución de flujos se muestra en la figura 2.32. En la figura 2.32a la situación real y en la figura 2.32b una situación formalmente equivalente a la 2.32a.



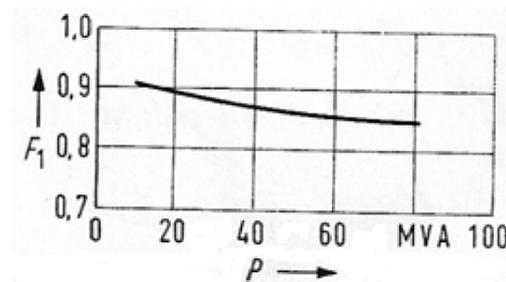
**Figura 2.32. Flujos en un transformador YNd durante el ensayo de determinación de la impedancia homopolar a) Flujos reales b) Situación equivalente**

En la figura 2.32b se aprecia que el flujo que concatena el arrollamiento en estrella transcurre por el aire, lo que supone que la intensidad precisa para crearlo es elevada, por lo que la impedancia homopolar (cociente entre la tensión aplicada y la corriente consumida) resulta menor.

La impedancia homopolar se relaciona con la impedancia de secuencia directa mediante la expresión:

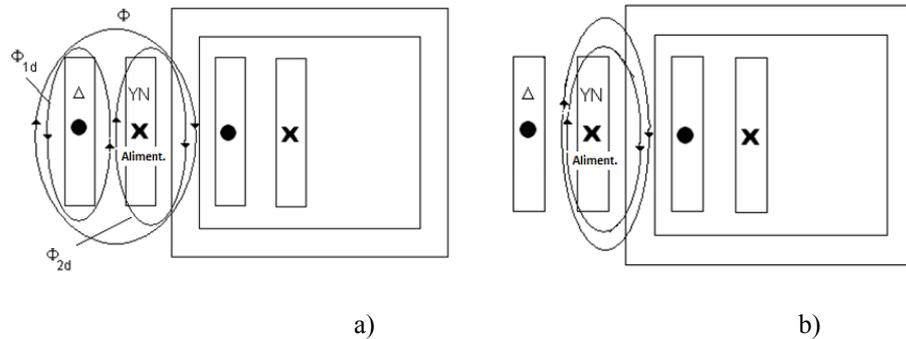
$$X_0 = F_1 X_{cc} \quad (2.36)$$

Donde  $F_1$  depende de la potencia nominal del transformador (figura 2.33), de modo que cuanto mayor es la potencia del transformador más difieren las impedancias de secuencia directa y de secuencia homopolar.



**Figura 2.33. Relación entre la impedancia homopolar y la impedancia de cortocircuito en secuencia directa para un transformador Yd con el lado en triángulo próximo al núcleo**

En el caso de que el arrollamiento externo sea un arrollamiento en triángulo ocurre algo semejante, pero en esta ocasión el arrollamiento en triángulo apantalla la cuba. En la figura 2.34 se muestra la distribución de flujos en este caso.



**Figura 2.34.** Distribución de flujos en un transformador Dy con el arrollamiento en triángulo más alejado del núcleo magnético. En la figura  $\phi$  es el flujo común,  $\phi_{1d}$  es el flujo disperso del arrollamiento primario (en triángulo) y  $\phi_{2d}$  es el flujo disperso del arrollamiento secundario (en estrella). Al igual que antes, a) refleja los flujos reales y b) una situación formalmente equivalente

Por esta razón, en este tipo de transformadores la cuba no tiene influencia en la impedancia homopolar [Kul04].

En este tipo de transformadores el flujo homopolar transcurre parcialmente por el núcleo y la impedancia homopolar es muy semejante a la de cortocircuito.

$$X_0 \approx X_{cc} \quad (2.37)$$

### 2.6.4.3. Transformador trifásico YNd de cinco columnas

En un transformador de cinco columnas, las columnas laterales presentan un camino de retorno para el flujo de secuencia homopolar. Para tensiones de secuencia homopolar reducidas, la reluctancia que se presenta al paso del flujo por el núcleo es reducida (hasta que la tensión aplicada satura las culatas y columnas laterales) por lo que la corriente de magnetización es despreciable; en estas circunstancias la impedancia de secuencia homopolar es igual a la impedancia de secuencia directa del transformador. La impedancia homopolar expresada en % respecto de la impedancia base tiene típicamente valores de alrededor del 10% [ABB03]. El circuito equivalente es el mostrado en la figura 2.30.

#### 2.6.4.4. Transformador de núcleo trifásico acorazado

Este transformador de tipo acorazado se comportará de forma similar a un transformador con núcleo de cinco columnas. El flujo de secuencia homopolar tendrá su camino de retorno por las culatas y la impedancia de secuencia homopolar es, por tanto, igual a la impedancia de secuencia directa y de valores próximos al 10% respecto de la impedancia base.

#### 2.6.5. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR Yd

En un transformador Yd, las corrientes homopolares no pueden circular por ninguno de los dos lados del transformador y el transformador se comportará como un circuito abierto ante secuencia homopolar, independientemente del tipo de núcleo magnético.

De igual modo se comportará el transformador Dy.

#### 2.6.6. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR YNynd

El circuito equivalente ante secuencia directa (o inversa) de un transformador de tres arrollamientos se analizó en el apartado 2.5.

En este caso la corriente que debe tomar el primario del transformador es la suma de la corriente precisa para contrarrestar los amperios-vuelta del secundario, la precisa para vencer los amperios-vuelta del terciario y la necesaria para crear el flujo.

$$i_1 = i_m + \frac{N_2}{N_1} \cdot i_2 + \frac{N_3}{N_1} \cdot i_3 \quad (2.38)$$

De la ecuación (2.38) y de la ecuación (2.1) se desprende que la impedancia homopolar de un transformador YNynd con el secundario cortocircuitado y el triángulo cerrado es mucho menor que la del resto de los transformadores anteriormente analizados, al ser la corriente que toma el transformador mayor que en casos anteriores.

El orden de magnitud de la impedancia magnetizante dependerá del tipo de núcleo magnético del transformador. Así en bancos trifásicos compuestos por unidades monofásicas la impedancia magnetizante es muy elevada, por lo que su influencia es despreciable<sup>13</sup>, en transformadores de tres columnas la impedancia magnetizante es más reducida y en transformadores de cinco columnas adoptará un valor intermedio y dependiente de la tensión aplicada.

Las impedancias de cortocircuito medidas dependen del lado en el que se realiza el ensayo, así según la norma IEC 60076-8 la impedancia medida desde un arrollamiento en estrella con el otro arrollamiento en cortocircuito y el terciario cerrado tiene un valor entre el 80% y el 100% de las que se podrían obtener utilizando el circuito equivalente ante secuencia directa, esto es<sup>14, 15</sup>:

$$Z_{0123} = a_1 \left( Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) \quad (2.39)$$

$$Z_{0213} = a_2 \left( Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} \right) \quad (2.40)$$

Los valores más pequeños se tienen cuando se alimenta el arrollamiento más externo ( $a_1 < a_2$ ). Por el contrario, al alimentar el arrollamiento más interno el valor de  $a$  se aproxima más a 1.

Para el caso del circuito equivalente de secuencia homopolar la cuba puede tener cierta influencia. Algunos autores [Tle08] indican que la influencia de la cuba puede ser tenida en cuenta como un cuarto arrollamiento conectado en triángulo.

En [Kul04] se muestra la forma de calcular la impedancia homopolar de un transformador Yyd a partir de las dimensiones geométricas del transformador teniendo en cuenta la influencia de la cuba, para lo cual utilizan un procedimiento aproximado y otro más exacto:

---

<sup>13</sup>Dado que la impedancia magnetizante está en paralelo con la impedancia de dispersión.

<sup>14</sup>En la expresión (2.39), la notación  $Z_{0123}$  significa impedancia homopolar alimentando el arrollamiento más externo al núcleo (posición 1) con el arrollamiento secundario ubicado en la posición intermedia (posición 2) cortocircuitado y el arrollamiento terciario más interno (posición 3).

<sup>15</sup>En la expresión (2.40), la notación  $Z_{0213}$  significa impedancia homopolar alimentando el arrollamiento ubicado en la posición intermedia (posición 2) con el arrollamiento ubicado en la posición más externa al núcleo magnético (posición 1) en cortocircuito y el arrollamiento terciario más interno (posición 3).

1. En el procedimiento aproximado utilizan como circuito equivalente del transformador el mostrado en la figura 2.35. Las impedancias se obtienen a partir de ensayos en cortocircuito simulados. El circuito no incorpora la rama magnetizante ya que se ha despreciado la corriente requerida para crear el flujo homopolar. Para tener en cuenta la influencia de la cuba en dicho circuito, al calcular las inductancias de dispersión entre parejas de arrollamientos se ha tenido en cuenta el flujo que circula por la cuba en cada uno de los ensayos de cortocircuito.

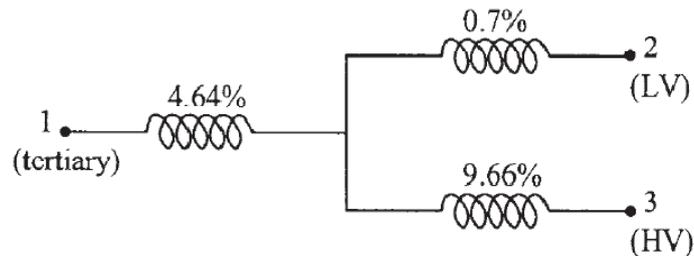


Figura 2.35. Circuito equivalente de un transformador Yy0d1 con disposición de arrollamientos Terciario-Baja-Alta (contados a partir del núcleo) teniendo en cuenta el efecto de la cuba [Kul04]

2. En el procedimiento más exacto la cuba es considerada como un cuarto arrollamiento en triángulo. También en este caso se desprecia la corriente requerida para crear el flujo homopolar. En este caso [Kul04] no proporciona un circuito equivalente, ya que el objetivo es solamente obtener la impedancia homopolar que se ofrece a la red primaria cuando el terciario está cerrado y el secundario se encuentra en cortocircuito. Para calcular la mencionada impedancia homopolar se calculan las reactancias de cortocircuito entre arrollamientos (considerando la cuba como un arrollamiento más) utilizando fórmulas clásicas de cálculo. Seguidamente se calcula la potencia reactiva (relacionada con la energía magnética almacenada en el sistema) y a partir de ella la impedancia homopolar.

## 2.7. RESUMEN DE LAS CARACTERÍSTICAS HOMOPOLARES DE LAS CONFIGURACIONES MÁS HABITUALES

En las tablas 2.1 y 2.2 se resume la topología del circuito equivalente ante secuencia homopolar de los diferentes grupos de conexión de transformadores más habituales según sea la impedancia magnetizante de valor infinito (caso de bancos de transformación, tabla 2.1) o finito (caso de transformadores de núcleo trifásico, tabla 2.2).

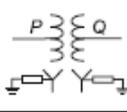
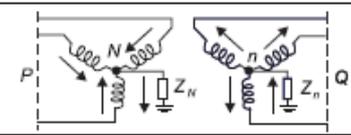
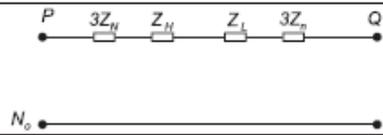
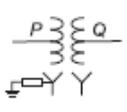
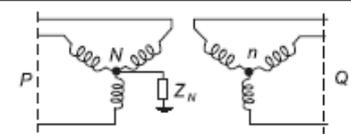
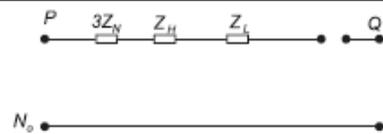
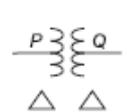
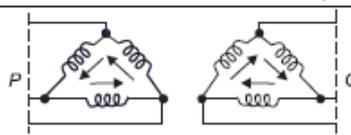
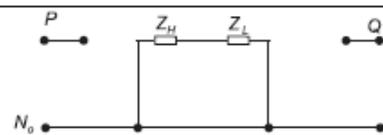
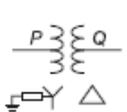
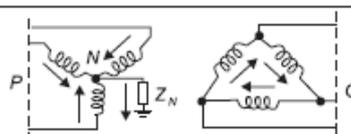
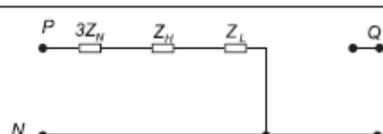
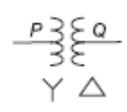
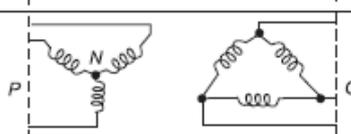
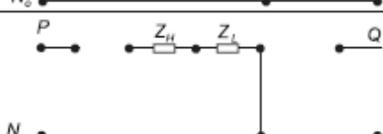
CASE	SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CIRCUITS
1			
2			
3			
4			
5			

Tabla 2.1. Circuitos equivalentes ante secuencia homopolar de un transformador con impedancia magnetizante infinita

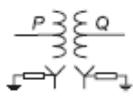
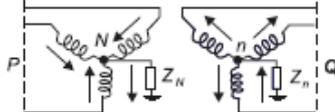
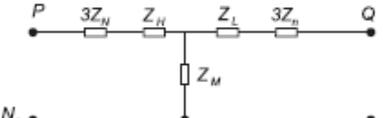
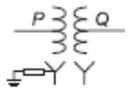
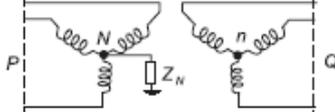
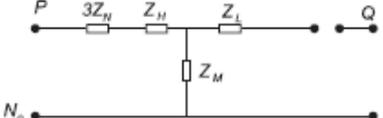
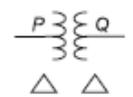
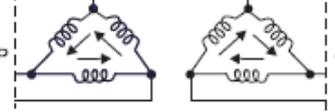
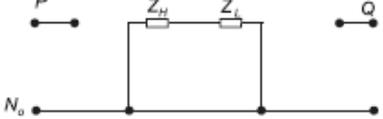
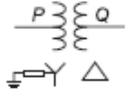
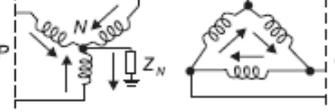
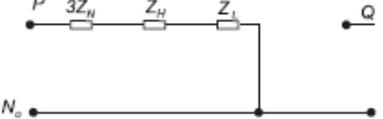
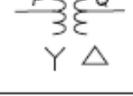
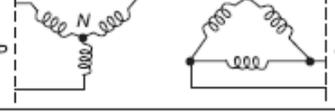
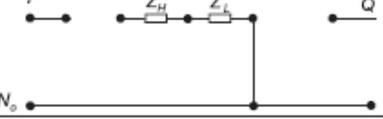
CASE	SYMBOLS	CONNECTION DIAGRAMS	ZERO-SEQUENCE EQUIVALENT CIRCUITS
1			
2			
3			
4			
5			

Tabla 2.2. Circuitos equivalentes ante secuencia homopolar de un transformador para todos los casos

La tabla 2.3 [IEC768] recoge valores típicos de impedancias homopolares de transformadores trifásicos en función del grupo de conexión, forma de puesta a tierra del neutro y tipo de núcleo magnético más habituales.

Esta tabla es válida para diseños con arrollamientos concéntricos<sup>16</sup>, aquí numerados como (1)-(2)-(3), siendo (1) el arrollamiento más externo. Los símbolos de los arrollamientos en la primera columna están descritos en el mismo orden. No importa conocer cuál es el arrollamiento de alta tensión.

La tabla indica solamente la contribución del transformador por sí mismo. Las impedancias de redes asociadas son consideradas despreciables. Esto significa que, en la representación de los diagramas homopolares, un arrollamiento secundario YN se considera como que tiene sus tres fases cortocircuitadas a tierra.

<sup>16</sup>Por tanto, no aplicable a transformadores acorazados

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

NOTAS

- $z_{12}$ ,  $z_{13}$  y  $z_{23}$  son las impedancias de secuencia directa de cortocircuito.
- $z_1 = \frac{z_{12} + z_{13} - z_{23}}{2}$ , igualmente para  $z_2$  y  $z_3$ .
- $z_1 \parallel z_2 = \frac{z_1 z_2}{z_1 + z_2}$  igualmente para  $z_1 \parallel z_3$  y  $z_2 \parallel z_3$ .
- $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son factores multiplicadores comprendidos en el rango  $0,8 < a_1 < a_2 < a_3 < 1$ .
- Los aspectos particulares de las propiedades de las impedancias homopolares se dan en los apartados 4.7.1, 4.7.2 y 4.7.3.
- Las conexiones marcadas con un asterisco (\*) indican casos donde la impedancia homopolar es una impedancia magnetizante de valor relativamente alto o muy alto, dependiendo de la naturaleza del circuito magnético.

Tabla 2.3. Valores típicos de la impedancia homopolar en función del grupo de conexión y del tipo de núcleo magnético

Lo visto hasta aquí hace referencia a transformadores de dos o más arrollamientos.

## 2.8. IMPEDANCIA HOMOPOLAR EN CONFIGURACIONES ESPECIALES DE TRANSFORMADORES

### 2.8.1. IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE AUTOTRANSFORMADORES Y AUTOTRANSFORMADORES CON TERCARIO

El autotransformador consta de una parte de arrollamiento que es compartida por los circuitos de alta y baja tensión y que, por ello, recibe el nombre de arrollamiento ‘común’. El resto de arrollamiento, que pertenece a la parte restante de los circuitos de alta tensión, es denominado como arrollamiento ‘serie’. Por tanto, a los arrollamientos del autotransformador se les suele llamar arrollamiento serie y arrollamiento común en vez de arrollamiento primario y secundario. Estos autotransformadores se encuentran principalmente entre redes de 400 kV y 220 kV.

Los autotransformadores aparecen conectados con mayor frecuencia en conexión estrella-estrella y su punto común de neutro requiere que las dos redes que se interconectan tengan la misma puesta a tierra, por lo que el autotransformador sólo será utilizable en redes con igual configuración de puesta a tierra.

A continuación se muestra una representación gráfica de un autotransformador trifásico estrella-estrella con arrollamiento terciario (figura 2.36).

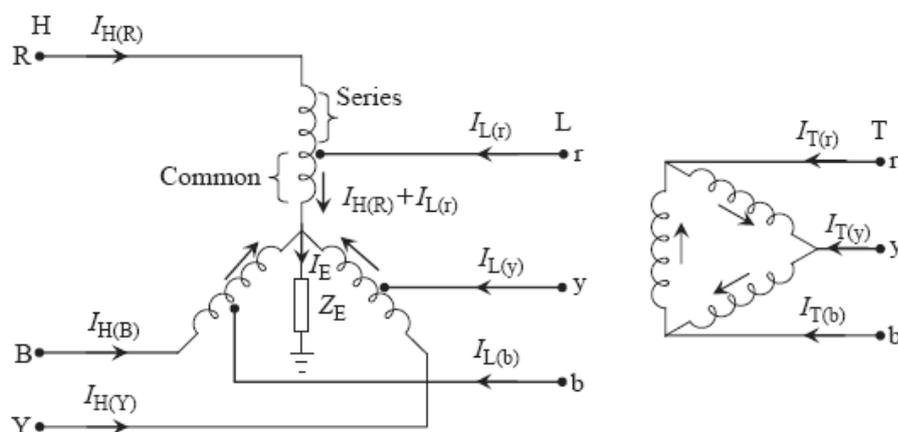


Figura 2.36. Autotransformador trifásico estrella-estrella con arrollamiento terciario en triángulo

Se denotará con S, C y T a los arrollamientos serie, común y terciario respectivamente, y se analizará el circuito equivalente homopolar del autotransformador (figura 2.37) para estudiar la magnitud que puede alcanzar la impedancia homopolar.

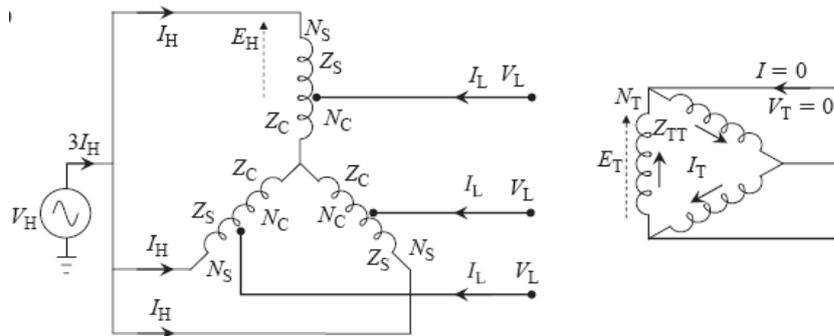


Figura 2.37. Obtención del circuito equivalente homopolar de un autotransformador estrella-estrella con arrollamiento terciario en triángulo

Podemos obtener:

$$V_H - V_L - E_H = Z_S \cdot I_H \quad (2.41)$$

$$0 - E_T = Z_{TT} \cdot I_T \quad (2.42)$$

$$N_S \cdot I_H + N_T \cdot I_T = 0 \quad (2.43)$$

$$\frac{E_H}{E_T} = \frac{N_S}{N_T} \quad (2.44)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.42), (2.43) y (2.44) en la ecuación (2.41), obtenemos:

$$V_H - I_H \cdot \left[ Z_S + \left( \frac{N_S}{N_T} \right)^2 \cdot Z_{TT} \right] = V_L \quad (2.45)$$

La impedancia homopolar es dada por:

$$Z_{0,HL} = Z_{0,LH} = Z_{S-T} = Z_S + Z_{TT}' = Z_S + \left( \frac{N_S}{N_T} \right)^2 \cdot Z_{TT} \quad (2.46)$$

Por tanto, la impedancia homopolar medida desde el lado de alta o baja tensión es la impedancia de dispersión entre los arrollamientos ‘serie’ y terciario que es la suma de la impedancia de dispersión del arrollamiento ‘serie’ y la impedancia de dispersión del arrollamiento terciario referido a las vueltas base del lado ‘serie’.

En el caso de que el autotransformador no tuviera arrollamiento terciario, la contribución de la cuba podría ser tratada como si el transformador tuviera un arrollamiento terciario virtual magnético conectado en triángulo.

## 2.8.2 TRANSFORMADORES EN ZIG-ZAG

Un transformador en zigzag (figura 2.38) se caracteriza por la interconexión de arrollamientos de diferentes fases. Los arrollamientos en zigzag tienen un 15,47% más de vueltas con respecto a los arrollamientos convencionales [Kul04] con el fin de conseguir el mismo valor de tensiones fase-línea. Por lo tanto, el transformador zigzag es más caro que el transformador convencional, por lo que se usa muy poco aunque puede resultar de utilidad en algunos casos<sup>17</sup>.

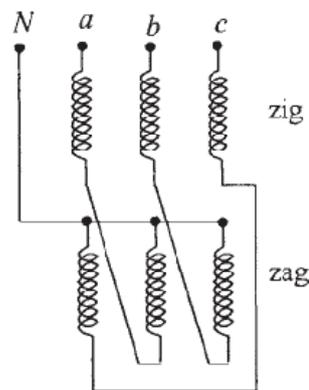


Figura 2.38. Transformador en conexión zigzag

<sup>17</sup>Como transformador de alimentación en baja tensión a usuarios que requieran tres fases más neutro en potencias menores o iguales a 160 KVA

Sin embargo, una característica muy interesante de los transformadores en zigzag es que ofrece un camino de baja impedancia para las corrientes de secuencia homopolar bajo condiciones de falta. Esto es debido a que los flujos homopolares creados por los dos semiarrollamientos de la misma columna se cancelan entre sí debido a direcciones opuestas del bobinado y a la igualdad de corrientes en los semiarrollamientos, con lo que el único flujo magnético que resulta de las corrientes de secuencia homopolar es el flujo de dispersión.

Debido a ello, algunas de sus principales características y usos son los siguientes:

1. Puede ser usado como un transformador de puesta a tierra en un sistema en el que los transformadores están conectados en triángulo o en estrella con neutro aislado (figura 2.39). Gracias al transformador en zigzag, para una falta monofásica a tierra, la corriente de secuencia homopolar fluye a tierra permitiendo al sistema de protección actuar. Las tensiones de las dos fases sanas se mantienen en sus respectivos niveles de tensión. Por lo tanto, el transformador zigzag como puesta a tierra no sólo ayuda en la protección sino que también reduce los esfuerzos de tensión ante condiciones de falta asimétrica.

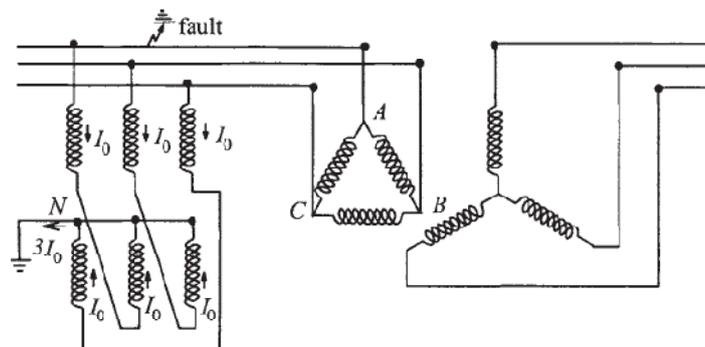


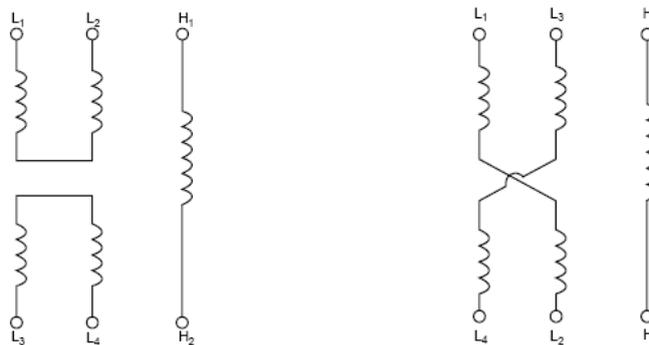
Figura 2.39. Reactancia zigzag de puesta a tierra

2. Puede ser empleado como reactancia de puesta a tierra de redes con una impedancia homopolar elevada. Debido al pequeño valor de la impedancia homopolar de la reactancia de puesta a tierra puede ser necesario limitar el valor de la corriente de falta conectando una resistencia de valor adecuado entre el neutro y tierra.

### 2.8.3. TRANSFORMADORES CON DOBLE SECUNDARIO

Un tipo especial de transformadores multidevanados son los transformadores con doble secundario. Estos transformadores se emplean, en ocasiones, cuando es necesario alimentar diferentes líneas con el fin de limitar el nivel de falta de la alimentación a la aparata de baja tensión permitiendo una economía en la aparata de alta tensión.

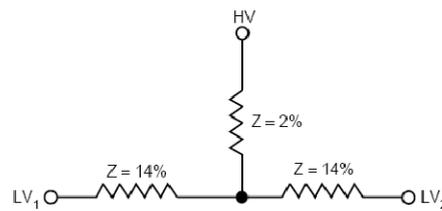
A la hora de diseñar el doble secundario de un transformador, es necesario que ambos arrollamientos de baja tensión se dispongan simétricamente con respecto al arrollamiento de alta tensión con el fin de que ambos tengan idénticas impedancias de cortocircuito respecto al lado de alta tensión. Esto puede ser llevado a cabo con cualquiera de las disposiciones mostradas en la figura 2.40.



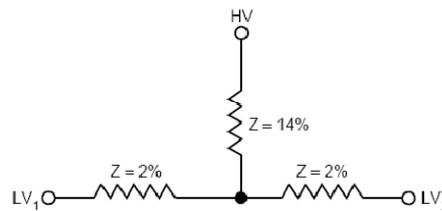
a) Secundarios débilmente acoplados      b) Secundarios fuertemente acoplados

**Figura 2.40. Transformadores con dos arrollamientos secundarios: disposición en la columna de los secundarios**

En el caso de la figura 2.40 a) el acoplamiento entre los arrollamientos secundarios es débil, con lo que la impedancia de dispersión entre  $LV_1$  y  $LV_2$  es mayor que en el caso de la figura 2.40 b) [J&P98]. Los circuitos equivalentes de cada una de estas disposiciones se muestran en la figura 2.41 a) y 2.41 b), en las que el transformador es representado por una red de tres ramas. Los valores mostrados son valores típicos de impedancias de dispersión en este caso [J&P98].



a) Arrollamientos de baja tensión débilmente acoplados

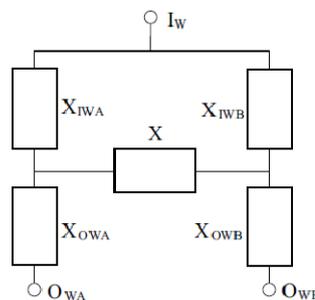


b) Arrollamientos de baja tensión fuertemente acoplados

**Figura 2.41. Circuitos equivalentes de transformadores con doble secundario para cada uno de los dos casos mostrados anteriormente**

En el ejemplo mostrado, para ambas disposiciones la impedancia HV/LV es del 16%, sin embargo para el transformador representado en la figura 2.41 a) la impedancia entre  $LV_1$  y  $LV_2$  es alrededor del 28% mientras que para el transformador representado en la figura 2.41 b) es de sólo el 4%. La elección de cuál de las dos disposiciones se debe emplear depende de las limitaciones impuestas por el sistema de baja tensión.

No obstante, el circuito equivalente en estrella mostrado en la figura 2.41 no proporciona suficiente precisión en el caso de que los arrollamientos secundarios ocupen cada uno la mitad de la columna, debido a la gran componente radial del flujo de dispersión [Stu00]. En ese caso es preferible utilizar un circuito equivalente como el mostrado en la figura 2.42.



**Figura 2.42. Representación en H de un transformador**

En el caso de que tanto el arrollamiento primario como los dos secundarios estén conectados en estrella es frecuente disponer de un terciario de compensación en D. El arrollamiento terciario puede ser único (ocupando toda la altura de la columna) o doble (ocupando cada arrollamiento la mitad de la altura de la columna). Como es sabido, para el cálculo de las corrientes de falta monofásica es preciso disponer del circuito equivalente ante secuencia homopolar del transformador. Aunque existen circuitos equivalentes para transformadores de cuatro arrollamientos (figura 2.43 [Stu00] y figura 2.44 [Sta33]), la complejidad de la topología de estos circuitos y de la obtención de parámetros de los mismos, hacen que no sean utilizados de forma frecuente. Por esta razón, algunos autores realizan el cálculo de las corrientes durante los cortocircuitos asimétricos mediante métodos matriciales, a partir de las inductancias propias y mutuas de los diferentes arrollamientos [Kum07] [Xie07] [Bra82] [Pro82].

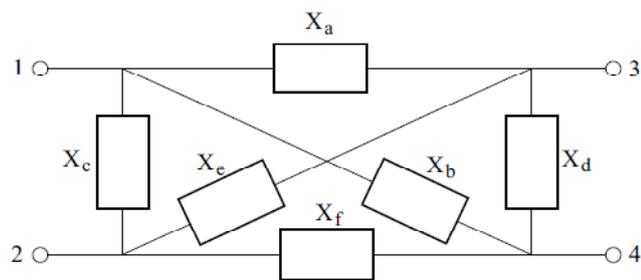


Figura 2.43. Circuito equivalente para un transformador con cuatro arrollamientos

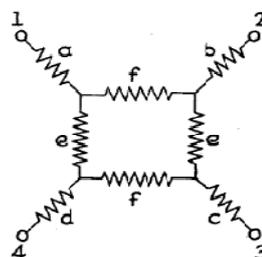


Figura 2.44. Circuito equivalente general para un transformador de cuatro arrollamientos

## 2.9. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR DE UN TRANSFORMADOR

### 2.9.1. INFLUENCIA DE LA UBICACIÓN DE LOS ARROLLAMIENTOS

En general<sup>18</sup> la impedancia de secuencia homopolar depende de la ubicación de los arrollamientos. Este hecho, que ya se justifica en el apartado 2.6.1, es debido a que el flujo de dispersión del arrollamiento interno cierra su camino por el núcleo magnético mientras que el flujo disperso del arrollamiento externo cierra su camino por la cuba.

En [Kul04] se analiza el valor de la impedancia homopolar de un transformador de dos arrollamientos estrella-triángulo bajo la hipótesis de despreciar la corriente magnetizante precisa para crear el flujo homopolar. Para tener en cuenta el efecto de la cuba, el transformador se puede tratar como un transformador de tres arrollamientos Ydd. Si el arrollamiento conectado en triángulo es exterior, el arrollamiento en triángulo actúa como un escudo y no fluye corriente en la cuba, por lo que la impedancia de secuencia homopolar es aproximadamente igual a la impedancia de secuencia directa<sup>19</sup>. Sin embargo, si el arrollamiento en estrella es el exterior, al aplicar una tensión de secuencia homopolar al arrollamiento en estrella circulan corrientes tanto por el arrollamiento en triángulo como por la cuba, con lo que a igualdad de tensión aplicada el arrollamiento en estrella debe tomar más corriente de la red<sup>20</sup> y, por tanto, la impedancia de secuencia homopolar es menor que en el caso precedente (por tanto menor a la impedancia de secuencia directa).

---

<sup>18</sup>Salvo en el caso de transformadores de flujos libres de dos arrollamientos.

<sup>19</sup>En realidad frecuentemente es un poco mayor debido a la caída de tensión en la barra que forma el neutro del transformador [Kul04] que hace que para una tensión aplicada determinada el flujo homopolar sea un poco menor al que se tendría si esa caída de tensión fuera nula.

<sup>20</sup>La precisa para vencer los amperios-vuelta del arrollamiento en triángulo y los correspondientes a las corrientes que circulan por la cuba.

En transformadores de tres arrollamientos una de las impedancias del circuito equivalente puede ser negativa (la correspondiente al arrollamiento situado en el centro [deL09]), con lo que el valor de las impedancias del circuito equivalente es diferente según el terciario sea el arrollamiento más interno, sea el arrollamiento más externo o esté situado entre el arrollamiento de AT y el de regulación (figuras 2.45 y 2.46<sup>21</sup>).

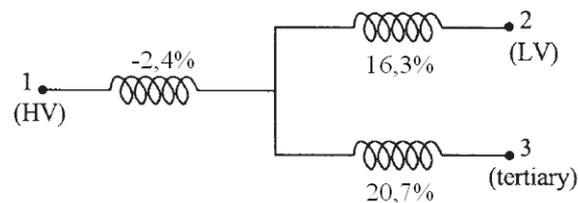


Figura 2.45. Impedancias del circuito equivalente ante secuencia directa de un transformador Yyd 50MVA, 132/21/9,5 kV con disposición de arrollamientos BATR<sup>22</sup>

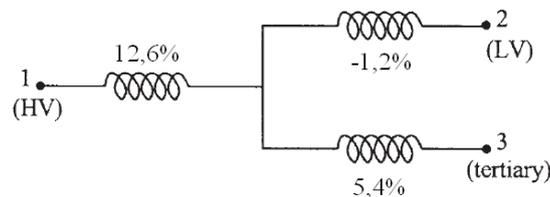


Figura 2.46. Impedancias del circuito equivalente ante secuencia directa de un transformador Yyd 30MVA, 132/16,05/10 kV con disposición de arrollamientos TBAR<sup>23</sup>

## 2.9.2. INFLUENCIA DE LA CUBA

La cuba influye en la impedancia de secuencia homopolar de dos formas:

1. Proporciona un camino de retorno de baja reluctancia (en comparación con el aire) para el flujo de secuencia homopolar, que tiene el efecto de aumentar la impedancia magnetizante (y por tanto la impedancia total).
2. Por el contrario, la cuba que encierra las 3 fases actúa como un arrollamiento cortocircuitado reduciendo la impedancia.

El último efecto es dominante (especialmente en grandes transformadores [Chr65]) y, por lo tanto, la impedancia de secuencia homopolar dentro de una cuba es sensiblemente inferior que la impedancia fuera de ella.

<sup>21</sup>En realidad, las impedancias de la figura 2.46 corresponden a impedancias de secuencia directa de transformadores reales, no obstante la idea sigue siendo válida para la impedancia homopolar.

<sup>22</sup>BATR corresponde a una disposición de arrollamientos (de dentro a fuera): Baja-Alta-Terciario-Regulación.

<sup>23</sup>TBAR corresponde a una disposición de arrollamientos (de dentro a fuera): Terciario-Baja-Alta-Regulación.

La influencia de estos factores queda patente en un ejemplo, reportado en [ABB03]<sup>24</sup>, en el que se muestra la diferencia en magnitud entre las impedancias homopolares medidas en tres casos diferentes: con el transformador en su cuba pero sin pantallas magnéticas, con el transformador fuera de su cuba y con el transformador en su cuba equipada con pantallas magnéticas. Si consideramos como caso de referencia el del transformador fuera de su cuba, el caso del transformador en su cuba y con pantallas magnéticas es un ejemplo de la influencia del primero de los factores mencionados (la reluctancia del camino de cierre del flujo), mientras que el caso del transformador en su cuba sin pantallas magnéticas es un ejemplo de la influencia del segundo de los factores mencionados (reducción de la impedancia debida a las corrientes que circulan por la cuba).

Las impedancias de secuencia homopolar para el caso base (transformador fuera de la cuba) dieron los siguientes resultados (siendo  $z_{012}$  impedancia de secuencia homopolar de cortocircuito y  $z_{013}$ ,  $z_{023}$  impedancias de secuencia homopolar a circuito abierto):

$$\begin{aligned}z_{012} &= 11,5\% \\z_{013} &= 97,0\% \\z_{023} &= 109,0\%\end{aligned}$$

Las medidas de la impedancia de secuencia homopolar realizadas dentro de la cuba con pantallas magnéticas dieron los siguientes resultados:

$$\begin{aligned}z_{012} &= 12,1\% \\z_{013} &= 109,0\% \\z_{023} &= 116,0\%\end{aligned}$$

Como se puede ver, las impedancias de secuencia homopolar medidas con el transformador dentro de su cuba equipada con pantallas magnéticas son mayores que las obtenidas sin cuba.

Esto es debido a que las pantallas magnéticas reducen la reluctancia presentada al paso del flujo y, consecuentemente, la corriente magnetizante necesaria para crear dicho flujo, lo que a su vez incrementa la impedancia.

---

<sup>24</sup>Estas medidas se realizaron sobre un transformador trifásico de 100 MVA,  $259,05 \pm 15\%/55\text{KV}$  con conexión YNyn0.

Las medidas realizadas dentro de la cuba sin pantallas magnéticas arrojaron los siguientes resultados:

$z_{012}=10,45\%$  ensayo realizado a  $U=5208\text{ V}$ ,  $I=I_N=229,4\text{ A}$

$z_{013}=55,4\%$  ensayo realizado a  $U=9320\text{ V}$  (6,23%),  $I=0,3I_N=74,3\text{ A}$  (55,4%)

$z_{023}=69\%$  ensayo realizado a  $U=3212\text{ A}$  (10,12%),  $I=0,3I_N=350\text{ A}$  (69%)

Se puede observar cómo las impedancias de secuencia homopolar medidas dentro de la cuba (especialmente las impedancias a circuito abierto) son menores que las obtenidas fuera de la cuba, ya que como se ha mencionado, la cuba actúa como un arrollamiento cortocircuitado reduciendo la impedancia.

Debido a los dos efectos antagónicos mencionados, se puede encontrar una diferencia entre transformadores construidos con cubas onduladas de chapa delgada de acero y los construidos con cubas planas de chapa gruesa.

Para transformadores de cubas de chapa gruesa, la impedancia homopolar por unidad es, en general, del orden de 0,25 a 1 cuando la corriente del neutro  $3xI^0$  es igual a la corriente asignada de los arrollamientos [IEC768]. La figura 2.47 muestra la variación general de la impedancia con la corriente.

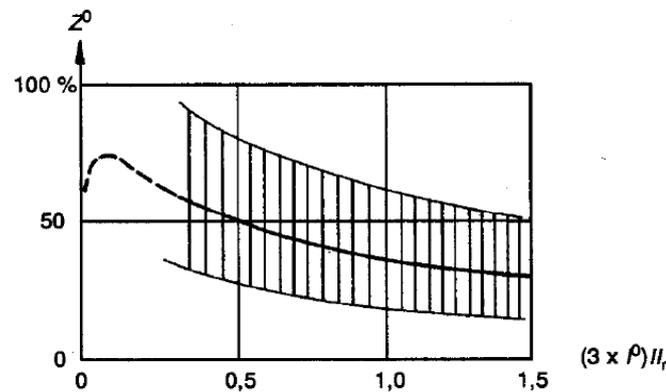


Figura 2.47. Variación de la impedancia magnetizante homopolar en función de la corriente en un transformador de tres columnas sin arrollamiento conectado en triángulo

### **2.9.3. INFLUENCIA DE LA EXISTENCIA DE PANTALLAS MAGNÉTICAS EN LA CUBA**

Un transformador que dispone de pantallas magnéticas adosadas a la cuba presenta una impedancia de secuencia homopolar comparativamente más elevada que uno que no tenga dichas pantallas [Chr65], ya que el efecto de estas pantallas es reducir la reluctancia que se presenta al paso del flujo homopolar y con ello reducir la corriente magnetizante precisa para crear el flujo homopolar para un valor de la tensión homopolar dado.

El ejemplo expuesto más arriba ilustra este aspecto.

## **2.10. ALTERNATIVAS AL CIRCUITO EQUIVALENTE ANTE SECUENCIA HOMOPOLAR CONVENCIONAL**

El circuito equivalente de un transformador de tres arrollamientos se muestra en el apartado 2.5. En un transformador de tres arrollamientos una de las reactancias del circuito equivalente puede ser negativa y ello hace que el modelo de circuito sea inestable en el dominio del tiempo. [Hen01] presenta varias alternativas para evitar este problema modificando el circuito típico del transformador.

La selección entre un circuito u otro dependerá de los datos geométricos de los que se disponga para el transformador.

La principal diferencia entre las alternativas propuestas recaerá en la localización de la rama magnetizante y tendrá una influencia significativa cuando el transformador se encuentre en estado de saturación.

A continuación, se muestran varios de los modelos que han sido descritos hasta el momento.

$L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  son determinadas a partir de los valores medidos y la numeración de los arrollamientos se realizó de tal manera que  $L_1$  y  $L_3$  correspondieran a valores mayores (o iguales) que  $L_2$ .

La elección entre los diferentes modelos propuestos dependerá del valor que adquiera  $L_2$  así como de los datos geométricos adicionales de los que se disponga acerca del transformador.

**MODELO A** (Figura 2.48). El circuito mostrado resulta apropiado para valores positivos de  $L_2$ . En este caso, el modelo convencional representa una red pasiva en la que todas las reactancias son positivas.

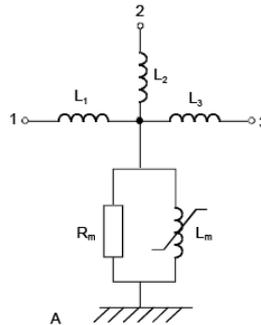


Figura 2.48. Modelo convencional

**MODELO B** (Figura 2.49). El valor de  $L_2$  es negativo y la ubicación de los arrollamientos es desconocida o se conoce que el arrollamiento 2 no corresponde al arrollamiento central. Este circuito se emplea cuando los datos geométricos muestran que la inductancia negativa corresponde al arrollamiento central pero no se corresponde con los resultados dados por los valores medidos, ya que este modelo no tiene en cuenta los datos geométricos.

La reactancia serie será seleccionada de manera que sea mayor que el valor absoluto de la conexión paralela de  $L_2$  y menor que  $L_1$  y  $L_3$ .

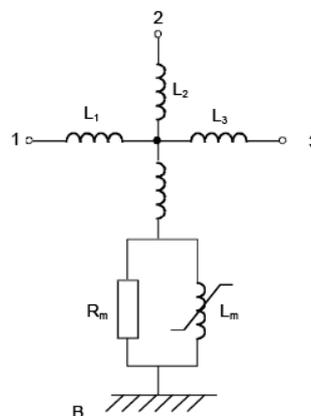


Figura 2.49. Rama magnetizante con inductancia serie

**MODELO C** (Figura 2.50). Este modelo es aplicable bajo las mismas condiciones que el modelo B, y es a menudo seleccionado ya que es más fácil de implementar con la existencia de programas que incluyen el modelo convencional del transformador.

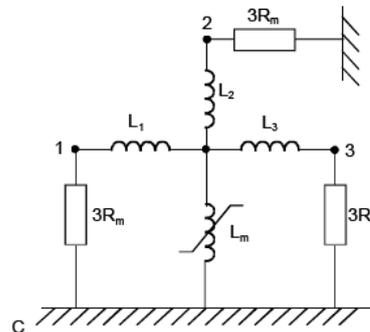


Figura 2.50. Pérdidas magnetizantes representadas por resistencias conectadas a los terminales

**MODELO D** (Figura 2.51). Este circuito se emplea para valores negativos de  $L_2$ , además de tener conocimiento de la posición de los arrollamientos y de saber con exactitud que el arrollamiento 2 corresponde al arrollamiento central.

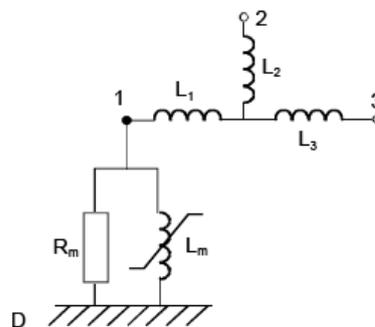


Figura 2.51. Rama magnetizante conectada al terminal del devanado interno

**MODELO E** (Figura 2.52). Para valores negativos de  $L_2$  y aquellos casos en los que se conocen las distancias entre los arrollamientos y además los valores de  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  están en concordancia con los obtenidos a partir de datos geométricos.

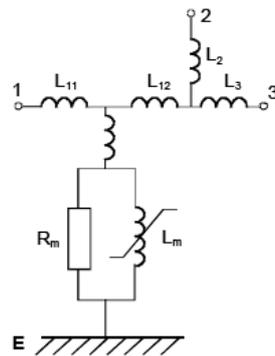


Figura 2.52. Modelo a partir de datos geométricos

Oels [Oel68] proporciona un circuito equivalente que es capaz de representar el comportamiento de un transformador Yd con el arrollamiento terciario tanto si el arrollamiento terciario se encuentra a circuito abierto como si el arrollamiento terciario está cerrado (figura 2.53).

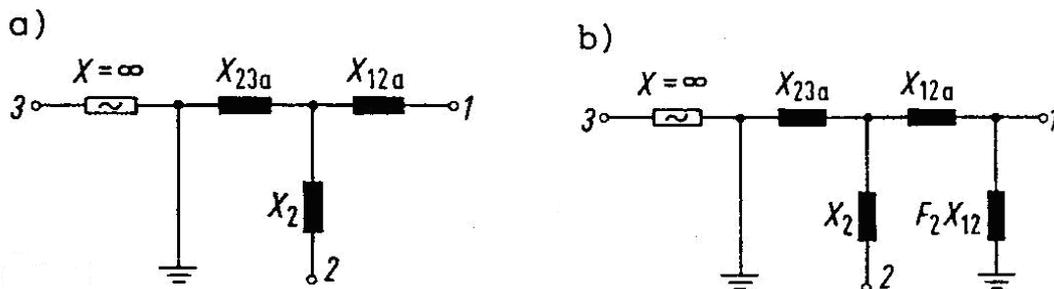


Figura 2.53. Circuito equivalente propuesto por Oels para un transformador Yd

a) Caso de núcleo acorazado b) Caso de núcleo trifásico de columnas

# Capítulo 3

## DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR A PARTIR DE LAS DIMENSIONES GEOMÉTRICAS

### 3.1. MÉTODOS DESCRITOS EN LA LITERATURA

Algunos autores muestran la forma de determinar la impedancia homopolar a partir de las dimensiones geométricas del transformador, que serán los primeros datos de los que se dispondrá acerca de la máquina y los cuales permitirán tener un valor de referencia relativo a la impedancia homopolar antes de llevarse a cabo los correspondientes ensayos.

El procedimiento analizado [Kul04] se expone a continuación. En primer lugar, se muestra la forma de calcular la impedancia de secuencia directa y seguidamente se aplican los principios mostrados para calcular la impedancia ante secuencia homopolar.

### **Determinación de la impedancia de secuencia directa**

El transformador es una estructura electromagnética tridimensional en la que las líneas de flujo disperso son apreciablemente diferentes en la sección transversal de la ventana del núcleo (figura 3.1 (a)) comparadas con su valor en la sección transversal perpendicular a la ventana del núcleo (figura 3.1 (b)).

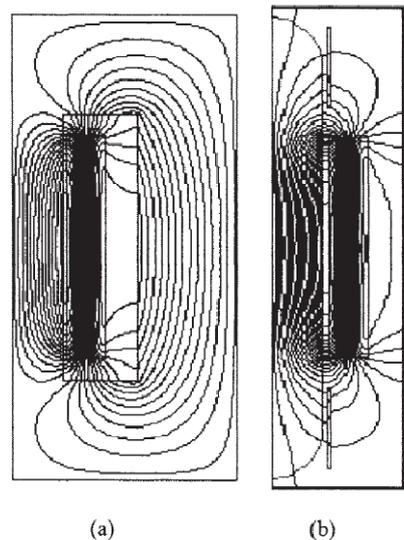


Figura 3.1. Líneas de flujo disperso en un transformador

Sin embargo, para llevar a cabo los cálculos de impedancias, los valores estimados se pueden considerar razonablemente cercanos a los valores ensayados, considerando sólo la sección transversal de la ventana del núcleo.

Las líneas de flujo disperso son predominantemente axiales en aquellos casos en los que los amperios-vuelta están equilibrados a lo largo del arrollamiento de alta tensión y el arrollamiento de baja tensión (considerando alturas iguales), excepto en los extremos del arrollamiento, donde aparecen franjas, ya que las líneas de flujo disperso encuentran un camino más corto para retornar ya sea por las columnas o la culata. El patrón típico que siguen las líneas de flujo disperso mostrado en la figura 3.1 (a) puede ser reemplazado por líneas de flujo paralelo de igual altura, tal como se muestra en la figura 3.2 (a).

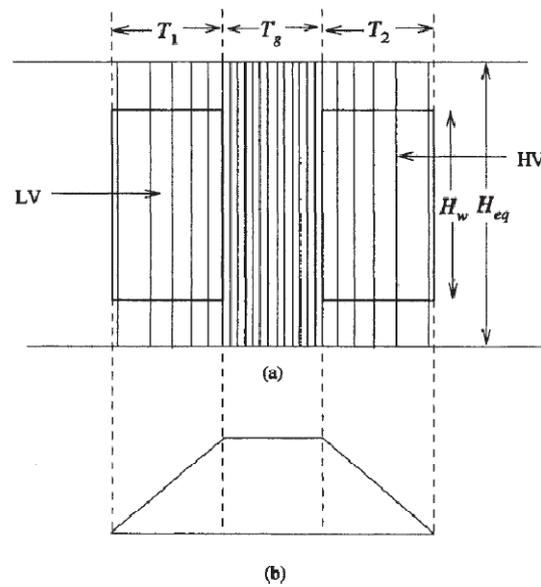


Figura 3.2. (a) Líneas de flujo disperso de altura equivalente (b) Diagrama de densidad de flujo o fuerza magnetomotriz

La altura equivalente designada como  $H_{eq}$  se obtiene dividiendo la altura del arrollamiento ( $H_w$ ) por un factor denominado factor de Rogowski  $K_R (< 1)$  que será definido más adelante.

$$H_{eq} = \frac{H_w}{K_R} \quad (3.1)$$

La distribución de la fuerza magnetomotriz en los arrollamientos a través de la sección transversal sigue una forma trapezoidal tal como se puede ver en la figura 3.2 (b). La fuerza magnetomotriz en cualquier punto depende de los amperios-vuelta que encierran las líneas de flujo en ese punto, y aumenta linealmente con los amperios-vuelta desde un valor igual a cero en el diámetro interno del arrollamiento de baja tensión hasta el diámetro externo del mismo arrollamiento donde alcanza su máximo valor<sup>25</sup>. En el espacio situado entre arrollamientos, dado que las líneas de flujo en cualquier punto encierran todos los amperios-vuelta del arrollamiento de baja tensión o el arrollamiento de alta tensión, la fuerza magnetomotriz es de valor constante. Esta fuerza magnetomotriz empieza a disminuir linealmente desde el diámetro interno del arrollamiento de alta tensión donde sigue alcanzando el valor máximo hasta el diámetro externo de dicho arrollamiento donde se aproxima de nuevo a cero.

<sup>25</sup>Suponiendo que el arrollamiento de baja tensión es el situado más internamente respecto a la cuba y el arrollamiento de alta tensión el situado más externamente, tal como se muestra en el ejemplo que se está desarrollando.

Se admite la suposición de considerar el núcleo como un elemento con permeabilidad infinita por lo que las fuerzas magnetomotrices del arrollamiento primario y el arrollamiento secundario se equilibran entre sí. La distribución de densidad de flujo será de la misma forma que la distribución de la fuerza magnetomotriz.

Debido a que se considera que el núcleo tiene reluctancia cero, para las líneas de flujo situadas a una distancia “x” del diámetro interno del arrollamiento de baja tensión, se cumple:

$$B_x = \frac{\mu_0(NI)_x}{H_{eq}} \quad (3.2)$$

Para obtener la fórmula de aplicación al cálculo de la impedancia de secuencia directa, se considerará una expresión general que muestre las relaciones entre las líneas de flujo para una porción de flujo de espesor radial R y altura  $H_{eq}$ .

Los amperios-vuelta encerrados por estas líneas de flujo disperso en el diámetro interno (ID) y en el diámetro externo (OD) serán  $a(NI)$  y  $b(NI)$  respectivamente, como se muestra en la figura 3.3, donde NI son los amperios-vuelta correspondientes.

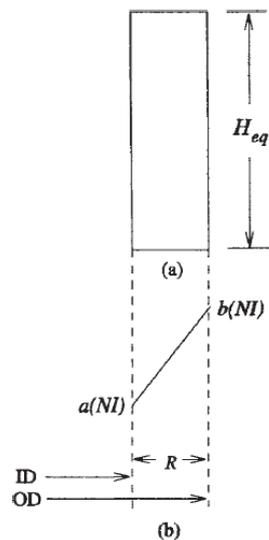


Figura 3.3. (a) Porción de flujo considerada (b) diagrama de la fuerza magnetomotriz

Esta expresión general es útil cuando un arrollamiento se divide radialmente en una serie de secciones separadas por espacios.

A partir de la ecuación 3.3, se puede deducir el valor eficaz de la densidad de flujo a una distancia “x” desde el ID de esta porción de flujo.

$$B_x = \frac{\mu_0}{H_{eq}} \left[ \left( a + \frac{b-a}{R} x \right) NI \right] \quad (3.3)$$

El número de enlaces de flujo de un diferencial de esta porción de flujo, de anchura “dx” a una distancia “x” es:

$$d\psi = N_x \phi_x = N_x B_x \quad (3.4)$$

En este caso, “A” es el área de la porción de flujo considerada.

$$A = \pi(ID + 2x)dx \quad (3.5)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.3) y (3.5) en la ecuación (3.4), integrando y realizando las oportunas operaciones aritméticas, se obtiene que el número de enlaces de flujo total viene dado por:

$$\psi = \frac{\mu_0 \pi N^2 I R}{H_{eq}} \frac{1}{3} \left[ (a^2 + ab + b^2)ID + \frac{(a^2 + ab + b^2)3R}{2} - \frac{2a^2 + ab}{2} R \right] \quad (3.6)$$

El último término entre paréntesis puede ser despreciado sin que esto arroje un error apreciable para llegar a una fórmula de uso regular en el diseño.

$$\psi = \frac{\mu_0 \pi N^2 I R}{H_{eq}} \frac{1}{3} (a^2 + ab + b^2) \left[ ID + \frac{3R}{2} \right] \quad (3.7)$$

El término  $\left[ ID + \frac{3R}{2} \right]$  puede ser considerado aproximadamente igual al diámetro medio ( $D_m$ ) de la porción de flujo considerado (esto es admisible, principalmente, para arrollamientos que tienen valores de diámetros comparativamente más grandes que los valores de sus espesores radiales).

$$\psi = \frac{\mu_0 \pi N^2 I R}{H_{eq}} \frac{1}{3} (a^2 + ab + b^2) D_m \quad (3.8)$$

Se considerará:

$$ATD = \frac{R}{3} (a^2 + ab + b^2) D_m \quad (3.9)$$

que corresponde al área del Diagrama Amperios-Vuelta.

La inductancia de dispersión de un transformador con “n” porciones de flujo podrá definirse del siguiente modo:

$$L = \frac{\sum_{K=1}^n \psi}{I} = \frac{\mu_0 \pi N^2}{H_{eq}} \sum_{K=1}^n ATD \quad (3.10)$$

Y, en consecuencia, la expresión dada para la reactancia de dispersión X será:

$$X = 2\pi f \frac{\mu_0 \pi N^2}{H_{eq}} \sum_{K=1}^n ATD \quad (3.11)$$

La reactancia de dispersión porcentual vendrá dada por:

$$\%X = \frac{X}{Z_b} = \frac{IX}{V} 100 = 2\pi f \frac{\mu_0 \pi N^2 I}{H_{eq} V} \sum_{K=1}^n ATD \cdot 100 = 2\pi f \frac{\mu_0 \pi (NI)}{H_{eq} (V/N)} \sum_{K=1}^n ATD \cdot 100 \quad (3.12)$$

donde V es la tensión nominal y el término (V/N) son los voltios/vuelta del transformador.

Sustituyendo  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  y ajustando las constantes para que las dimensiones usadas en la fórmula estén en unidades de centímetros ( $H_{eq}$  en cm y  $\sum ATD$  en  $\text{cm}^2$ ), resulta:

$$\%X = 2,48 \cdot 10^{-5} f \frac{(\text{AmperiosVuelta})}{H_{eq} (\text{Voltios/Vuelta})} \sum_{K=1}^n ATD \quad (3.13)$$

Si aplicamos esta fórmula para el caso simple de un transformador de dos arrollamientos, como se muestra en la figura 3.2, siendo  $D_1$ ,  $D_g$  y  $D_2$  los diámetros medios y  $T_1$ ,  $T_g$  y  $T_2$  los espesores radiales del arrollamiento de baja tensión, el entrehierro y el arrollamiento de alta tensión respectivamente, se obtiene:

$$\sum ATD = \frac{1}{3}(T_1 D_1) + (T_g D_g) + \frac{1}{3}(T_2 D_2) \quad (3.14)$$

Finalmente, el factor de Rogowski citado con anterioridad, requerido para el cálculo de la altura equivalente  $H_{eq}$ , viene dado por:

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{-\pi H_w / (T_1 + T_g + T_2)}}{\pi H_w / (T_1 + T_g + T_2)} \quad (3.15)$$

### **Determinación de la impedancia de secuencia homopolar**

La fórmula (3.13), derivada del razonamiento expuesto anteriormente, será aplicable para calcular la reactancia homopolar a circuito abierto.

Para un núcleo trifásico de 3 columnas, dado que los flujos en las tres ramas van en la misma dirección, estos tienen que retornar a través de un camino exterior al núcleo. En este caso, cuando la tensión de secuencia homopolar es aplicada a un arrollamiento conectado en estrella, las corrientes fluyen en el arrollamiento conectado en triángulo (si existiera un tercer arrollamiento) y la cuba, que actúa como un arrollamiento en triángulo equivalente.

De este modo, la reactancia entre el arrollamiento excitado y la cuba puede calcularse según la metodología descrita anteriormente con la cuba representada como un arrollamiento equivalente (ficticio) con espesor radial cero ya que la contribución de la cuba al diagrama amperios-vuelta puede ser despreciada debido a su pequeño espesor. La distancia entre el arrollamiento excitado y la cuba podrá ser tomada como una distancia media equivalente.

Por lo tanto, en este caso la reactancia de secuencia homopolar puede ser calculada empleando la siguiente ecuación:

$$\%X_0 = 2,48 \cdot 10^{-5} f \frac{(\text{AmperiosVuelta})}{H_{eq} (\text{Voltios/Vuelta})} \sum_{K=1}^n ATD \quad (3.16)$$

Definiéndose el sumatorio de ATD del siguiente modo:

$$\sum_{K=1}^n ATD = \frac{1}{3} T_w D_w + T_g D_g \quad (3.17)$$

Donde:

$T_w$  = espesor radial del arrollamiento excitado en cm

$D_w$  = diámetro medio del arrollamiento excitado en cm

$T_g$  = espacio entre el arrollamiento excitado y la cuba en cm

$D_g$  = diámetro medio entre el arrollamiento excitado y la cuba en cm

La metodología para calcular la reactancia de secuencia homopolar de cortocircuito a partir de las ecuaciones (3.13) y (3.16) es mostrada en el siguiente apartado de ejemplos de cálculo.

## 3.2. EJEMPLOS DE CÁLCULO

Se realizará el cálculo desprendido del razonamiento anterior para la determinación de la impedancia homopolar a partir de las dimensiones geométricas, sobre un transformador 45/16,05 kV de potencia 25 MVA.

De acuerdo con las conclusiones extraídas de la metodología expuesta, se muestra dicho cálculo aplicando para ello las ecuaciones (3.16) y (3.17), y (3.13) y (3.14), según corresponda en cada caso.

Se realizará el cálculo considerando los siguientes casos:

**Caso 1.** Cálculo de la impedancia homopolar porcentual considerando el arrollamiento de alta tensión como el arrollamiento excitado y el resto de los arrollamientos a circuito abierto

**Caso 2.** Cálculo de la impedancia homopolar porcentual considerando el arrollamiento de baja tensión como el arrollamiento excitado y el resto de los arrollamientos a circuito abierto

**Caso 3.** Cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de AT con el terciario cerrado y el lado de BT a circuito abierto

**Caso 4.** Cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de BT con el terciario cerrado y el lado de AT a circuito abierto

**Caso 5.** Cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de AT con el lado de BT cortocircuitado y el terciario abierto

**Caso 6.** Cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de BT con el lado de AT cortocircuitado y el terciario abierto

**Caso 7.** Cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de AT con el lado de BT cortocircuitado y el terciario cerrado

**Caso 8.** Cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de BT con el lado de AT cortocircuitado y el terciario cerrado

A continuación se muestran los datos técnicos del transformador necesarios para llevar a cabo este cálculo.

### Datos técnicos generales

<b>Tensión Nominal:</b>	
Tensión Nominal AT (toma central) (kV)	45
Tensión Nominal AT (toma máxima) (kV)	51,3
Tensión Nominal AT (toma mínima) (kV)	38,7
Número de Tomas / Margen de Regulación	$\pm 10 / \pm 10 \times 1,4\%$
Tensión Nominal BT (kV)	16,05
Tensión Nominal TER (kV)	10
<b>Corrientes Nominales:</b>	
Corriente Nominal AT (toma central) (A)	320,8
Corriente Nominal AT (toma máxima) (A)	281,4
Corriente Nominal AT (toma mínima) (A)	373,0
Corriente Nominal BT (A)	899,3
Corriente Nominal TER (A)	480,9

Tabla 3.1. Tensiones y corrientes nominales para el transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA

### Dimensiones del núcleo magnético

<b>NÚCLEO MAGNÉTICO (DIMENSIONES):</b>	
<b>“Ventana” Magnética (esquema):</b>	
Altura de la culata (mm)	479
Altura de la “Ventana” (mm)	1426
Anchura de las columnas (mm)	479
Distancia entre columnas (mm)	989 (entre ejes)
<b>Sección transversal Magnética (esquema):</b>	
Diámetro (mm)	479
Sección transversal de la columna (cm <sup>2</sup> )	1602,1
Sección transversal de la culata (cm <sup>2</sup> )	1602,1
Alturas de los apilamientos (mm)	14,2; 14,2; 17,7; 15,9; 17,7; 21,3; 28,4; 19,5; 62,9

Tabla 3.2. Dimensiones del núcleo magnético para el transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA

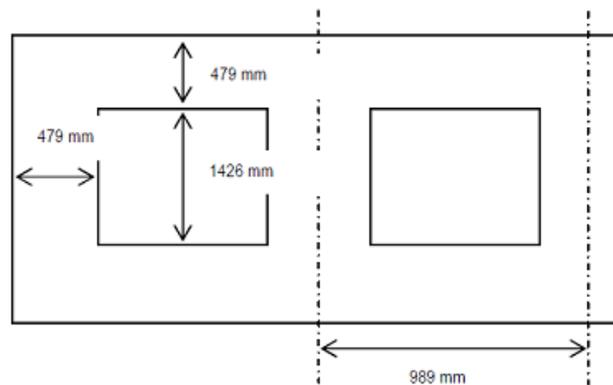


Figura 3.4. Esquema con las dimensiones geométricas del núcleo magnético para el transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA

### Tipología de los arrollamientos

ARROLLAMIENTOS:	TER	BT	AT	Reg-AT
<b>Tipología:</b>				
Tipo de arrollamiento	Capas	Discos	Discos	Multisalida
Anillo estático final	-	Sí	Sí	-
Número de vueltas	164	152	426	± 60

Tabla 3.3. Tipología de los arrollamientos para el transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA

### Posición relativa y dimensiones de los arrollamientos

ARROLLAMIENTOS (Posición relativa y dimensiones):	TER	BT	AT	Reg-AT
Diámetro interno (mm)	509	565	755	946
Espesor radial (mm)	10,0	70,0	69,5	10,0
Espesor radial de los conductores (mm)	10,0	23,3	3,3	10,0
Distancia a la culata superior (mm)	119	99	99	116
Distancia a la culata inferior (mm)	114	94	94	111
Altura mecánica de los arrollamientos (mm)	1193	1233	1233	1199
Altura eléctrica de los arrollamientos (mm)	1185	1233	1233	1007
Paso	-	104	-	-

Tabla 3.4. Dimensiones y posiciones relativas de los arrollamientos para el transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA

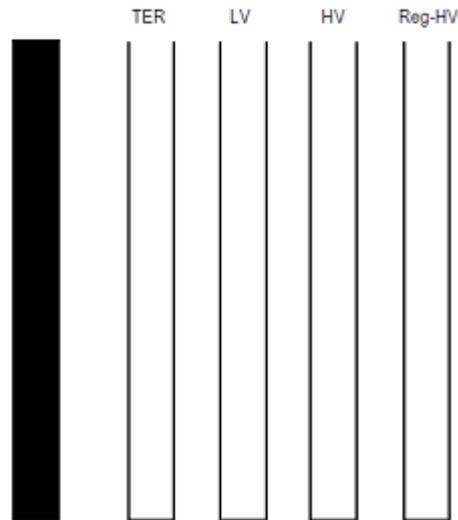


Figura 3.5. Disposición de los arrollamientos respecto de la cuba para el transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA

### Caso 1. Cálculo de la impedancia homopolar porcentual considerando el arrollamiento de alta tensión como el arrollamiento excitado y el resto de los arrollamientos a circuito abierto

De la tabla 3.4, se obtiene el espesor radial del arrollamiento excitado ( $T_{wAT}$ ), en este caso el arrollamiento de alta tensión, y el diámetro interno del arrollamiento excitado ( $D_{intAT}$ ) que permitirá el cálculo del correspondiente diámetro medio.

$$T_{wAT} = 69,5 \text{ mm} = 6,95 \text{ cm}$$

Dado que el diámetro interno del arrollamiento de alta tensión tiene un valor de 755 mm, el diámetro externo y el diámetro medio valdrán:

$$D_{extAT} = (755 \text{ mm} + 2 \cdot 69,5 \text{ mm}) = 894 \text{ mm} = 89,4 \text{ cm}$$

$$D_{wAT} = ((755 \text{ mm}) + (755 \text{ mm} + 2 \cdot 69,5 \text{ mm})) / 2 = 824,5 \text{ mm} = 82,45 \text{ cm}$$

El espacio entre el arrollamiento excitado y la cuba ( $T_{gAT}$ ) y el diámetro medio entre el arrollamiento excitado y la cuba ( $D_{gAT}$ ) se obtendrán con la ayuda del plano de dimensiones del transformador.

Para ello:

$$\text{Longitud de la cuba} = 3305 \text{ mm} = 330,5 \text{ cm (excluyendo el espacio destinado al cambiador de tomas en carga)}$$

Distancia entre el eje de simetría del núcleo y la pared de la cuba = 1652,5 mm  
=165,25 cm

Distancia entre el eje de simetría del núcleo y la parte externa del arrollamiento de AT = (989 mm) + (894 mm / 2) = 1436 mm = 143,6 cm

Por tanto:

Distancia entre el diámetro externo del arrollamiento de AT y la cuba

$$T_{gAT} = 1652,5 \text{ mm} - 1436 \text{ mm} = 216,5 \text{ mm} = 21,65 \text{ cm}$$

Diámetro medio entre el arrollamiento de AT y la cuba

$$D_{gAT} = ((1652,5 \text{ mm} - 989 \text{ mm}) + (894 \text{ mm} / 2)) = 1110,5 \text{ mm} = 111,05 \text{ cm}$$

De la tabla 3.4,  $H_w = 1233 \text{ mm} = 123,3 \text{ cm}$  y  $K_R$  valdrá:

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{-\pi H_w / (T_{wAT} + T_{gAT})}}{\pi H_w / (T_{wAT} + T_{gAT})} = 1 - \frac{1 - e^{-\pi \cdot 123,3 \text{ cm} / (6,95 \text{ cm} + 21,65 \text{ cm})}}{\pi \cdot 123,3 \text{ cm} / (6,95 \text{ cm} + 21,65 \text{ cm})} = 0,927$$

El cálculo de la altura equivalente  $H_{eq}$  vendrá dado por:

$$H_{eq} = \frac{H_w}{K_R} = \frac{123,3 \text{ cm}}{0,927} = 133,01 \text{ cm}$$

Por último, se necesitarán los siguientes datos:

$$I_{\text{nominal AT}} = 320,8 \text{ A (Tabla 3.1)}$$

$$N_{AT} = 426 \text{ (Tabla 3.3)}$$

$$V_{\text{nominal AT}} = 45000 \text{ V (Tabla 3.1)}$$

Sustituyendo todos los datos requeridos en las ecuaciones (3.16) y (3.17), se obtiene un valor de la impedancia homopolar porcentual de:

$$\%(X_0)_{1_{oc}} = 2,48 \cdot 10^{-5} f \frac{(\text{Amperios Vuelta})}{H_{eq} (\text{Voltios / Vuelta})} \sum_{K=1}^n ATD = 2,48 \cdot 10^{-5} f \frac{(A \cdot N)}{H_{eq} (V / N)} \left( \frac{1}{3} T_w D_w + T_g D_g \right)$$

$$\%(X_0)_{1_{oc}} = 2,48 \cdot 10^{-5} \cdot 50 \frac{(320,8A \cdot 426)}{133,01cm \left( \frac{45000V}{\sqrt{3}} / 426 \right)} \left( \frac{1}{3} 6,95cm \cdot 82,45cm + 21,65cm \cdot 111,05cm \right)$$

$$\%(X_0)_{1_{oc}} = 54,21\%$$

## Caso 2. Cálculo de la impedancia homopolar porcentual considerando el arrollamiento de baja tensión como el arrollamiento excitado y el resto de los arrollamientos a circuito abierto

De la tabla 3.4, se obtiene el espesor radial del arrollamiento excitado ( $T_{wBT}$ ), en este caso el arrollamiento de baja tensión, y el diámetro interno del arrollamiento excitado ( $D_{intBT}$ ) que permitirá el cálculo del correspondiente diámetro medio.

$$T_{wBT} = 70 \text{ mm} = 7 \text{ cm}$$

Dado que el diámetro interno del arrollamiento de baja tensión tiene un valor de 565 mm, el diámetro externo y el diámetro medio valdrán:

$$D_{extBT} = (565 \text{ mm} + 2 \cdot 70 \text{ mm}) = 705 \text{ mm} = 70,5 \text{ cm}$$

$$D_{wBT} = ((565 \text{ mm}) + (565 \text{ mm} + 2 \cdot 70 \text{ mm})) / 2 = 635 \text{ mm} = 63,5 \text{ cm}$$

El espacio entre el arrollamiento excitado y la cuba ( $T_{gBT}$ ) y el diámetro medio entre el arrollamiento excitado y la cuba ( $D_{gBT}$ ) se obtendrán con la ayuda del plano de dimensiones del transformador.

Para ello:

Longitud de la cuba = 3305 mm = 330,5 cm (excluyendo el espacio destinado al cambiador de tomas en carga)

Distancia entre el eje de simetría del núcleo y la pared de la cuba = 1652,5 mm  
= 165,25 cm

Distancia entre el eje de simetría del núcleo y la parte externa del arrollamiento de BT = (989 mm) + (705 mm/2) = 1341,5 mm = 134,15 cm

Por tanto:

Distancia entre el diámetro externo del arrollamiento de BT y la cuba

$$T_{gBT} = 1652,5 \text{ mm} - 1341,5 \text{ mm} = 311 \text{ mm} = 31,1 \text{ cm}$$

Diámetro medio entre el arrollamiento de BT y la cuba

$$D_{gBT} = ((1652,5 \text{ mm} - 989 \text{ mm}) + (705 \text{ mm} / 2)) = 1016 \text{ mm} = 101,6 \text{ cm}$$

El cálculo de la altura equivalente  $H_{eq}$  vendrá dado por:

$$H_{eq} = \frac{H_w}{K_R}$$

para lo cual:

De la tabla 3.4,  $H_w = 1233 \text{ mm} = 123,3 \text{ cm}$

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{-\pi H_w / (T_{wBT} + T_{gBT})}}{\pi H_w / (T_{wBT} + T_{gBT})} = 1 - \frac{1 - e^{-\pi \cdot 123,3 \text{ cm} / (7 \text{ cm} + 31,1 \text{ cm})}}{\pi \cdot 123,3 \text{ cm} / (7 \text{ cm} + 31,1 \text{ cm})} = 0,902$$

Por tanto, la altura equivalente  $H_{eq}$  será igual a:

$$H_{eq} = \frac{H_w}{K_R} = \frac{123,3 \text{ cm}}{0,902} = 136,70 \text{ cm}$$

Por último se necesitarán los siguientes datos:

$$I_{\text{nominal AT}} = 320,8 \text{ A (Tabla 3.1)}$$

$$N_{\text{AT}} = 426 \text{ (Tabla 3.3)}$$

$$V_{\text{nominal AT}} = 45000 \text{ V (Tabla 3.2)}$$

Para calcular la reactancia, se toman como base los amperios-vuelta del arrollamiento de AT.

Sustituyendo todos los datos requeridos en las ecuaciones (3.16) y (3.17), se obtiene un valor de la impedancia homopolar porcentual de:

$$\%(X_0)_{2_{oc}} = 2,48 \cdot 10^{-5} f \frac{(\text{AmperiosVuelta})}{H_{eq} (\text{Voltios / Vuelta})} \sum_{K=1}^n ATD = 2,48 \cdot 10^{-5} f \frac{(A \cdot N)}{H_{eq} (V / N)} \left( \frac{1}{3} T_w D_w + T_g D_g \right)$$

$$\%(X_0)_{2\_oc} = 2,48 \cdot 10^{-5} \cdot 50 \frac{(320,8A \cdot 426)}{136,70cm \left( \frac{45000V}{\sqrt{3}} / 426 \right)} \left( \frac{1}{3} 7cm \cdot 63,5cm + 31,1cm \cdot 101,6cm \right)$$

$$\%(X_0)_{2\_oc} = 67,24\%$$

### Caso 3. Cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de AT con el terciario cerrado y el lado de BT a circuito abierto

De la tabla 3.4, se obtiene el espesor radial del arrollamiento excitado ( $T_{wAT}$ ) y el espesor radial del arrollamiento en cortocircuito ( $T_{wT}$ ), así como el diámetro interno del arrollamiento excitado ( $D_{intAT}$ ) y el diámetro interno del arrollamiento en cortocircuito ( $D_{intT}$ ) que permitirán el cálculo de los correspondientes diámetros medios.

$$T_{wAT} = 69,5 \text{ mm} = 6,95 \text{ cm}$$

$$T_{wT} = 10 \text{ mm} = 1 \text{ cm}$$

Dado que el diámetro interno del arrollamiento de alta tensión tiene un valor de 755 mm, el diámetro externo y el diámetro medio valdrán:

$$D_{extAT} = (755 \text{ mm} + (2 \cdot 69,5 \text{ mm})) = 894 \text{ mm} = 89,4 \text{ cm}$$

$$D_{wAT} = ((755 \text{ mm}) + (755 \text{ mm} + 2 \cdot 69,5 \text{ mm})) / 2 = 824,5 \text{ mm} = 82,45 \text{ cm}$$

El diámetro interno del terciario tiene un valor de 509 mm y, por tanto, el diámetro externo y el diámetro medio valdrán:

$$D_{extT} = (509 \text{ mm} + (2 \cdot 10 \text{ mm})) = 529 \text{ mm}$$

$$D_{wT} = ((509 \text{ mm}) + (509 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm})) / 2 = 519 \text{ mm} = 51,9 \text{ cm}$$

El espacio entre los arrollamientos de AT y Terciario es:

$$T_{AT-T} = 755 \text{ mm} - 529 \text{ mm} = 226 \text{ mm} = 22,6 \text{ cm}$$

Y el diámetro medio del canal entre AT y T:

$$D_{AT-T} = (755 \text{ mm} / 2) + (529 \text{ mm} / 2) = 642 \text{ mm} = 64,2 \text{ cm}$$

Para este caso, en primer lugar, se calcula la reactancia de dispersión de secuencia directa entre el arrollamiento de AT y el terciario a partir de las ecuaciones (3.13) y (3.14).

De la tabla 3.4,  $H_w = 1233 \text{ mm} = 123,3 \text{ cm}$  para el arrollamiento de AT.

De esta forma  $K_R$  será:

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{-\pi H_w / (T_{wAT} + T_{AT-T} + T_{WT})}}{\pi H_w / (T_{wAT} + T_{AT-T} + T_{WT})} = 1 - \frac{1 - e^{-\pi 123,3 \text{ cm} / (6,95 \text{ cm} + 22,6 \text{ cm} + 1 \text{ cm})}}{\pi \cdot 123,3 \text{ cm} / (6,95 \text{ cm} + 22,6 \text{ cm} + 1 \text{ cm})} = 0,922$$

El cálculo de la altura equivalente  $H_{eq}$  vendrá dado por:

$$H_{eq} = \frac{H_w}{K_R} = \frac{123,3 \text{ cm}}{0,922} = 133,73 \text{ cm}$$

Por último, se necesitarán los siguientes datos:

$$I_{\text{nominal AT}} = 320,8 \text{ A (Tabla 3.1)}$$

$$N_{\text{AT}} = 426 \text{ (Tabla 3.3)}$$

$$V_{\text{nominal AT}} = 45000 \text{ V (Tabla 3.1)}$$

Despreciando la reactancia de la barra utilizada para formar el neutro, la reactancia de dispersión AT-T se calcula a partir de la ecuación (3.13).

$$\%X_{13} = 2,48 \cdot 10^{-5} f \frac{(\text{AmperiosVuelta})}{H_{eq} (\text{Voltios/Vuelta})} \sum_{K=1}^n \text{ATD}$$

Con  $\Sigma \text{ATD}$ , según la ecuación (3.14):

$$\sum \text{ATD} = \frac{1}{3} (T_1 D_1) + (T_g D_g) + \frac{1}{3} (T_2 D_2) = \frac{1}{3} (T_{wAT} \cdot D_{wAT} + T_{AT-T} \cdot D_{AT-T} + T_{WT} \cdot D_{WT})$$

$$\sum \text{ATD} = \frac{1}{3} 6,95 \text{ cm} \cdot 82,45 \text{ cm} + 22,6 \text{ cm} \cdot 64,2 \text{ cm} + \frac{1}{3} 1 \text{ cm} \cdot 51,9 \text{ cm} = 1659,23 \text{ cm}^2$$

Por tanto, la reactancia de dispersión AT-T porcentual será:

$$\%X_{13} = 2,48 \cdot 10^{-5} \cdot 50 \frac{(320,8 \text{ A} \cdot 426)}{133,73 \left( \frac{45000}{\sqrt{3}} / 426 \right)} \cdot 1659,23 \text{ cm}^2$$

$$\%X_{13} = 34,47 \%$$

A continuación, se calcula la reactancia de secuencia homopolar a circuito abierto para el arrollamiento terciario a partir de las ecuaciones (3.16) y (3.17).

De la tabla 3.4, se obtiene el espesor radial del arrollamiento terciario ( $T_{wT}$ ) y el diámetro interno del arrollamiento terciario ( $D_{intT}$ ) que permitirá el cálculo del correspondiente diámetro medio.

$$T_{wT} = 10 \text{ mm} = 1 \text{ cm}$$

Dado que el diámetro interno del arrollamiento de terciario tiene un valor de 509 mm, el diámetro externo y el diámetro medio valdrán:

$$D_{extT} = (509 \text{ mm} + (2 \cdot 10 \text{ mm})) = 529 \text{ mm}$$

$$D_{wT} = ((509 \text{ mm}) + (509 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm})) / 2 = 519 \text{ mm} = 51,9 \text{ cm}$$

El espacio entre el arrollamiento terciario y la cuba ( $T_{gT}$ ) y el diámetro medio entre el arrollamiento terciario y la cuba ( $D_{gT}$ ) se obtendrán con la ayuda del plano de dimensiones del transformador.

Para ello:

Longitud de la cuba = 3305 mm = 330,5 cm (excluyendo el espacio destinado al cambiador de tomas en carga)

Distancia entre el eje de simetría del núcleo y la pared de la cuba = 1652,5 mm = 165,25 cm

Distancia entre el eje de simetría del núcleo y la parte externa del arrollamiento terciario = (989 mm) + (529 mm / 2) = 1253,5 mm = 125,35 cm

Por tanto:

Distancia entre el diámetro externo del arrollamiento terciario y la cuba

$$T_{gT} = 1652,5 \text{ mm} - 1253,5 \text{ mm} = 399 \text{ mm} = 39,9 \text{ cm}$$

Diámetro medio entre el arrollamiento terciario y la cuba

$$D_{gT} = ((1652,5 \text{ mm} - 989 \text{ mm}) + (529 \text{ mm} / 2)) = 928 \text{ mm} = 92,8 \text{ cm}$$

De la tabla 3.4,  $H_w = 1193 \text{ mm} = 119,3 \text{ cm}$  y  $K_R$  valdrá:

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{-\pi H_w / (T_{wT} + T_{gT})}}{\pi H_w / (T_{wT} + T_{gT})} = 1 - \frac{1 - e^{-\pi \cdot 119,3 \text{ cm} / (1 \text{ cm} + 39,9 \text{ cm})}}{\pi \cdot 119,3 \text{ cm} / (1 \text{ cm} + 39,9 \text{ cm})} = 0,935$$

El cálculo de la altura equivalente  $H_{eq}$  vendrá dado por:

$$H_{eq} = \frac{H_w}{K_R} = \frac{119,3 \text{ cm}}{0,935} = 127,59 \text{ cm}$$

Por último, se necesitarán los siguientes datos:

$$I_{\text{nominal AT}} = 320,8 \text{ A (Tabla 3.1)}$$

$$N_{\text{AT}} = 426 \text{ (Tabla 3.3)}$$

$$V_{\text{nominal AT}} = 45000 \text{ V (Tabla 3.1)}$$

Para calcular la reactancia, se toman como base los amperios-vuelta del arrollamiento de AT.

Sustituyendo todos los datos requeridos en las ecuaciones (3.16) y (3.17), se obtiene un valor de la impedancia homopolar porcentual de:

$$\%(X_0)_{3\_oc} = 2,48 \cdot 10^{-5} f \frac{(\text{AmperiosVuelta})}{H_{eq} (\text{Voltios / Vuelta})} \sum_{K=1}^n ATD = 2,48 \cdot 10^{-5} f \frac{(A \cdot N)}{H_{eq} (V / N)} \left( \frac{1}{3} T_w D_w + T_g D_g \right)$$

$$\%(X_0)_{3\_oc} = 2,48 \cdot 10^{-5} \cdot 50 \frac{(320,8 \text{ A} \cdot 426)}{127,59 \text{ cm} \left( \frac{45000 \text{ V}}{\sqrt{3}} / 426 \right)} \left( \frac{1}{3} 1 \text{ cm} \cdot 51,9 \text{ cm} + 39,9 \text{ cm} \cdot 92,8 \text{ cm} \right)$$

$$\%(X_0)_{3\_oc} = 81,01\%$$

Finalmente, la reactancia homopolar alimentando el arrollamiento de AT con el terciario cerrado y el lado de BT a circuito abierto vendrá dada por:

$$\%X_{0\_13} = \frac{\%(X_0)_{1\_oc}}{\%(X_0)_{3\_oc}} \cdot \%X_{13} = \frac{54,21}{81,01} \cdot 34,47 = 23,06\%$$

#### Caso 4. Cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de BT con el terciario cerrado y el lado de AT a circuito abierto

De la tabla 3.4, se obtiene el espesor radial del arrollamiento excitado ( $T_{wBT}$ ) y el espesor radial del arrollamiento en cortocircuito ( $T_{wT}$ ), así como el diámetro interno del arrollamiento excitado ( $D_{intBT}$ ) y el diámetro interno del arrollamiento en cortocircuito ( $D_{intT}$ ) que permitirán el cálculo de los correspondientes diámetros medios.

$$T_{wBT} = 70 \text{ mm} = 7 \text{ cm}$$

$$T_{wT} = 10 \text{ mm} = 1 \text{ cm}$$

Dado que el diámetro interno del arrollamiento de baja tensión tiene un valor de 565 mm, el diámetro externo y el diámetro medio valdrán:

$$D_{extBT} = (565 \text{ mm} + 2 \cdot 70 \text{ mm}) = 705 \text{ mm} = 70,5 \text{ cm}$$

$$D_{wBT} = ((565 \text{ mm}) + (565 \text{ mm} + 2 \cdot 70 \text{ mm})) / 2 = 635 \text{ mm} = 63,5 \text{ cm}$$

El diámetro interno del terciario tiene un valor de 509 mm y, por tanto, el diámetro externo y el diámetro medio valdrán:

$$D_{extT} = (509 \text{ mm} + (2 \cdot 10 \text{ mm})) = 529 \text{ mm}$$

$$D_{wT} = ((509 \text{ mm}) + (509 \text{ mm} + 2 \cdot 10 \text{ mm})) / 2 = 519 \text{ mm} = 51,9 \text{ cm}$$

El espacio entre los arrollamientos de BT y Terciario es:

$$T_{BT-T} = 565 \text{ mm} - 529 \text{ mm} = 36 \text{ mm} = 3,6 \text{ cm}$$

Y el diámetro medio del canal entre BT y T

$$D_{BT-T} = (565 \text{ mm} / 2) + (529 \text{ mm} / 2) = 547 \text{ mm} = 54,7 \text{ cm}$$

Para este caso, en primer lugar, se calcula la reactancia de dispersión de secuencia directa entre el arrollamiento de BT y el terciario a partir de las ecuaciones (3.13) y (3.14).

De la tabla 3.4,  $H_w = 1233 \text{ mm} = 123,3 \text{ cm}$  para el arrollamiento de BT.

De esta forma  $K_R$  será:

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{-\pi H_w / (T_{wBT} + T_{BT-T} + T_{wT})}}{\pi H_w / (T_{wBT} + T_{BT-T} + T_{wT})} = 1 - \frac{1 - e^{-\pi \cdot 123,3 \text{ cm} / (7 \text{ cm} + 3,6 \text{ cm} + 1 \text{ cm})}}{\pi \cdot 123,3 \text{ cm} / (7 \text{ cm} + 3,6 \text{ cm} + 1 \text{ cm})} = 0,970$$

El cálculo de la altura equivalente  $H_{eq}$  vendrá dado por:

$$H_{eq} = \frac{H_w}{K_R} = \frac{123,3cm}{0,970} = 127,11 cm$$

Por último, se necesitarán los siguientes datos:

$$I_{nominal BT} = 899,3 A \text{ (Tabla 3.1)}$$

$$N_{BT} = 152 \text{ (Tabla 3.3)}$$

$$V_{nominal BT} = 16050 V \text{ (Tabla 3.1)}$$

Despreciando la reactancia de la barra utilizada para formar el neutro, la reactancia de dispersión BT-T se calcula a partir de la ecuación (3.13).

$$\%X_{23} = 2,48 \cdot 10^{-5} f \frac{(AmperiosVuelta)}{H_{eq} (Voltios / Vuelta)} \sum_{K=1}^n ATD$$

Con  $\Sigma ATD$ , según la ecuación (3.14):

$$\sum ATD = \frac{1}{3}(T_1 D_1) + (T_g D_g) + \frac{1}{3}(T_2 D_2) = \frac{1}{3}(T_{WBT} \cdot D_{WBT} + T_{BT-T} \cdot D_{BT-T} + T_{WT} \cdot D_{WT})$$

$$\sum ATD = \frac{1}{3} 7cm \cdot 63,5cm + 3,6cm \cdot 54,7cm + \frac{1}{3} 1cm \cdot 51,9cm = 362,386cm^2$$

Por tanto, la reactancia de dispersión BT-T porcentual será:

$$\%X_{23} = 2,48 \cdot 10^{-5} \cdot 50 \frac{(899,3A \cdot 152)}{127,11 \left( \frac{16050}{\sqrt{3}} / 152 \right)} \cdot 362,386cm^2$$

$$\%X_{23} = 7,93 \%$$

Finalmente, la reactancia homopolar alimentando el arrollamiento de BT con el terciario cerrado y el lado de AT a circuito abierto vendrá dada por:

$$\%X_{0-23} = \frac{\%(X_0)_{2-oc}}{\%(X_0)_{3-oc}} \cdot \%X_{23} = \frac{67,24}{81,01} \cdot 7,93 = 6,58\%$$

**Caso 5. Cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de AT con el lado de BT cortocircuitado y el terciario abierto**

De la tabla 3.4, se obtiene el espesor radial del arrollamiento excitado ( $T_{wAT}$ ) y el espesor radial del arrollamiento en cortocircuito ( $T_{wBT}$ ), así como el diámetro interno del arrollamiento excitado ( $D_{intAT}$ ) y el diámetro interno del arrollamiento en cortocircuito ( $D_{intBT}$ ) que permitirán el cálculo de los correspondientes diámetros medios.

$$T_{wAT} = 69,5 \text{ mm} = 6,95 \text{ cm}$$

$$T_{wBT} = 70 \text{ mm} = 7 \text{ cm}$$

Dado que el diámetro interno del arrollamiento de alta tensión tiene un valor de 755 mm, el diámetro externo y el diámetro medio valdrán:

$$D_{extAT} = (755 \text{ mm} + (2 \cdot 69,5 \text{ mm})) = 894 \text{ mm} = 89,4 \text{ cm}$$

$$D_{wAT} = ((755 \text{ mm}) + (755 \text{ mm} + 2 \cdot 69,5 \text{ mm})) / 2 = 824,5 \text{ mm} = 82,45 \text{ cm}$$

El diámetro interno del arrollamiento de baja tensión tiene un valor de 565 mm y, por tanto, el diámetro externo y el diámetro medio valdrán:

$$D_{extBT} = (565 \text{ mm} + 2 \cdot 70 \text{ mm}) = 705 \text{ mm} = 70,5 \text{ cm}$$

$$D_{wBT} = ((565 \text{ mm}) + (565 \text{ mm} + 2 \cdot 70 \text{ mm})) / 2 = 635 \text{ mm} = 63,5 \text{ cm}$$

El espacio entre los arrollamientos de AT y BT y es:

$$T_{AT-BT} = 755 \text{ mm} - 705 \text{ mm} = 50 \text{ mm} = 5 \text{ cm}$$

Y el diámetro medio del canal entre AT y BT:

$$D_{AT-BT} = (755 \text{ mm} / 2) + (705 \text{ mm} / 2) = 730 \text{ mm} = 73 \text{ cm}$$

Para este caso, en primer lugar, se calcula la reactancia de dispersión de secuencia directa entre el arrollamiento de AT y el arrollamiento de BT a partir de las ecuaciones (3.13) y (3.14).

De la tabla 3.4,  $H_w = 1233 \text{ mm} = 123,3 \text{ cm}$  para los arrollamientos de AT y BT.

De esta forma  $K_R$  será:

$$K_R = 1 - \frac{1 - e^{-\pi H_w / (T_{wAT} + T_{AT-BT} + T_{wBT})}}{\pi H_w / (T_{wAT} + T_{AT-BT} + T_{wBT})} = 1 - \frac{1 - e^{-\pi \cdot 123,3 \text{ cm} / (6,95 \text{ cm} + 5 \text{ cm} + 7 \text{ cm})}}{\pi \cdot 123,3 \text{ cm} / (6,95 \text{ cm} + 5 \text{ cm} + 7 \text{ cm})} = 0,951$$

El cálculo de la altura equivalente  $H_{eq}$  vendrá dado por:

$$H_{eq} = \frac{H_w}{K_R} = \frac{123,3cm}{0,951} = 129,65 cm$$

Por último, se necesitarán los siguientes datos:

$$I_{nominal AT} = 320,8 A \text{ (Tabla 3.1)}$$

$$N_{AT} = 426 \text{ (Tabla 3.3)}$$

$$V_{nominal AT} = 45000 V \text{ (Tabla 3.1)}$$

Despreciando la reactancia de la barra utilizada para formar el neutro, la reactancia de dispersión AT-BT se calcula a partir de la ecuación (3.13).

$$\%X_{12} = 2,48 \cdot 10^{-5} f \frac{(AmperiosVuelta)}{H_{eq} (Voltios/Vuelta)} \sum_{K=1}^n ATD$$

Con  $\Sigma ATD$ , según la ecuación (3.14):

$$\sum ATD = \frac{1}{3}(T_1 D_1) + (T_g D_g) + \frac{1}{3}(T_2 D_2) = \frac{1}{3}(T_{WAT} \cdot D_{WAT} + T_{AT-BT} \cdot D_{AT-BT} + T_{WBT} \cdot D_{WBT})$$

$$\sum ATD = \frac{1}{3}6,95cm \cdot 82,45cm + 5cm \cdot 73cm + \frac{1}{3}7cm \cdot 63,5cm = 704,176cm^2$$

Por tanto, la reactancia de dispersión AT-BT porcentual será:

$$\%X_{12} = 2,48 \cdot 10^{-5} \cdot 50 \frac{(320,8A \cdot 426)}{129,65 \left( \frac{45000}{\sqrt{3}} / 426 \right)} \cdot 704,176cm^2$$

$$\%X_{12} = 15,09\%$$

Finalmente, la reactancia homopolar alimentando el arrollamiento de AT con el terciario abierto y el lado de BT cortocircuitado vendrá dada por:

$$\%X_{0_{-12}} = \frac{\%(X_0)_{1_{-oc}}}{\%(X_0)_{2_{-oc}}} \cdot \%X_{12} = \frac{54,21}{67,24} \cdot 15,09 = 12,16\%$$

**Caso 6. Cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de BT con el lado de AT cortocircuitado y el terciario abierto**

El cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de BT con el lado de AT cortocircuitado y el terciario abierto será similar al cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de AT con el lado de BT cortocircuitado y el terciario abierto, expuesto anteriormente.

**Caso 7. Cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de AT con el lado de BT cortocircuitado y el terciario cerrado**

La reactancia individual de secuencia homopolar de los arrollamientos puede ser calculada del siguiente modo:

$$\%(X_0)_1 = \frac{1}{2} \cdot [\%X_{0_{12}} + \%X_{0_{13}} - \%X_{0_{23}}] = \frac{1}{2} \cdot [12,16 + 23,06 - 6,58] = 14,32\%$$

$$\%(X_0)_2 = \frac{1}{2} \cdot [\%X_{0_{12}} + \%X_{0_{23}} - \%X_{0_{13}}] = \frac{1}{2} \cdot [12,16 + 6,58 - 23,06] = -2,16\%$$

$$\%(X_0)_3 = \frac{1}{2} \cdot [\%X_{0_{13}} + \%X_{0_{23}} - \%X_{0_{12}}] = \frac{1}{2} \cdot [23,06 + 6,58 - 12,16] = 8,74\%$$

La reactancia de secuencia homopolar alimentando el arrollamiento de AT con el arrollamiento de BT cortocircuitado y el terciario cerrado vendrá calculada como:

$$\%(X_0)_{1_{23}} = \%(X_0)_1 + \frac{\%(X_0)_2 \cdot \%(X_0)_3}{\%(X_0)_2 + \%(X_0)_3} = 14,32\% + \frac{-2,16\% \cdot 8,74\%}{-2,16\% + 8,74\%} = 11,45\%$$

**Caso 8. Cálculo de la impedancia homopolar porcentual alimentando el arrollamiento de BT con el lado de AT cortocircuitado y el terciario cerrado**

La reactancia individual de secuencia homopolar de los arrollamientos puede ser calculada del siguiente modo:

$$\%(X_0)_1 = \frac{1}{2} \cdot [\%X_{0_{12}} + \%X_{0_{13}} - \%X_{0_{23}}] = \frac{1}{2} \cdot [12,16 + 23,06 - 6,58] = 14,32\%$$

$$\%(X_0)_2 = \frac{1}{2} \cdot [\%X_{0_{12}} + \%X_{0_{23}} - \%X_{0_{13}}] = \frac{1}{2} \cdot [12,16 + 6,58 - 23,06] = -2,16\%$$

$$\%(X_0)_3 = \frac{1}{2} \cdot [\%X_{0_{13}} + \%X_{0_{23}} - \%X_{0_{12}}] = \frac{1}{2} \cdot [23,06 + 6,58 - 12,16] = 8,74\%$$

La reactancia de secuencia homopolar alimentando el arrollamiento de BT con el arrollamiento de AT cortocircuitado y el terciario cerrado vendrá calculada como:

$$\%(X_0)_{2\_13} = \%(X_0)_2 + \frac{\%(X_0)_1 \cdot \%(X_0)_3}{\%(X_0)_1 + \%(X_0)_3} = -2,16\% + \frac{14,32\% \cdot 8,74\%}{14,32\% + 8,74\%} = \%3,27$$

### 3.3. RESUMEN DE LOS RESULTADOS

La tabla 3.5 muestra un resumen de los resultados obtenidos de impedancia homopolar para este transformador mediante el cálculo a partir de las dimensiones geométricas.

Transformador	Identificador ensayo	Arrollamiento AT	Arrollamiento BT	Arrollamiento T	Impedancia calculada (%)
25 MVA 45/16,05 kV	A1	Alimentado	Cortocircuitado	Abierto	12,16%
	A2	Alimentado	Cortocircuitado	Cerrado	11,45%
	A3	Alimentado	Abierto	Cerrado	23,06%
	A4	Alimentado	Abierto	Abierto	54,21%
	B5	Cortocircuitado	Alimentado	Abierto	12,16%
	B6	Cortocircuitado	Alimentado	Cerrado	3,27%
	B7	Abierto	Alimentado	Cerrado	6,58%
	B8	Abierto	Alimentado	Abierto	67,24%

Tabla 3.5. Impedancias homopolares calculadas a partir de las dimensiones geométricas del transformador

# Capítulo 4

## ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR

Se puede hablar de dos tipos de ensayos: los ensayos de recepción final en fábrica y los ensayos de recepción en campo.

Los ensayos finales en fábrica se realizan en los laboratorios de AT (típicamente en las propias instalaciones del fabricante), a los que puede/debe asistir el usuario.

Los principales objetivos de los ensayos finales en fábrica son:

- Control de calidad final del equipo fabricado
- Verificar el cumplimiento de los requerimientos funcionales
- Superar sobresolicitaciones de su diseño (dieléctrico, mecánico y térmico) de forma que se garantice su fiabilidad en servicio

Los ensayos finales en fábrica están tipificados en la normativa de los equipos eléctricos y esta normativa clasifica los ensayos como:

- Ensayos de rutina o individuales: se realizan sobre todos los equipos con el objetivo de garantizar la calidad de la fabricación y el cumplimiento de los requerimientos funcionales básicos.
- Ensayos de tipo: se realizan sobre una unidad de cada diseño con el objetivo de verificar el mismo frente a requerimientos (típicamente térmicos, dieléctricos o electrodinámicos) no cubiertos en los ensayos de rutina.
- Ensayos especiales: otros ensayos realizados previo acuerdo entre fabricante y usuario.

La norma IEC 60076-1 considera la medida de la impedancia homopolar como un ensayo especial.

Los ensayos finales en campo se realizan con el fin de:

- Comprobar que se mantienen las condiciones aseguradas en fábrica una vez realizado el transporte y el montaje en campo del equipo, de forma previa a la puesta en servicio.
- Fijar la primera referencia para futuros ensayos de mantenimiento predictivo.

Idealmente, en equipos de gran complejidad como los transformadores de potencia, se deberían realizar todos los ensayos de rutina realizados en el laboratorio de la fábrica, acción que en ocasiones no es posible por las limitaciones en campo.

## **4.1. ENSAYOS CONTEMPLADOS EN LA NORMATIVA ESPAÑOLA**

Según la norma UNE-EN 60076-1 [U761], el ensayo de determinación de la impedancia de secuencia homopolar de un transformador se trata de un ensayo especial que se realiza para una unidad de cada serie de fabricación.

En su apartado 10.7 la norma indica que la impedancia homopolar de un arrollamiento conectado en estrella se mide a la frecuencia asignada entre los bornes de línea conectados entre sí y el borne de neutro.

---

Se expresa en ohmios por fase y se da por la relación:

$$Z_0 = 3 \cdot \frac{U}{I} \quad (4.1)$$

Se debe especificar la corriente de ensayo.

En el caso de transformadores que tengan más de un arrollamiento en estrella con neutro accesible, la impedancia homopolar depende de si los arrollamientos no energizados están a circuito abierto o cortocircuitados y los ensayos a efectuar serán objeto de un acuerdo entre el fabricante y el comprador.

La normativa llama la atención sobre el hecho de que la impedancia homopolar depende de la disposición física de los arrollamientos y de las partes magnéticas (cuba, núcleo, posibles shunts magnéticos) y por lo tanto las medidas realizadas alimentando diferentes arrollamientos pueden no concordar.

Por lo demás, la norma no indica cómo obtener los parámetros del circuito equivalente a partir de los ensayos.

## **4.2. ENSAYOS DE SECUENCIA HOMOPOLAR RECOMENDADOS POR LA NORMATIVA AMERICANA**

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

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

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

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

El circuito equivalente ante secuencia homopolar para transformadores de este tipo se muestra en la figura 4.1. El arrollamiento 1 tiene el neutro accesible, mientras que los arrollamientos 2, 3 y n no.

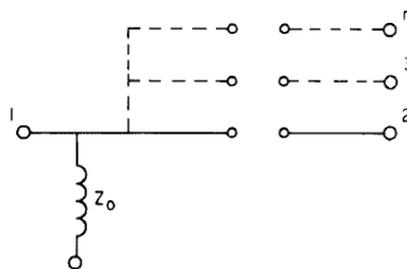


Figura 4.1. Circuito equivalente ante secuencia homopolar para transformadores con un solo neutro accesible

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

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

La figura 4.2 muestra el circuito equivalente ante secuencia homopolar para este tipo de transformadores. Los arrollamientos 1 y 2 tienen neutro accesible mientras que los arrollamientos 3, 4 y sucesivos no.

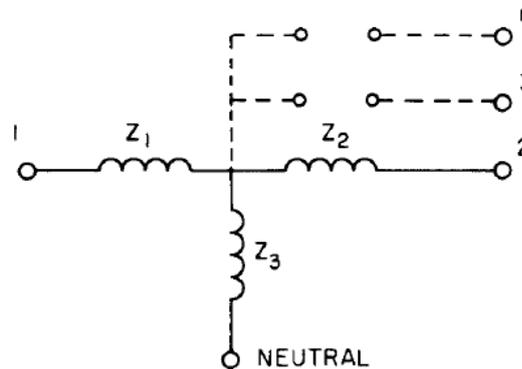


Figura 4.2. Circuito equivalente ante secuencia homopolar para transformadores con dos neutros accesibles

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

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

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

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

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

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

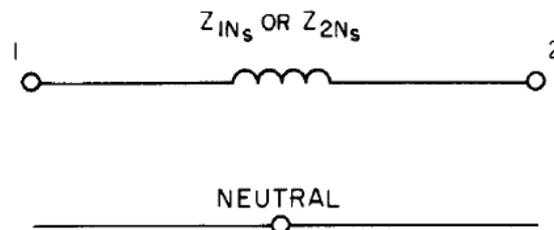
$$Z_3 = +\sqrt{Z_{2N_0}(Z_{1N_0} - Z_{1N_s})} = +\sqrt{Z_{1N_0}(Z_{2N_0} - Z_{2N_s})} \quad (4.2)$$

$$Z_2 = Z_{2N_0} - Z_3 \quad (4.3)$$

$$Z_1 = Z_{1N_0} - Z_3 \quad (4.4)$$

El signo + que aparece antes del radical en la ecuación (4.2) es apropiado para los casos más habituales en los que los arrollamientos 1 y 2 están físicamente adyacentes en el diseño, y no se interpone un arrollamiento en triángulo (3, 4, etc.) entre ellos. Sin embargo, un signo menos puede ser apropiado para aquellos casos en los que un arrollamiento conectado en triángulo (3 ó 4) esté físicamente localizado entre los arrollamientos 1 y 2. Para comprobar si el signo es correcto se deben comparar los resultados con los cálculos durante el diseño.

Cuando  $Z_{1N_0}$  y  $Z_{2N_0}$  son muy elevados, entonces  $Z_3$  también se aproximará a infinito, y el circuito equivalente queda como se muestra en la figura 4.3.



**Figura 4.3. Circuito equivalente ante secuencia homopolar para transformadores con dos neutros externos disponibles si  $Z_{1N_0}$  y  $Z_{2N_0}$  se aproximan a infinito**

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

Lo visto es aplicable al caso de autotransformadores.

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

### **4.3. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA SOBRE LA DETERMINACIÓN DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR**

Muchos son los autores que hablan de diferentes ensayos y formas de obtención de la impedancia homopolar.

La mayoría de los autores recomienda realizar los mismos ensayos indicados en el Std IEEE C57.12.90 y la misma metodología para obtener el circuito equivalente ante secuencia homopolar. Entre las referencias que incluyen esas recomendaciones se encuentran [ABB03] y [Chr65]. En la bibliografía consultada, la tensión aplicada en el ensayo de vacío ante secuencia homopolar es mucho menor que la tensión nominal; así en [ABB03] el ensayo de vacío ante secuencia homopolar desde AT se hizo al 6% de tensión y el ensayo de vacío desde BT al 10% de tensión. En [Chr65] los ensayos de vacío se hicieron a un 8% de la tensión nominal.

Un caso especial es [Tle08], ya que si bien recomienda los mismos ensayos que [IEE10] utiliza una metodología un poco diferente para hallar el circuito equivalente ante secuencia homopolar de transformadores Yyd. En esta metodología se acepta que las impedancias de los arrollamientos de AT, BT y Terciario son idénticas ante secuencia homopolar y ante secuencia directa (figura 4.4) y con el ensayo de cortocircuito ante secuencia homopolar sólo resta determinar la impedancia magnetizante (figura 4.4).

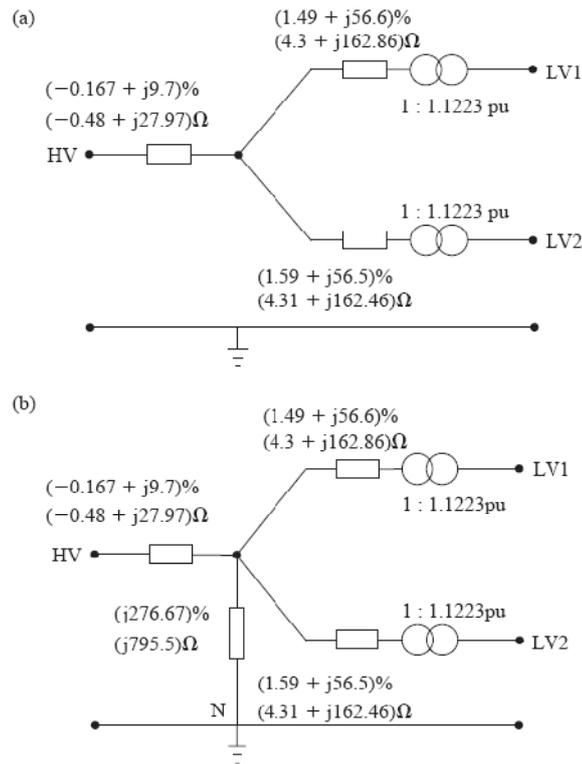


Figura 4.4. Circuito equivalente ante secuencia directa (a) y ante secuencia homopolar (b) de un transformador de tres arrollamientos (Yyd)

[Cog59] indica que las impedancias de secuencia homopolar de un transformador pueden ser determinadas haciendo tres ensayos. Los esquemas de las conexiones para los ensayos se muestran en la figura 4.5, y la representación de los circuitos equivalentes de los ensayos en la figura 4.6.

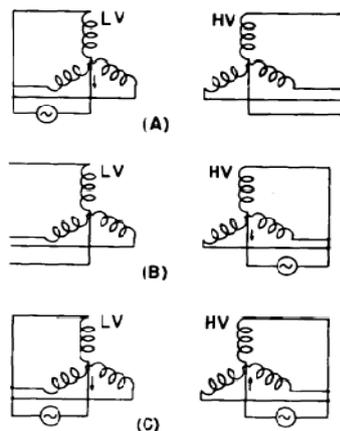


Figura 4.5. Ensayos de impedancia de secuencia homopolar

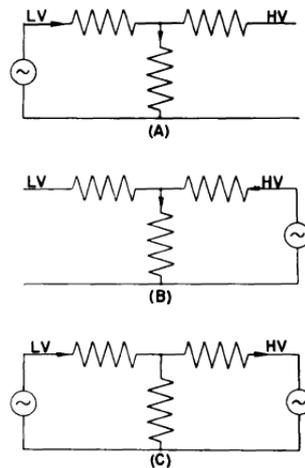


Figura 4.6. Representación de los circuitos equivalentes de los ensayos de impedancia de secuencia homopolar

**Ensayo 1.** Este ensayo se realiza para las conexiones mostradas en las figuras 4.5(A) (el circuito equivalente se muestra en la figura 4.6(A)), y consiste en aplicar una tensión monofásica al arrollamiento de baja tensión entre el terminal de neutro y los tres terminales de línea conectados entre sí, con el arrollamiento de alta tensión a circuito abierto.

**Ensayo 2.** Este ensayo se realiza para las conexiones mostradas en las figuras 4.5 (B) y 4.6 (B), y se trata del mismo ensayo que el ensayo 1, salvo que la tensión, en este caso, se aplica al arrollamiento de alta tensión con el arrollamiento de baja tensión en circuito abierto.

**Ensayo 3.** Este ensayo se realiza para las conexiones mostradas en las figuras 4.5(C) y 4.6(C), y consiste en la aplicación simultánea de dos fuentes separadas de tensión monofásica a las dos conexiones en estrella, entre el terminal de neutro y los terminales de las tres líneas conectados entre sí. Las tensiones se ajustan para que los amperios-vuelta de cada una de las bobinas de baja tensión sean exactamente igual pero de dirección opuesta a los amperios-vuelta de cada una de las bobinas de alta tensión. Por lo tanto, los amperios-vuelta netos en cada columna del núcleo serán cero y no habrá fuerza magnetomotriz actuando en las columnas del núcleo. La impedancia medida de esta manera es la impedancia de dispersión o la impedancia serie de oposición entre los dos arrollamientos.

El tercer ensayo descrito es muy difícil de realizar debido al requerimiento de que los amperios-vuelta en el lado de alta y baja tensión deben ser exactamente iguales y opuestos, como así lo reconoce el autor [Cog59].

---

## **4.4. CONJUNTO DE ENSAYOS QUE PERMITEN UNA CARACTERIZACIÓN COMPLETA DE LA IMPEDANCIA HOMOPOLAR Y CÁLCULO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE**

Se considerará el caso más completo de un transformador que disponga de arrollamientos de alta y baja tensión, arrollamiento terciario y regulación.

Una completa caracterización de la impedancia homopolar indica que los ensayos que se determinarán a este tipo de equipos para la determinación de la impedancia homopolar son ocho:

a) Se medirá la impedancia homopolar desde el arrollamiento con regulación (normalmente arrollamiento primario) con:

- Resto de arrollamientos cortocircuitados y puestos a tierra, salvo el arrollamiento terciario de compensación que tendrá el triángulo abierto.
- Resto de arrollamientos cortocircuitados y puestos a tierra, incluido el terciario.
- Resto de arrollamientos abiertos, incluido el terciario de compensación que estará abierto. Para este ensayo, se medirán valores a cuatro niveles diferentes de tensión.
- Resto de arrollamientos abiertos, salvo el arrollamiento terciario de compensación que estará cerrado.

b) Para el resto de los arrollamientos conectados en estrella se realizará un ensayo de la impedancia homopolar contemplando los siguientes casos:

- Resto de arrollamientos cortocircuitados y terciario cerrado.
- Resto de arrollamientos cortocircuitados y terciario abierto.
- Resto de arrollamientos abiertos y terciario cerrado.
- Resto de arrollamientos abiertos y terciario abierto. Se medirán valores a cuatro niveles diferentes de tensión.

En aquellos ensayos en los que el arrollamiento energizado sea el de regulación o, por el contrario, se encuentre cortocircuitado, se medirá la impedancia homopolar en las posiciones central y extremas del regulador.

En caso de que la unidad ensayada tenga una variación en sus impedancias de secuencia directa mayor al 5% respecto a la unidad en la que se realizó el ensayo de impedancia homopolar, se repetirán las medidas indicadas.

#### 4.4.1. CÁLCULO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE CON TERCARIO CERRADO

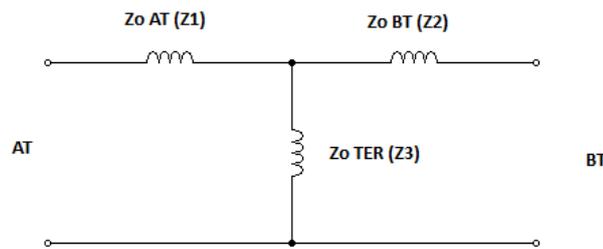


Figura 4.7. Circuito equivalente ante secuencia homopolar de un transformador Yyd

Para obtener los parámetros del circuito equivalente se pueden realizar cuatro ensayos (con identificador A3, A2, B7 y B6), cuya relación con las impedancias del circuito es:

$$\text{ENSAYO A3: AT energizado - BT abierto} \rightarrow A3 = Z_1 + Z_3 \quad (4.5)$$

$$\text{ENSAYO A2: AT energizado - BT cortocircuitado} \rightarrow A2 = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (4.6)$$

$$\text{ENSAYO B7: BT energizado - AT abierto} \rightarrow B7 = Z_2 + Z_3 \quad (4.7)$$

$$\text{ENSAYO B6: BT energizado - AT cortocircuitado} \rightarrow B6 = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} \quad (4.8)$$

Para obtener el valor de  $Z_1$ ,  $Z_2$  y  $Z_3$  se pueden tomar los ensayos A3, A2 y B7 o los A3, B7 y B6.

Considerando los ensayos A3-A2-B7 el valor de las impedancias se obtendría como:

$$\text{Ensayo A3: } Z_1 = A3 - Z_3 \quad (4.9)$$

$$\text{Ensayo B7: } Z_2 = B7 - Z_3 \quad (4.10)$$

$$\text{Ensayo A2: } A2 = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (4.11)$$

Y sustituyendo las expresiones de  $Z_1$  y  $Z_2$  en el ensayo A2 y despejando, se obtiene la expresión para el cálculo de  $Z_3$ .

$$Z_3 = \pm \sqrt{A3B7 - A2B7} = \pm \sqrt{B7(A3 - A2)} \quad (4.12)$$

Si en lugar de tomar los ensayos A3, A2 y B7 se hubieran considerado los ensayos A3-B7-B6:

$$\text{Ensayo A3: } Z_1 = A3 - Z_3 \quad (4.13)$$

$$\text{Ensayo B7: } Z_2 = B7 - Z_3 \quad (4.14)$$

$$\text{Ensayo B6: } B6 = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} \quad (4.15)$$

Con lo que se obtendría una expresión para  $Z_3$ :

$$Z_3 = \pm \sqrt{B7A3 - B6A3} = \pm \sqrt{A3(B7 - B6)} \quad (4.16)$$

## 4.4.2. CÁLCULO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE CON Terciario ABIERTO

En la figura 4.8 se muestra la topología del circuito equivalente considerando el efecto de la cuba para ese caso y la notación empleada para las impedancias.

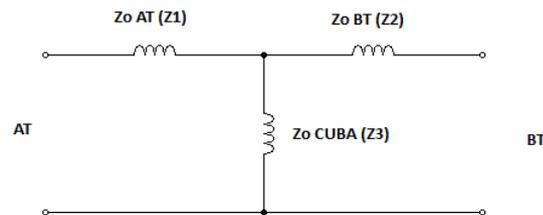


Figura 4.8. Circuito equivalente homopolar para un transformador Yyd con el terciario abierto

La relación entre el resultado de los ensayos y el valor de las impedancias es:

$$\text{ENSAYO A4: AT energizado - BT abierto} \rightarrow A4 = Z_1 + Z_3 \quad (*) \quad (4.17)$$

$$\text{ENSAYO A1: AT energizado - BT cortocircuitado} \rightarrow A1 = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (4.18)$$

$$\text{ENSAYO B8: BT energizado - AT abierto} \rightarrow B8 = Z_2 + Z_3 \quad (*) \quad (4.19)$$

$$\text{ENSAYO B5: BT energizado - AT cortocircuitado} \rightarrow B5 = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} \quad (4.20)$$

(\*) En los ensayos marcados con (\*) el valor de la tensión de ensayo influye en el valor de la impedancia medida.

En lo que sigue la forma de proceder es diferente según se disponga de los 4 ensayos o no.

- Con disponibilidad de los 4 ensayos:

Considerando los ensayos A4-A1-B8:

$$\text{Ensayo A4: } Z_1 = A4 - Z_3 \quad (4.21)$$

$$\text{Ensayo B8: } Z_2 = B8 - Z_3 \quad (4.22)$$

$$\text{Ensayo A1: } A1 = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} \quad (4.23)$$

Sustituyendo las expresiones de  $Z_1$  y  $Z_2$  en el ensayo A1 y despejando, se obtiene la expresión para el cálculo de  $Z_3$ .

$$Z_3 = \pm \sqrt{B8A4 - A1B8} = \pm \sqrt{B8(A4 - A1)} \quad (4.24)$$

Si en lugar de los ensayos A4, A1 y B8 se hubieran considerado los ensayos A4-B8-B5 se tendría:

$$\text{Ensayo A4: } Z_1 = A4 - Z_3 \quad (4.25)$$

$$\text{Ensayo B8: } Z_2 = B8 - Z_3 \quad (4.26)$$

$$\text{Ensayo B5: } B5 = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} \quad (4.27)$$

$$Z_3 = \pm \sqrt{A4B8 - B5A4} = \pm \sqrt{A4(B8 - B5)} \quad (4.28)$$

- Si solamente se dispone de los ensayos A4 o B8 (en lo que sigue se supone A4), además de A1 y B5, se puede resolver el sistema de ecuaciones (orden 2).

-Se puede utilizar como hipótesis simplificativa que  $Z_1 \ll Z_3$  o  $Z_2 \ll Z_3$ . La hipótesis más lógica parece suponer que se desprecia la impedancia del arrollamiento intermedio. Por ejemplo en una configuración BT-AT-Cuba supondríamos  $Z_1 \ll Z_3$  en la ecuación del ensayo B5.

Resolviendo se llega a:

$$Z_3 = A4 - Z_1 \quad (4.29)$$

$$Z_2 = B5 - Z_1 \quad (4.30)$$

$$Z_1 = A1 \pm \sqrt{A1^2 - A1B5 - A1A4 + B5A4} \quad (4.31)$$

## 4.5. ENSAYOS EN FÁBRICA

En el transformador de características 45/16,05 kV y potencia 25 MVA se aplicó el conjunto de ensayos que permite una caracterización completa de la impedancia homopolar. En este transformador se realizaron 8 ensayos de caracterización de la impedancia a secuencia homopolar en fábrica, dando los siguientes resultados:

A) Ensayos alimentando el arrollamiento de 45 kV:

1. Ensayo con el arrollamiento de 16,05 kV cortocircuitado y el arrollamiento terciario a triángulo abierto.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN FÁBRICA							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	kW	Ω	%		Ω	Ω
A1	Alimentado	Cortocircuitado	Abierto	1	1020	285,6	28,1	10,714	10,178	0,096	1,034	10,664
	Alimentado	Cortocircuitado	Abierto	11	870	331,2	26,5	7,880	9,729	0,092	0,725	7,847
	Alimentado	Cortocircuitado	Abierto	21	720	372	24,8	5,806	9,692	0,093	0,538	5,782

Tabla 4.1. Ensayo A1 en fábrica

En la tabla 4.1, los valores base para expresar la impedancia en porcentaje son los mostrados en la tabla 4.2. Estos valores base serán los utilizados también para el resto de ensayos:

TRANSFORMADOR	POSICIÓN	TENSIÓN (kV)	INTENSIDAD (A)	POTENCIA (MVA)	IMPEDANCIA BASE
45/16,05 kV 25 MVA	AT 1	51,3	281,36	25	105,27
	AT 11	45	320,75	25	81,00
	AT 21	38,7	372,97	25	59,91
	BT	16,05	899,30	25	10,30
	T	10	480,93	8,33	12,00

Tabla 4.2. Valores base característicos del transformador de características 45/16,05 kV y 25 MVA

2. Ensayo con el arrollamiento de 16,05 kV cortocircuitado y el arrollamiento terciario a triángulo cerrado.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN FÁBRICA							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	kW	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
A2	Alimentado	Cortocircuitado	Cerrado	1	1020	292,8	31,7	10,451	9,928	0,106	1,109	10,392
	Alimentado	Cortocircuitado	Cerrado	11	870	340,8	30,6	7,658	9,455	0,103	0,790	7,618
	Alimentado	Cortocircuitado	Cerrado	21	720	382,8	28,9	5,643	9,419	0,105	0,592	5,612

Tabla 4.3. Ensayo A2 en fábrica

3. Ensayo con el arrollamiento de 16,05 kV abierto y el arrollamiento terciario a triángulo cerrado.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN FÁBRICA							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	kW	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
A3	Alimentado	Abierto	Cerrado	1	585	98,7	7,74	17,781	16,891	0,134	2,384	17,621
	Alimentado	Abierto	Cerrado	11	495	111,3	7,15	13,342	16,472	0,130	1,732	13,229
	Alimentado	Abierto	Cerrado	21	420	126	6,65	10,000	16,692	0,126	1,257	9,921

Tabla 4.4. Ensayo A3 en fábrica

4. Ensayo con el arrollamiento de 16,05 kV abierto y el arrollamiento terciario a triángulo abierto.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN FÁBRICA							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	kW	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
A4	Alimentado	Abierto	Abierto	1	2300	88,2	74,8	78,231	74,315	0,369	28,846	72,719
	Alimentado	Abierto	Abierto		2600	101,4	95,1	76,923	73,072	0,361	27,748	71,744
	Alimentado	Abierto	Abierto		2900	115,8	119,2	75,130	71,368	0,355	26,667	70,237
	Alimentado	Abierto	Abierto		3267	132,6	150	73,914	70,214	0,346	25,593	69,342
	Alimentado	Abierto	Abierto		2000	98,7	0,07	60,790	75,050	0,000	0,022	60,790
	Alimentado	Abierto	Abierto	11	2300	116,1	0,08	59,432	73,372	0,000	0,018	59,432
	Alimentado	Abierto	Abierto		2600	133,8	0,12	58,296	71,970	0,000	0,020	58,296
	Alimentado	Abierto	Abierto		2900	152,1	0,15	57,199	70,616	0,000	0,019	57,199
	Alimentado	Abierto	Abierto		1700	110,4	66,1	46,196	77,108	0,352	16,270	43,236
	Alimentado	Abierto	Abierto		2000	134,7	92,9	44,543	74,351	0,345	15,360	41,811
	Alimentado	Abierto	Abierto	21	2200	149,1	110,7	44,266	73,887	0,337	14,939	41,669
	Alimentado	Abierto	Abierto		2500	173,4	142,9	43,253	72,196	0,330	14,258	40,835

Tabla 4.5. Ensayo A4 en fábrica

B) Ensayos alimentando el arrollamiento de 16,05 kV:

5. Ensayo con el arrollamiento de 45 kV cortocircuitado y el arrollamiento terciario a triángulo abierto.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN FÁBRICA							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	kW	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
B5	Cortocircuitado	Alimentado	Abierto	1	105	267,6	1,17	1,177	11,428	0,042	0,049	1,176
	Cortocircuitado	Alimentado	Abierto	11	105	283,8	1,31	1,110	10,776	0,044	0,049	1,109
	Cortocircuitado	Alimentado	Abierto	21	105	291	1,71	1,082	10,509	0,056	0,061	1,081

Tabla 4.6. Ensayo B5 en fábrica

6. Ensayo con el arrollamiento de 45 kV cortocircuitado y el arrollamiento terciario a triángulo cerrado.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN FÁBRICA							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	kW	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
B6	Cortocircuitado	Alimentado	Cerrado	1	35	298,8	1,56	0,351	3,412	0,149	0,052	0,347
	Cortocircuitado	Alimentado	Cerrado	11	35	308,4	1,62	0,340	3,306	0,150	0,051	0,337
	Cortocircuitado	Alimentado	Cerrado	21	35	313,2	1,71	0,335	3,255	0,156	0,052	0,331

Tabla 4.7. Ensayo B6 en fábrica

7. Ensayo con el arrollamiento de 45 kV abierto y el arrollamiento terciario a triángulo cerrado.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN FÁBRICA							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	kW	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
B7	Abierto	Alimentado	Cerrado	1								
	Abierto	Alimentado	Cerrado	11	60	308,4	3,41	0,584	5,667	0,184	0,108	0,574
	Abierto	Alimentado	Cerrado	21								

Tabla 4.8. Ensayo B7 en fábrica

8. Ensayo con el arrollamiento de 45 kV abierto y el arrollamiento terciario a triángulo abierto.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN FÁBRICA							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	kW	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
B8	Abierto	Alimentado	Abierto		720	240	0,06	9,000	87,379	0,330	14,258	40,835
	Abierto	Alimentado	Abierto		810	273,6	0,07	8,882	86,229	0,000	0,003	9,000
	Abierto	Alimentado	Abierto		930	321,6	0,09	8,675	84,227	0,000	0,003	8,882
	Abierto	Alimentado	Abierto		1020	356,4	0,11	8,586	83,358	0,000	0,003	8,675

Tabla 4.9. Ensayo B8 en fábrica

## 4.5.1. EJEMPLO DE CÁLCULO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE CON RESULTADOS DE ENSAYOS EN FÁBRICA

A continuación se muestra el caso del transformador real de características 45/16,05 kV y 25 MVA, citado anteriormente, para ilustrar los procedimientos de cálculo de circuito equivalente expuestos.

La norma IEC 60076-1 especifica que los ensayos de determinación de la impedancia homopolar serán objeto de un acuerdo entre el fabricante y el comprador. Esto ha hecho que hasta ahora no haya habido una uniformidad de criterios entre fabricantes para realizar unos ensayos concretos para la determinación de la impedancia homopolar, sino que cada fabricante ha llevado a cabo los ensayos escogidos por él mismo. Por ello, en algunos casos se podría encontrar que el número de ensayos es insuficiente para calcular alguno de los circuitos equivalentes.

### TRANSFORMADOR 45/15 KV-25 MVA

Un (AT)-pos1	51,30 kV	Disposición arrollamientos	Core-TER-BT-AT-Reg
Un (AT)-pos11	45,00 kV	Regulación	AT Inversor
Un (AT)-pos21	38,70 kV	Sbase	25 MVA
Un (BT)	16,05 kV	Ubase	45 kV
Un (TER)	10 kV	Zbase	81,00 Ohmios
Sn (AT)=Sn(BT)	25 MVA		
Sn (TER)	8,33 MVA		

		Pos 1	Pos 11	Pos 21	Energ.	Cortoc.	TER
Impedancias Secuencia Homopolar (%) (Ensayos en fábrica)	Ens. A3	16,90	16,50	16,70	AT	-	Cerrado
	Ens. A2	9,93	9,46	9,42	AT	BT	Cerrado
	Ens. B7	5,66	5,66	5,66	BT	-	Cerrado
	Ens. B6	3,41	3,30	3,25	BT	AT	Cerrado
	Ens. A4	74,30	75,10	77,10	AT	-	Abierto
	Ens. A1	10,20	9,73	9,69	AT	BT	Abierto
	Ens. B8	83,30	83,30	83,30	BT	-	Abierto
	Ens. B5	11,40	10,80	10,50	BT	AT	Abierto

Tabla 4.10. Impedancias de secuencia homopolar obtenidas de los ensayos en fábrica del transformador de características 45/15 kV y 25 MVA

- Circuito equivalente con terciario cerrado
  - a) Resolución con ensayos A3-A2-B7 y signo positivo para  $Z_0$  TER

Posición 1:

$$Z_3 = \pm\sqrt{A3B7 - A2B7} = \pm\sqrt{B7(A3 - A2)} = +\sqrt{5,66(16,90 - 9,93)} = 6,28\%$$

$$Z_1 = A3 - Z_3 = 16,90 - 6,28 = 10,62\%$$

$$Z_2 = B7 - Z_3 = 5,66 - 6,38 = -0,62\%$$

$$B6_{teórico} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} = -0,62 + \frac{10,62 \cdot 6,28}{10,62 + 6,28} = 3,33\%$$

$$B6_{real} = 3,41\%$$

$$Error = \frac{3,33 - 3,41}{3,33} \cdot 100 = -2,40\%$$

Posición 11:

$$Z_3 = \pm\sqrt{A3B7 - A2B7} = \pm\sqrt{B7(A3 - A2)} = +\sqrt{5,66(16,50 - 9,46)} = 6,31\%$$

$$Z_1 = A3 - Z_3 = 16,50 - 6,31 = 10,19\%$$

$$Z_2 = B7 - Z_3 = 5,66 - 6,31 = -0,65\%$$

$$B6_{teórico} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} = -0,65 + \frac{10,19 \cdot 6,31}{10,19 + 6,31} = 3,25\%$$

$$B6_{real} = 3,30\%$$

$$Error = \frac{3,25 - 3,30}{3,25} \cdot 100 = -1,54\%$$

Posición 21:

$$Z_3 = \pm\sqrt{A3B7 - A2B7} = \pm\sqrt{B7(A3 - A2)} = +\sqrt{5,66(16,70 - 9,42)} = 6,42\%$$

$$Z_1 = A3 - Z_3 = 16,70 - 6,42 = 10,28\%$$

$$Z_2 = B7 - Z_3 = 5,66 - 6,42 = -0,76\%$$

$$B6_{teórico} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} = -0,76 + \frac{10,28 \cdot 6,42}{10,28 + 6,42} = 3,19\%$$

$$B6_{real} = 3,25\%$$

$$Error = \frac{3,19 - 3,25}{3,19} \cdot 100 = -1,88\%$$

b) Resolución con ensayos A3-B7-B6 y signo positivo para  $Z_0$  TER

Posición 1:

$$Z_3 = \pm\sqrt{B7A3 - B6A3} = \pm\sqrt{A3(B7 - B6)} = +\sqrt{16,90(5,66 - 3,41)} = 6,17\%$$

$$Z_1 = A3 - Z_3 = 16,90 - 6,17 = 10,73\%$$

$$Z_2 = B7 - Z_3 = 5,66 - 6,17 = -0,51\%$$

$$A2_{teórico} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = 10,73 + \frac{(-0,51 \cdot 6,17)}{-0,51 + 6,17} = 10,17\%$$

$$A2_{real} = 9,93\%$$

$$Error = \frac{10,17 - 9,93}{10,17} \cdot 100 = 2,36\%$$

Posición 11:

$$Z_3 = \pm\sqrt{B7A3 - B6A3} = \pm\sqrt{A3(B7 - B6)} = +\sqrt{16,50(5,66 - 3,30)} = 6,24\%$$

$$Z_1 = A3 - Z_3 = 16,50 - 6,24 = 10,26\%$$

$$Z_2 = B7 - Z_3 = 5,66 - 6,24 = -0,58\%$$

$$A2_{teórico} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = 10,26 + \frac{(-0,58 \cdot 6,24)}{-0,58 + 6,24} = 9,62\%$$

$$A2_{real} = 9,46\%$$

$$Error = \frac{9,62 - 9,46}{9,62} \cdot 100 = 1,66\%$$

Posición 21:

$$Z_3 = \pm\sqrt{B7A3 - B6A3} = \pm\sqrt{A3(B7 - B6)} = +\sqrt{16,70(5,66 - 3,25)} = 6,34\%$$

$$Z_1 = A3 - Z_3 = 16,70 - 6,34 = 10,36\%$$

$$Z_2 = B7 - Z_3 = 5,66 - 6,34 = -0,68\%$$

$$A2_{teórico} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = 10,36 + \frac{(-0,68 \cdot 6,34)}{-0,68 + 6,34} = 9,60\%$$

$$A2_{real} = 9,42\%$$

$$Error = \frac{9,60 - 9,42}{9,60} \cdot 100 = 1,87\%$$

- Circuito equivalente con terciario abierto
  - a) Resolución con ensayos A4-A1-B8 y signo positivo para  $Z_0$  TER

Posición 1:

$$Z_3 = \pm\sqrt{B8A4 - A1B8} = \pm\sqrt{B8(A4 - A1)} = +\sqrt{83,30(74,30 - 10,20)} = 73,07\%$$

$$Z_1 = A4 - Z_3 = 74,30 - 73,07 = 1,23\%$$

$$Z_2 = B8 - Z_3 = 83,30 - 73,07 = 10,23\%$$

$$B5_{teórico} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} = 10,23 + \frac{1,23 \cdot 73,07}{1,23 + 73,07} = 11,44\%$$

$$B5_{real} = 11,40\%$$

$$Error = \frac{11,44 - 11,40}{11,44} \cdot 100 = 0,35\%$$

Posición 11:

$$Z_3 = \pm\sqrt{B8A4 - A1B8} = \pm\sqrt{B8(A4 - A1)} = +\sqrt{83,30(75,10 - 9,73)} = 73,79\%$$

$$Z_1 = A4 - Z_3 = 75,10 - 73,79 = 1,31\%$$

$$Z_2 = B8 - Z_3 = 83,30 - 73,79 = 9,51\%$$

$$B5_{teórico} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} = 9,51 + \frac{1,31 \cdot 73,79}{1,31 + 73,79} = 10,80\%$$

$$B5_{real} = 10,80\%$$

$$Error = 0\%$$

Posición 21:

$$Z_3 = \pm\sqrt{B8A4 - A1B8} = \pm\sqrt{B8(A4 - A1)} = +\sqrt{83,30(77,10 - 9,69)} = 74,93\%$$

$$Z_1 = A4 - Z_3 = 77,10 - 74,93 = 2,17\%$$

$$Z_2 = B8 - Z_3 = 83,30 - 74,93 = 8,37\%$$

$$B5_{teórico} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} = 8,37 + \frac{2,17 \cdot 74,93}{2,17 + 74,93} = 10,48\%$$

$$B5_{real} = 10,50\%$$

$$Error = \frac{10,48 - 10,50}{10,48} \cdot 100 = -0,19\%$$

b) Resolución con ensayos A4-B8-B5 y signo positivo para  $Z_0$  TER

Posición 1:

$$Z_3 = \pm\sqrt{A4B8 - B5A4} = \pm\sqrt{A4(B8 - B5)} = +\sqrt{74,30(83,30 - 11,40)} = 73,09\%$$

$$Z_1 = A4 - Z_3 = 74,30 - 73,09 = 1,21\%$$

$$Z_2 = B8 - Z_3 = 83,30 - 73,09 = 10,21\%$$

$$Al_{teórico} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = 1,21 + \frac{10,21 \cdot 73,09}{10,21 + 73,09} = 10,17\%$$

$$Al_{real} = 10,20\%$$

$$Error = \frac{10,17 - 10,20}{10,17} \cdot 100 = -0,29\%$$

Posición 11:

$$Z_3 = \pm\sqrt{A4B8 - B5A4} = \pm\sqrt{A4(B8 - B5)} = +\sqrt{75,10(83,30 - 10,80)} = 73,79\%$$

$$Z_1 = A4 - Z_3 = 75,10 - 73,79 = 1,31\%$$

$$Z_2 = B8 - Z_3 = 83,30 - 73,79 = 9,51\%$$

$$Al_{teórico} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = 1,31 + \frac{9,51 \cdot 73,79}{9,51 + 73,79} = 9,73\%$$

$$Al_{real} = 9,73\%$$

$$Error = 0\%$$

Posición 21:

$$Z_3 = \pm\sqrt{A4B8 - B5A4} = \pm\sqrt{A4(B8 - B5)} = +\sqrt{77,10(83,30 - 10,50)} = 74,92\%$$

$$Z_1 = A4 - Z_3 = 77,10 - 74,92 = 2,18\%$$

$$Z_2 = B8 - Z_3 = 83,30 - 74,92 = 8,38\%$$

$$Al_{teórico} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = 2,18 + \frac{8,38 \cdot 74,92}{8,38 + 74,92} = 9,72\%$$

$$Al_{real} = 9,69\%$$

$$Error = \frac{9,72 - 9,69}{9,72} \cdot 100 = 0,31\%$$

De los resultados obtenidos se desprende que los ensayos realizados con terciario cerrado y con terciario abierto conducen a circuitos equivalentes con diferente valor de los parámetros en uno y otro caso.

También se observa que en el caso de que el arrollamiento terciario esté cerrado, los parámetros del circuito equivalente ante secuencia homopolar (en %) calculados utilizando los ensayos A3-A2-B7 son muy semejantes a los obtenidos mediante los ensayos A3-B7-B6. Lo mismo ocurre para el caso de impedancias de secuencia homopolar sin terciario al tomar los ensayos A4-A1-B8 o los ensayos A4-B8-B5. Esto muestra que el número mínimo de ensayos es 6, pero el realizar ocho ensayos puede servir para comprobar los resultados obtenidos.

## 4.6. ENSAYOS EN CAMPO

Se realizaron ocho ensayos de caracterización de la impedancia a secuencia homopolar en campo sobre el mismo transformador que el apartado anterior, que se indican seguidamente. En seis de los ensayos realizados (de A1 a A3 y de B5 a B7) el comportamiento del transformador es lineal. Este aspecto se comprobó realizando el ensayo a 2 ó 3 valores de tensión; en estos casos se pudo comprobar que la impedancia obtenida no depende de la tensión aplicada. Debido a ello en las tablas 4.11 a 4.13 y 4.15 a 4.17 siguientes sólo se indican los resultados a una de las tensiones. Estos ensayos en los que el transformador se comporta de una forma lineal con la tensión aplicada son los ensayos en los que uno de los arrollamientos está cortocircuitado o en los que el triángulo del terciario está cerrado o ambas cosas, y ya que un triángulo cerrado permite la circulación de corrientes homopolares con sólo la oposición de la pequeña impedancia del arrollamiento, nos referiremos a este tipo de ensayos en lo sucesivo como “ensayos con al menos un arrollamiento en cortocircuito”.

No obstante, en dos de los ensayos (ensayos A4 y B8 descritos seguidamente) no circula corriente homopolar más que por el arrollamiento alimentado. En estas circunstancias el comportamiento del transformador es no lineal porque la impedancia depende de la tensión aplicada. Debido a ello, en las tablas 4.14 y 4.18 siguientes se indica el resultado de la medida para diferentes valores de tensión. Lamentablemente la tensión proporcionada por el equipo con el que se llevó a cabo la medida es muy reducida, con lo que no se ha conseguido llegar a valores de tensión semejantes a los que se utilizaron en fábrica para hacer los ensayos equivalentes.

A) Ensayos alimentando el arrollamiento de 45 kV:

1. Ensayo con el arrollamiento de 16,05 kV cortocircuitado y el arrollamiento terciario a triángulo abierto.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN CAMPO							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	W	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
A1	Alimentado	Cortocircuitado	Abierto	1	52,35	15,06	71,13	10,428	9,906	0,090	0,941	10,386
	Alimentado	Cortocircuitado	Abierto	11	38,37	15,06	54,64	7,643	9,436	0,095	0,723	7,609
	Alimentado	Cortocircuitado	Abierto	21	29,39	15,54	40,99	5,674	9,470	0,090	0,509	5,651

Tabla 4.11. Ensayo A1 en campo

2. Ensayo con el arrollamiento de 16,05 kV cortocircuitado y el arrollamiento terciario a triángulo cerrado.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN CAMPO							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	W	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
A2	Alimentado	Cortocircuitado	Cerrado	1	31,16	9,09	42,05	10,284	9,769	0,148	1,527	10,170
	Alimentado	Cortocircuitado	Cerrado	11	37,78	14,96	88,94	7,576	9,353	0,157	1,192	7,482
	Alimentado	Cortocircuitado	Cerrado	21	28,28	15,1	68,05	5,619	9,378	0,159	0,895	5,547

Tabla 4.12. Ensayo A2 en campo

3. Ensayo con el arrollamiento de 16,05 kV abierto y el arrollamiento terciario a triángulo cerrado.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN CAMPO							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	W	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
A3	Alimentado	Abierto	Cerrado	1	85,12	15,05	154,2	16,967	16,118	0,120	2,042	16,844
	Alimentado	Abierto	Cerrado	11	64,74	15,21	112,5	12,769	15,764	0,114	1,459	12,686
	Alimentado	Abierto	Cerrado	21	48,65	15,25	81,97	9,570	15,975	0,110	1,057	9,512

Tabla 4.13. Ensayo A3 en campo

4. Ensayo con el arrollamiento de 16,05 kV abierto y el arrollamiento terciario a triángulo abierto.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN CAMPO							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	W	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
A4	Alimentado	Abierto	Abierto	1	108,6	4,161	145,9	78,298	74,379	0,323	25,280	74,105
	Alimentado	Abierto	Abierto		173,7	6,314	381,7	82,531	78,399	0,348	28,723	77,371
	Alimentado	Abierto	Abierto		249,6	8,681	792,4	86,257	81,939	0,366	31,545	80,282
	Alimentado	Abierto	Abierto	11	103,1	5,061	166,9	61,114	75,450	0,320	19,548	57,904
	Alimentado	Abierto	Abierto		208,2	9,434	702,7	66,207	81,737	0,358	23,686	61,825
	Alimentado	Abierto	Abierto		246,9	10,98	989,8	67,459	83,283	0,365	24,630	62,802
	Alimentado	Abierto	Abierto	21	75,87	5,048	114,5	45,089	75,261	0,299	13,480	43,027
	Alimentado	Abierto	Abierto		163,8	10,07	559,1	48,798	81,453	0,339	16,541	45,910
	Alimentado	Abierto	Abierto		231,9	13,66	1139	50,930	85,010	0,360	18,312	47,524

Tabla 4.14. Ensayo A4 en campo

B) Ensayos alimentando el arrollamiento de 16,05 kV:

5. Ensayo con el arrollamiento de 45 kV cortocircuitado y el arrollamiento terciario a triángulo abierto.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN CAMPO							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	W	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
B5	Cortocircuitado	Alimentado	Abierto	1	5,431	13,91	3,59	1,171	11,372	0,048	0,056	1,170
	Cortocircuitado	Alimentado	Abierto	11	5,987	16,23	4,826	1,107	10,744	0,050	0,055	1,105
	Cortocircuitado	Alimentado	Abierto	21	5,348	14,72	4,997	1,090	10,582	0,063	0,069	1,088

Tabla 4.15. Ensayo B5 en campo

6. Ensayo con el arrollamiento de 45 kV cortocircuitado y el arrollamiento terciario a triángulo cerrado.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN CAMPO							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	W	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
B6	Cortocircuitado	Alimentado	Cerrado	1	1,739	14,93	4,516	0,349	3,393	0,174	0,061	0,344
	Cortocircuitado	Alimentado	Cerrado	11	1,788	15,83	4,989	0,339	3,290	0,176	0,060	0,334
	Cortocircuitado	Alimentado	Cerrado	21	1,848	16,56	5,616	0,335	3,250	0,184	0,061	0,329

Tabla 4.16. Ensayo B6 en campo

7. Ensayo con el arrollamiento de 45 kV abierto y el arrollamiento terciario a triángulo cerrado.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN CAMPO								
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA	
					V	A	W	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$	
B7	Abierto	Alimentado	Cerrado	1									
	Abierto	Alimentado	Cerrado	11	3,099	16,17	9,355	0,575	5,582	0,187	0,107	0,565	
	Abierto	Alimentado	Cerrado	21									

Tabla 4.17. Ensayo B7 en campo

8. Ensayo con el arrollamiento de 45 kV abierto y el arrollamiento terciario a triángulo abierto.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ENSAYO EN CAMPO							
					TENSIÓN	INTENSIDAD	POTENCIA	IMPEDANCIA HOMOPOLAR		FdP	RESISTENCIA	REACTANCIA
					V	A	W	$\Omega$	%		$\Omega$	$\Omega$
B8	Abierto	Alimentado	Abierto		13,82	5,024	17,07	8,252	80,120	0,246	2,029	7,999
	Abierto	Alimentado	Abierto		60,16	19,88	352,8	9,078	88,140	0,295	2,678	8,674
	Abierto	Alimentado	Abierto		74,61	24,09	554	9,291	90,208	0,308	2,864	8,839
	Abierto	Alimentado	Abierto									

Tabla 4.18. Ensayo B8 en campo

## 4.6.1. EJEMPLO DE CÁLCULO DEL CIRCUITO EQUIVALENTE CON RESULTADOS DE ENSAYOS EN CAMPO

A continuación se muestra el caso del transformador real de características 45/16,05 kV y 25 MVA, citado anteriormente, con el cálculo del circuito equivalente a partir de los resultados obtenidos en los ensayos en campo.

### TRANSFORMADOR 45/15 KV-25 MVA

Un (AT)-pos1	51,30 kV	Disposición arrollamientos	Core-TER-BT-AT-Reg
Un (AT)-pos11	45,00 kV	Regulación	AT Inversor
Un (AT)-pos21	38,70 kV	Sbase	25 MVA
Un (BT)	16,05 kV	Ubase	45 kV
Un (TER)	10 kV	Zbase	81,00 Ohmios
Sn (AT)=Sn(BT)	25 MVA		
Sn (TER)	8,33 MVA		

		Pos 1	Pos 11	Pos 21	Energ.	Cortoc.	TER
Impedancias Secuencia Homopolar (%) (Ensayos en campo)	Ens. A3	16,19	15,76	15,97	AT	-	Cerrado
	Ens. A2	9,77	9,35	9,38	AT	BT	Cerrado
	Ens. B7	5,58	5,58	5,58	BT	-	Cerrado
	Ens. B6	3,39	3,29	3,25	BT	AT	Cerrado
	Ens. A4	74,38	75,45	75,26	AT	-	Abierto
	Ens. A1	9,91	9,44	9,47	AT	BT	Abierto
	Ens. B8	80,12	80,12	80,12	BT	-	Abierto
	Ens. B5	11,37	10,74	10,58	BT	AT	Abierto

Tabla 4.19. Impedancias de secuencia homopolar obtenidas de los ensayos en fábrica del transformador de características 45/15 kV y 25 MVA

- Circuito equivalente con terciario cerrado

a) Resolución con ensayos A3-A2-B7 y signo positivo para  $Z_0$  TER

Posición 1:

$$Z_3 = \pm\sqrt{A3B7 - A2B7} = \pm\sqrt{B7(A3 - A2)} = +\sqrt{5,58(16,19 - 9,77)} = 5,98\%$$

$$Z_1 = A3 - Z_3 = 16,19 - 5,98 = 10,21\%$$

$$Z_2 = B7 - Z_3 = 5,58 - 5,98 = -0,40\%$$

$$B6_{teórico} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} = -0,40 + \frac{10,21 \cdot 5,98}{10,21 + 5,98} = 3,37\%$$

$$B6_{real} = 3,39\%$$

$$Error = \frac{3,37 - 3,39}{3,37} \cdot 100 = -0,59\%$$

Posición 11:

$$Z_3 = \pm\sqrt{A3B7 - A2B7} = \pm\sqrt{B7(A3 - A2)} = +\sqrt{5,58(15,76 - 9,35)} = 5,98\%$$

$$Z_1 = A3 - Z_3 = 15,76 - 5,98 = 9,78\%$$

$$Z_2 = B7 - Z_3 = 5,58 - 5,98 = -0,40\%$$

$$B6_{teórico} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} = -0,40 + \frac{9,78 \cdot 5,98}{9,78 + 5,98} = 3,31\%$$

$$B6_{real} = 3,29\%$$

$$Error = \frac{3,31 - 3,29}{3,31} \cdot 100 = 0,60\%$$

Posición 21:

$$Z_3 = \pm\sqrt{A3B7 - A2B7} = \pm\sqrt{B7(A3 - A2)} = +\sqrt{5,58(15,97 - 9,38)} = 6,06\%$$

$$Z_1 = A3 - Z_3 = 15,97 - 6,06 = 9,91\%$$

$$Z_2 = B7 - Z_3 = 5,58 - 6,06 = -0,48\%$$

$$B6_{teórico} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} = -0,48 + \frac{9,91 \cdot 6,06}{9,91 + 6,06} = 3,28\%$$

$$B6_{real} = 3,25\%$$

$$Error = \frac{3,28 - 3,25}{3,28} \cdot 100 = 0,91\%$$

b) Resolución con ensayos A3-B7-B6 y signo positivo para  $Z_0$  TER

Posición 1:

$$Z_3 = \pm\sqrt{B7A3 - B6A3} = \pm\sqrt{A3(B7 - B6)} = +\sqrt{16,19(5,58 - 3,39)} = 5,95\%$$

$$Z_1 = A3 - Z_3 = 16,19 - 5,95 = 10,24\%$$

$$Z_2 = B7 - Z_3 = 5,58 - 5,95 = -0,37\%$$

$$A2_{teórico} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = 10,24 + \frac{(-0,37 \cdot 5,95)}{-0,37 + 5,95} = 9,84\%$$

$$A2_{real} = 9,77\%$$

$$Error = \frac{9,84 - 9,77}{9,84} \cdot 100 = 0,71\%$$

Posición 11:

$$Z_3 = \pm\sqrt{B7A3 - B6A3} = \pm\sqrt{A3(B7 - B6)} = +\sqrt{15,76(5,58 - 3,29)} = 6,01\%$$

$$Z_1 = A3 - Z_3 = 15,76 - 6,01 = 9,75\%$$

$$Z_2 = B7 - Z_3 = 5,58 - 6,01 = -0,43\%$$

$$A2_{teórico} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = 9,75 + \frac{(-0,43 \cdot 6,01)}{-0,43 + 6,01} = 9,29\%$$

$$A2_{real} = 9,35\%$$

$$Error = \frac{9,29 - 9,35}{9,29} \cdot 100 = -0,65\%$$

Posición 21:

$$Z_3 = \pm\sqrt{B7A3 - B6A3} = \pm\sqrt{A3(B7 - B6)} = +\sqrt{15,97(5,58 - 3,25)} = 6,10\%$$

$$Z_1 = A3 - Z_3 = 15,97 - 6,10 = 9,87\%$$

$$Z_2 = B7 - Z_3 = 5,58 - 6,10 = -0,52\%$$

$$A2_{teórico} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = 9,87 + \frac{(-0,52 \cdot 6,10)}{-0,52 + 6,10} = 9,30\%$$

$$A2_{real} = 9,38\%$$

$$Error = \frac{9,30 - 9,38}{9,30} \cdot 100 = -0,86\%$$

- Circuito equivalente con terciario abierto

a) Resolución con ensayos A4-A1-B8 y signo positivo para  $Z_0$  TER

Posición 1:

$$Z_3 = \pm\sqrt{B8A4 - A1B8} = \pm\sqrt{B8(A4 - A1)} = +\sqrt{80,12(74,38 - 9,91)} = 71,87\%$$

$$Z_1 = A4 - Z_3 = 74,38 - 71,87 = 2,51\%$$

$$Z_2 = B8 - Z_3 = 80,12 - 71,87 = 8,25\%$$

$$B5_{teórico} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} = 8,25 + \frac{2,51 \cdot 71,87}{2,51 + 71,87} = 10,67\%$$

$$B5_{real} = 11,37\%$$

$$Error = \frac{10,67 - 11,37}{10,67} \cdot 100 = -6,56\%$$

Posición 11:

$$Z_3 = \pm\sqrt{B8A4 - A1B8} = \pm\sqrt{B8(A4 - A1)} = +\sqrt{80,12(75,45 - 9,44)} = 72,72\%$$

$$Z_1 = A4 - Z_3 = 75,45 - 72,72 = 2,73\%$$

$$Z_2 = B8 - Z_3 = 80,12 - 72,72 = 7,4\%$$

$$B5_{teórico} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} = 7,4 + \frac{2,73 \cdot 72,72}{2,73 + 72,72} = 10,03\%$$

$$B5_{real} = 10,74\%$$

$$Error = \frac{10,03 - 10,74}{10,03} \cdot 100 = -7,08\%$$

Posición 21:

$$Z_3 = \pm\sqrt{B8A4 - A1B8} = \pm\sqrt{B8(A4 - A1)} = +\sqrt{80,12(75,26 - 9,47)} = 72,60\%$$

$$Z_1 = A4 - Z_3 = 75,26 - 72,60 = 2,66\%$$

$$Z_2 = B8 - Z_3 = 80,12 - 72,60 = 7,52\%$$

$$B5_{teórico} = Z_2 + \frac{Z_1 Z_3}{Z_1 + Z_3} = 7,52 + \frac{2,66 \cdot 72,60}{2,66 + 72,60} = 10,09\%$$

$$B5_{real} = 10,58\%$$

$$Error = \frac{10,09 - 10,58}{10,09} \cdot 100 = -4,86\%$$

b) Resolución con ensayos A4-B8-B5 y signo positivo para  $Z_0$  TER

Posición 1:

$$Z_3 = \pm\sqrt{A4B8 - B5A4} = \pm\sqrt{A4(B8 - B5)} = +\sqrt{74,38(80,12 - 11,37)} = 71,51\%$$

$$Z_1 = A4 - Z_3 = 74,38 - 71,51 = 2,87\%$$

$$Z_2 = B8 - Z_3 = 80,12 - 71,51 = 8,61\%$$

$$A1_{teórico} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = 2,87 + \frac{8,61 \cdot 71,51}{8,61 + 71,51} = 10,55\%$$

$$A1_{real} = 9,91\%$$

$$Error = \frac{10,55 - 9,91}{10,55} \cdot 100 = 6,07\%$$

Posición 11:

$$Z_3 = \pm\sqrt{A4B8 - B5A4} = \pm\sqrt{A4(B8 - B5)} = +\sqrt{75,45(80,12 - 10,74)} = 72,35\%$$

$$Z_1 = A4 - Z_3 = 75,45 - 72,35 = 3,10\%$$

$$Z_2 = B8 - Z_3 = 80,12 - 72,35 = 7,77\%$$

$$A1_{teórico} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = 3,10 + \frac{7,77 \cdot 72,35}{7,77 + 72,35} = 10,12\%$$

$$A1_{real} = 9,44\%$$

$$Error = \frac{10,12 - 9,44}{10,12} \cdot 100 = 6,72\%$$

Posición 21:

$$Z_3 = \pm\sqrt{A4B8 - B5A4} = \pm\sqrt{A4(B8 - B5)} = +\sqrt{75,26(80,12 - 10,58)} = 72,34\%$$

$$Z_1 = A4 - Z_3 = 75,26 - 72,34 = 2,92\%$$

$$Z_2 = B8 - Z_3 = 80,12 - 72,34 = 7,78\%$$

$$Al_{teórico} = Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = 2,92 + \frac{7,78 \cdot 72,34}{7,78 + 72,34} = 9,94\%$$

$$Al_{real} = 9,47\%$$

$$Error = \frac{9,94 - 9,47}{9,94} \cdot 100 = 4,73\%$$

Al igual que en los ensayos en fábrica, los resultados obtenidos indican que los ensayos realizados con terciario cerrado y con terciario abierto conducen a circuitos equivalentes con diferente valor de los parámetros en uno y otro caso.

El razonamiento seguido para los resultados obtenidos de los ensayos en fábrica aplica también a los ensayos en campo y muestra, de igual forma, que el número mínimo de ensayos sigue siendo 6, pero el realizar ocho ensayos puede servir como comprobación a los resultados obtenidos.

## 4.7. VALIDACIÓN DEL MODELO DE CIRCUITO EQUIVALENTE EN T. CONCLUSIONES

En el caso de utilizar un circuito equivalente en T para representar el transformador ante secuencia homopolar (como es habitual), los parámetros del circuito deben ser diferentes según el triángulo esté abierto o cerrado. Por tanto en este caso se deben determinar 6 parámetros (tres ensayos permiten determinar los tres parámetros de uno de los circuitos equivalentes y el cuarto ensayo sirve como comprobación). Esto ha sido mostrado en los apartados 4.5 y 4.6 a través de ejemplos reales.

# Capítulo 5

## ANÁLISIS COMPARATIVO

### 5.1. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN FÁBRICA CON LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS EN CAMPO

La diferencia entre la impedancia a secuencia homopolar obtenida mediante los ensayos realizados en campo con las impedancias obtenidas mediante los ensayos en fábrica se muestra en las tablas 5.1 a 5.8 siguientes.

A) Ensayos alimentando el arrollamiento de 45 kV:

1. Ensayo con el arrollamiento de 16,05 kV cortocircuitado y el arrollamiento terciario a triángulo abierto.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ERROR (DIFERENCIA)		
					IMPEDANCIA	RESISTENCIA	REACTANCIA
					%	%	%
A1	Alimentado	Cortocircuitado	Abierto	1	2,669	8,964	2,612
	Alimentado	Cortocircuitado	Abierto	11	3,008	0,277	3,031
	Alimentado	Cortocircuitado	Abierto	21	2,285	5,287	2,260

Tabla 5.1. Comparación entre los ensayos A1 de fábrica y campo

2. Ensayo con el arrollamiento de 16,05 kV cortocircuitado y el arrollamiento terciario a triángulo cerrado.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ERROR (DIFERENCIA)		
					IMPEDANCIA	RESISTENCIA	REACTANCIA
					%	%	%
A2	Alimentado	Cortocircuitado	Cerrado	1	1,598	-37,633	2,135
	Alimentado	Cortocircuitado	Cerrado	11	1,074	-50,838	1,782
	Alimentado	Cortocircuitado	Cerrado	21	0,427	-51,328	1,154

Tabla 5.2. Comparación entre los ensayos A2 de fábrica y campo

3. Ensayo con el arrollamiento de 16,05 kV abierto y el arrollamiento terciario a triángulo cerrado.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ERROR (DIFERENCIA)		
					IMPEDANCIA	RESISTENCIA	REACTANCIA
					%	%	%
A3	Alimentado	Abierto	Cerrado	1	4,576	14,315	4,407
	Alimentado	Abierto	Cerrado	11	4,295	15,748	4,111
	Alimentado	Abierto	Cerrado	21	4,295	15,854	4,121

Tabla 5.3. Comparación entre los ensayos A3 de fábrica y campo

4. Ensayo con el arrollamiento de 16,05 kV abierto y el arrollamiento terciario a triángulo abierto.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ERROR (DIFERENCIA)		
					IMPEDANCIA	RESISTENCIA	REACTANCIA
					%	%	%
A4	Alimentado	Abierto	Abierto	1	-0,086	12,361	-1,906
	Alimentado	Abierto	Abierto		-7,290	-3,516	-7,843
	Alimentado	Abierto	Abierto		-14,811	-18,289	-14,301
	Alimentado	Abierto	Abierto	11	-0,533	-90581,757	4,748
	Alimentado	Abierto	Abierto		-11,401	-132930,941	-4,028
	Alimentado	Abierto	Abierto		-15,718	-122382,418	-7,729
	Alimentado	Abierto	Abierto				
	Alimentado	Abierto	Abierto	21	-1,225	12,242	-2,908
	Alimentado	Abierto	Abierto		-10,240	-10,723	-10,178
	Alimentado	Abierto	Abierto		-17,750	-28,436	-16,380

Tabla 5.4. Comparación entre los ensayos A4 de fábrica y campo

- B) Ensayos alimentando el arrollamiento de 16,05 kV:

5. Ensayo con el arrollamiento de 45 kV cortocircuitado y el arrollamiento terciario a triángulo abierto.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ERROR (DIFERENCIA)		
					IMPEDANCIA	RESISTENCIA	REACTANCIA
					%	%	%
B5	Cortocircuitado	Alimentado	Abierto	1	0,494	-13,560	0,520
	Cortocircuitado	Alimentado	Abierto	11	0,296	-12,643	0,322
	Cortocircuitado	Alimentado	Abierto	21	-0,690	-14,205	-0,645

Tabla 5.5. Comparación entre los ensayos B5 de fábrica y campo

6. Ensayo con el arrollamiento de 45 kV cortocircuitado y el arrollamiento terciario a triángulo cerrado.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ERROR (DIFERENCIA)		
					IMPEDANCIA	RESISTENCIA	REACTANCIA
					%	%	%
B6	Cortocircuitado	Alimentado	Cerrado	1	0,562	-15,950	0,970
	Cortocircuitado	Alimentado	Cerrado	11	0,475	-16,887	0,911
	Cortocircuitado	Alimentado	Cerrado	21	0,139	-17,477	0,618

Tabla 5.6. Comparación entre los ensayos B6 de fábrica y campo

7. Ensayo con el arrollamiento de 45 kV abierto y el arrollamiento terciario a triángulo cerrado.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ERROR (DIFERENCIA)		
					IMPEDANCIA	RESISTENCIA	REACTANCIA
					%	%	%
B7	Abierto	Alimentado	Cerrado	1			
	Abierto	Alimentado	Cerrado	11	1,491	0,207	1,537
	Abierto	Alimentado	Cerrado	21			

Tabla 5.7. Comparación entre los ensayos B7 de fábrica y campo

8. Ensayo con el arrollamiento de 45 kV abierto y el arrollamiento terciario a triángulo abierto.

IDENTIFICADOR DE ENSAYO	ARROLLAMIENTO AT	ARROLLAMIENTO BT	ARROLLAMIENTO T	POSICIÓN REGULADOR	ERROR (DIFERENCIA)		
					IMPEDANCIA	RESISTENCIA	REACTANCIA
					%	%	%
B8	Abierto	Alimentado	Abierto		8,307	85,770	80,411
	Abierto	Alimentado	Abierto		-2,217	-85597,282	3,617
	Abierto	Alimentado	Abierto		-4,614	-101986,969	0,479
	Abierto	Alimentado	Abierto				

Tabla 5.8. Comparación entre los ensayos B8 de fábrica y campo

Las conclusiones más significativas que se pueden obtener de la comparación de los ensayos realizados en campo con los ensayos obtenidos de fábrica son las siguientes:

- Los ensayos en campo con al menos un arrollamiento cortocircuitado arrojan resultados muy semejantes a los obtenidos en fábrica. En general, la diferencia es inferior al 3%. La parte resistiva de la impedancia difiere respecto de los ensayos en fábrica, ya que como es sabido la resistencia de un conductor depende de la temperatura.
  - Estos casos con un arrollamiento cortocircuitado o con el triángulo cerrado se comportan de forma lineal (las impedancias son iguales para cada nivel de tensión, con pequeñas diferencias inferiores al 1%).

2. En los casos en los que todos los arrollamientos no energizados están abiertos, el transformador se comporta de una forma no lineal.
  - En este caso, si el arrollamiento alimentado es el de AT, las diferencias entre las impedancias a secuencia homopolar obtenidas en fábrica y las medidas en campo llegan al 17%. Evidentemente, en campo no se llegó a medir con una tensión igual a la de fábrica.
  - En el caso de alimentar por BT con los arrollamientos de AT y T abiertos, las diferencias con los ensayos de fábrica no superan el 8%.

Para la determinación del circuito equivalente ante secuencia homopolar de un transformador sólo se precisan tres ensayos, y un cuarto ensayo se utiliza para la comprobación de resultados.

- Para el caso de que el transformador trabaje con el arrollamiento terciario cerrado se utilizarán los ensayos A2, A3, B6 y B7. En todos esos ensayos la diferencia entre los ensayos en fábrica y los ensayos en campo es reducida.
- Para el caso de que el transformador trabaje con el arrollamiento terciario abierto se utilizarán los ensayos A1, A4, B5 y B8. En este caso se presentan mayores problemas para la determinación del circuito equivalente ante secuencia homopolar, ya que dos de estos ensayos, A4 y B8, corresponden con aquellos ensayos que se comportan de forma no lineal y que, por tanto, presentan mayores errores y dependientes de la tensión a la que se realicen los ensayos.

## 5.2. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS CALCULADOS A PARTIR DE DIMENSIONES GEOMÉTRICAS CON LOS RESULTADOS DE LOS ENSAYOS EN FÁBRICA Y LOS ENSAYOS EN CAMPO

Por simplificación, para llevar a cabo la comparación entre los valores de la impedancia homopolar obtenidos mediante el cálculo realizado a partir de las dimensiones geométricas y los resultados obtenidos de los ensayos, se ha tomado el valor medio de las impedancias homopolares medidas en los ensayos en fábrica y los ensayos en campo.

Estos valores medios han sido tomados en la posición 11.

La tabla 5.9 muestra esta comparativa.

Transformador	Identificador ensayo	Impedancias calculadas (%)	Impedancias medidas (%)	Error
25 MVA 45/16,05 kV	A1	12,16%	9,58%	21,22%
	A2	11,45%	9,40%	17,90%
	A3	23,06%	16,13%	30,05%
	A4	54,21%	75,27%	-38,85%
	B5	12,16%	10,77%	11,43%
	B6	3,27%	3,29%	-0,61%
	B7	6,58%	5,62%	14,59%
	B8	67,24%	81,71%	-21,52%

Tabla 5.9. Comparación entre las impedancias calculadas a partir de las dimensiones geométricas y las impedancias medidas en los ensayos



Los errores mostrados en la tabla 5.9 entre unos valores y otros hacen que la determinación de la impedancia homopolar a partir de las dimensiones geométricas sirva para tener una estimación del orden de magnitud de la impedancia homopolar previa a la realización de los ensayos oportunos. Sin embargo, se ve que no proporciona un resultado tan fino como los ensayos. Los errores, en este caso, alcanzan hasta el 30% ya que este método de cálculo puede presentar ciertas limitaciones como imprecisiones en los detalles geométricos, modelo simplificado bidimensional no ajustable de manera perfecta a la realidad tridimensional, etc.

# Capítulo 6

## RESUMEN Y CONCLUSIONES

### 6.1. RESUMEN DEL TRABAJO REALIZADO

En el presente Proyecto Fin de Carrera se ha realizado un estudio sobre la determinación de la impedancia homopolar en transformadores de potencia. La impedancia homopolar adquiere gran importancia al intervenir en cualquier condición asimétrica que se produzca en el sistema eléctrico.

Entre las condiciones desequilibradas más importantes se encuentran los cortocircuitos desequilibrados. La cuantía de las corrientes de cortocircuito y sobretensiones que aparecen cuando tiene lugar una falta asimétrica está determinada por la cuantía de la impedancia homopolar de la red y con la impedancia homopolar de los transformadores.

Para llevar a cabo la determinación de la impedancia homopolar de los transformadores de potencia se ha analizado esta impedancia en función de los distintos grupos de conexión y tipos de núcleos magnéticos y se han presentado dos estudios importantes que permiten esta caracterización:

- La determinación de la impedancia homopolar a partir de las dimensiones geométricas.
- Los ensayos realizados para determinar la impedancia homopolar, en concreto mediante un circuito equivalente.

Los grupos de conexión y tipos de núcleos magnéticos más habituales que se han analizado son:

1. Transformadores YNyn : Diferenciación entre bancos trifásicos de transformadores monofásicos, transformadores trifásicos de tres columnas, transformadores trifásicos de cinco columnas y transformadores de núcleo trifásico acorazado.
2. Transformadores YNy
3. Transformadores Yy
4. Transformadores YNd : Diferenciación entre bancos trifásicos de transformadores monofásicos, transformadores trifásicos de tres columnas, transformadores trifásicos de cinco columnas y transformadores de núcleo trifásico acorazado.
5. Transformadores Yd
6. Transformadores YNynd

Se ha realizado un análisis preliminar de los autotransformadores, transformadores en conexión zig-zag y transformadores con doble secundario.

Se han analizado otros factores influyentes en la determinación de la impedancia homopolar como son:

- Influencia de la ubicación de los arrollamientos
- Influencia de la cuba
- Influencia de las pantallas magnéticas situadas en la cuba

Dentro de este análisis se ha determinado también el circuito equivalente ante secuencia homopolar de cada una de estas configuraciones y se han presentado algunas propuestas al modelo de circuito equivalente ante secuencia homopolar convencional.

La determinación de la impedancia homopolar a partir de las dimensiones geométricas ha sido discutida a partir de un razonamiento teórico expuesto que ha sido reafirmado con un ejemplo práctico.

Para hacer un estudio de los ensayos realizados para la determinación de la impedancia homopolar se ha fijado una distinción entre ensayos en fábrica y ensayos en campo y se ha comenzado por plasmar los ensayos propuestos por la normativa para llevar a cabo un contraste entre el conjunto de ensayos que permiten una caracterización completa de la impedancia ante secuencia homopolar y aquellos mostrados en revisiones bibliográficas. A continuación, los resultados obtenidos en ensayos reales en fábrica y en campo han permitido llevar a cabo la validación de los modelos de circuito equivalente y la definición del número de ensayos necesarios a realizar para una determinación de la impedancia homopolar.

Finalmente, se ha expuesto un análisis comparativo entre las impedancias calculadas a partir de las dimensiones geométricas, las medidas en fábricas y las medidas en campo.

Las principales conclusiones de estos estudios se indican en el siguiente apartado.

## 6.2. CONCLUSIONES

Se ha visto que la impedancia homopolar de un sistema eléctrico interviene en cualquier condición de funcionamiento en la que las condiciones sean asimétricas.

Entre las condiciones desequilibradas particularmente importantes se encuentran los cortocircuitos desequilibrados.

Debido al contexto actual de los sistemas eléctricos, caracterizado por unas mayores exigencias en el ámbito de la calidad de suministro y por unas redes cada vez más potentes y malladas que implican mayores requerimientos en el comportamiento ante cortocircuitos, se ha mostrado que el estudio del comportamiento ante cortocircuitos tanto del propio transformador como de la red en su conjunto requiere un conocimiento detallado del comportamiento homopolar del transformador.

Del Capítulo 2, en el que se estudia la impedancia homopolar de diversas configuraciones de transformadores de potencia, se extrae que la cuantía de la impedancia homopolar depende del grupo de conexión y del tipo de núcleo magnético.

Así, por ejemplo, no presentará igual impedancia un transformador YNyn que un transformador YNynd; al igual que para un transformador YNyn tampoco presentarán igual impedancia un banco trifásico de transformadores monofásicos que un transformador trifásico de tres columnas.

Se comprueba que existen otros factores que también influyen en la cuantía de la impedancia homopolar:

- **Ubicación de los arrollamientos.** La impedancia de secuencia homopolar depende de la ubicación de los arrollamientos. Este hecho es justificado en el apartado 2.6.1 y es debido a que el flujo de dispersión del arrollamiento interno cierra su camino por el núcleo magnético mientras que el flujo disperso del arrollamiento externo cierra su camino por la cuba.
- **Cuba.** La cuba influye en la impedancia de secuencia homopolar de dos formas:
  1. Proporciona un camino de retorno de baja reluctancia (en comparación con el aire) para el flujo de secuencia homopolar, que tiene el efecto de aumentar la impedancia magnetizante (y por tanto la impedancia total).
  2. Por el contrario, la cuba que encierra las 3 fases actúa como un arrollamiento cortocircuitado reduciendo la impedancia.
- **Existencia de pantallas magnéticas en la cuba.** Un transformador que dispone de pantallas magnéticas adosadas a la cuba presenta una impedancia de secuencia homopolar comparativamente más elevada que uno que no tenga dichas pantallas, ya que el efecto de estas pantallas es reducir la reluctancia que se presenta al paso del flujo homopolar y con ello reducir la corriente magnetizante precisa para crear el flujo homopolar para un valor de la tensión homopolar dado.

El Capítulo 3, en el que se expone un razonamiento teórico para la determinación de la impedancia homopolar a partir de las dimensiones geométricas, muestra que el cálculo de la impedancia homopolar mediante este método sirve para tener una primera estimación de la cuantía de la impedancia homopolar antes de realizar los ensayos oportunos. Este hecho quedará confirmado en el Capítulo 5 de Análisis Comparativo.

Del Capítulo 4, se extrae una conclusión de los ensayos analizados para la determinación de la impedancia homopolar. Del análisis de resultados obtenidos en ensayos reales se desprende que los ensayos realizados con terciario cerrado y con terciario abierto conducen a circuitos equivalentes con diferente valor de los parámetros en uno y otro caso.

En el caso de la utilización de un circuito equivalente en T para representar el transformador ante secuencia homopolar (como es habitual), los parámetros del circuito deben ser diferentes según el triángulo esté abierto o cerrado. Por tanto en este caso se deben determinar 6 parámetros (tres ensayos permiten determinar los tres parámetros de uno de los circuitos equivalentes y el cuarto ensayo sirve como comprobación). Esto se muestra en el apartado 4.5 y 4.6 a través de un ejemplo real.

Finalmente, las conclusiones más significativas que se pueden obtener de la comparación de los ensayos realizados en campo con los ensayos obtenidos de fábrica, estudio comparativo plasmado en el Capítulo 5, son:

- Los ensayos en campo con al menos un arrollamiento cortocircuitado arrojan resultados muy semejantes a los obtenidos en fábrica. Estos casos con un arrollamiento cortocircuitado o con el triángulo cerrado se comportan de forma lineal.
- En los casos en los que todos los arrollamientos no energizados están abiertos, el transformador se comporta de una forma no lineal y las diferencias entre las impedancias a secuencia homopolar obtenidas en fábrica y las medidas en campo son mayores y dependientes de la tensión a la que se realicen los ensayos. Evidentemente, en campo no se llega a medir con una tensión similar a la de fábrica.

### **6.3. PROPUESTA DE TRABAJOS FUTUROS**

En el presente Proyecto Fin de Carrera se ha analizado en profundidad la determinación de la impedancia homopolar de los transformadores de potencia de las configuraciones más habituales.

Sería deseable realizar un estudio más detallado de aquellas configuraciones de las que ha sido realizado un análisis preliminar como son los autotransformadores y los transformadores de cuatro arrollamientos con doble secundario Split-winding.

También sería interesante, en un futuro, llevar a cabo diseños sin arrollamiento terciario para ver si la impedancia homopolar sufre un incremento importante respecto a los diseños con arrollamiento terciario abierto.

Por último, se propone como trabajo futuro, un análisis más profundo de algunos modelos de circuito equivalente alternativos citados en el texto, como son los referidos a Oels y Henriksen.

## REFERENCIAS

- [ABB03] ABB Business Area Power Transformers. "Testing of power transformers. Routine tests, Type tests and Special tests". 1ª Edition. Zurich, October 2003.
- [Bra82] Brandwajn, V. et al "Matrix representation of three-phase N-winding transformers for steady-state and transient studies". IEEE Trans on Power Apparatus and Systems. Vol PAS 101, No 6, Jun 82.
- [Chr65] Christoffel M "Zero-sequence reactances of Transformers and Reactors" The Brown Boveri Review, Vol 52 No 11/12. Nov/Dec 1965.
- [Cog59] Cogbill; "Are Stabilizing Windings Necessary in All Y-Connected Transformers?". October 1959.
- [Cop70] Coppadoro, F. "L'Impedenza alla sequenza zero dei trasformatori" Elettrificazione. N°2, Feb 1970
- [Cre75] Crespo, F. "Sobretensiones en las redes de alta tensión". ASINEL. Mayo 1975.
- [deL09] de León, F.; Martínez, J.A. "Dual Three Winding Transformer Equivalent Circuit Matching Leakage Measurements" IEEE Trans on Power Delivery, Vol 24 No 1, Jan 2009.
- [Fra03] Fraile Mora, J. "Máquinas Eléctricas". Mc Graw Hill, S.A.U. Año 2003. Quinta Edición.
- [Hen01] Henriksen, T. "Transformer leakage flux modeling". SINTEF Energy Research. 2001
- [IEC768] Norma IEC 60076-8. Transformadores de potencia-Guía de aplicación. 1997
- [IEE10] IEEE C57.12.90 "IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers". Octubre 2010.
- [J&P98] "The J&P Transformer Book. A practical technology of the power transformer". Newnes-Elsevier. 12<sup>th</sup> Edition. 1998.

- [Kul04] Kulkarni, S.V.; Khaparde, S.A. “Transformer Engineering.Design and Practice”.Marcel Dekker, inc. 2004 New York.
- [Kum07] Kumbhar, G.B.; Kulkarni, S.V. “Analysis of Short-Circuit Performance of Split-Winding Transformer Using Coupled Field-Circuit Approach”. IEE Transactions on Power Delivery, Vol.22, No.2, April 2007.
- [Oel68] Oels, K.P. “Ersatzschaltungen des Transformatorsfür das Nullsystem”. ETZ-A Bd69. 1968.
- [Oom99] Oommen, M.P.; Kohler, J.L. “Effect of Three-Winding Transformer Models on the Analysis and Protection of Mine Power Systems”. IEEE Trans on Industry Applications, Vol. 35, No. 3, May/Jun 1999.
- [Pro82] Proulx R. “New interactive short-circuit calculation algorithm”. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems.Vol PAS 101, No 8, Aug 82.
- [Ras75] Ras, E. “Transformadores de potencia, de medida y de protección” MarcomboBoixareu Editores. 1975 3ª edición.
- [Rif10] Rifaat, R. “Considerations in modeling and Applications of Three Winding Transformers in Industrial and Commercial Facilities” Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). 2010.
- [Roe70] Roeper, R. “Las corrientes de cortocircuito en las redes trifásicas”. Traducción de la 5ª Edición Alemana. Noviembre, 1970. Editorial Dossat S.A.
- [San02] Sanz Feito, J. “Máquinas Eléctricas”. Pearson Educación S.A., 2002.
- [Sta33] Starr, F.M.; “An Equivalent Circuit for the Four-winding Transformer”.General Electric Review, Vol. 36, No. 3, March 1933.
- [Stu00] Stuchl, P.; Dolezel, I. “Performance of Transformers with Split Winding under Nonstandard Operation Conditions”.12-103. Session 2000 CIGRÉ.
- [Tle08] Tleis, N.; “Power Systems Modelling and Fault Analysis”.Newnes-Elsevier. 2008.
- [U761] Norma UNE-EN 60076-1 Transformadores de Potencia. Parte 1: Generalidades. Julio 1998.



- [Wan09] Jialong Wang; Lascu, R. “Zero Sequence Circuit of Three-legged Core Type Transformers”.62<sup>nd</sup>. Conference for Protective Relay Engineers. 2009.
- [Wil56] Willheim, R. ; Waters, M. “Neutral Grounding in high-voltage transmission”. Elsevier. 1956.
- [Xie07] BingruoXie; Xiaosong Li “Calculation of the Circulating Current and Short-Circuit Impedance of a 3000 kVA HTS Transformer with Split Types of Windings”.Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007, Oct. 8-11, Seoul, Korea.