

Universidad
Carlos III de Madrid



GRADO EN INGENIERÍA ELECTRICA
CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y TRANSFORMADORES
APUNTES PREPARADOS POR JUAN CARLOS BURGOS

TEMA 4: TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS



ÍNDICE TEMA 4. TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

4.1.ALTERNATIVAS PARA REALIZAR LA TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA ENTRE DOS SISTEMAS TRIFÁSICOS	3
4.2.ÍNDICES HORARIOS	8
4.3 TRABAJO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	11
4.4. FUNCIONAMIENTO EN VACÍO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	12
4.5.FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGA EQUILIBRADA. CIRCUITO EQUIVALENTE	13
4.6. FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGA DESEQUILIBRADA	15
4.7. ALTERNATIVAS A LOS TRANSFORMADORES Yy	24
4.8. TRANSFORMADORES DE TRES ARROLLAMIENTOS.....	30
4.9.REGULACIÓN DE TENSIÓN EN TRANSFORMADORES	34
4.10 CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE TRANSFORMADORES	30
4.11. AUTOTRANSFORMADORES	47

TEMA 4**TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS****4.1. ALTERNATIVAS PARA REALIZAR LA TRANSFORMACIÓN DE ENERGÍA ENTRE DOS SISTEMAS TRIFÁSICOS**

En el tema anterior hemos visto la forma de transvasar energía entre dos sistemas eléctricos monofásicos modificando el nivel de tensión de dicha energía. En este tema estudiaremos la transmisión de energía eléctrica entre dos sistemas trifásicos. Para comenzar el estudio, empezaremos por analizar qué posibilidades existen para realizar esta transformación.

Cuando se desea crear una carga resistiva trifásica, se toman tres resistencias y se conectan entre sí bien sea en estrella, bien sea en triángulo. De la misma forma, la primera posibilidad para realizar la transformación energética entre dos sistemas trifásicos es utilizar tres unidades monofásicas como las estudiadas en el tema anterior y conectar sus arrollamientos primarios bien sea en estrella bien sea en triángulo y hacer lo mismo con los arrollamientos secundarios. El unir los arrollamientos primarios de una determinada manera (por ejemplo en estrella), no obliga a unir los arrollamientos secundarios de la misma manera (en el caso ejemplo, en estrella). Por tanto, si denotamos mediante una Y la conexión estrella y mediante una d la conexión triángulo (utilizando letras mayúsculas para el lado de más alta tensión y letras minúsculas para el lado de menor tensión), tendremos transformadores Yy , Yd , Dy y Dd . En transformadores en estrella, si el neutro del transformador está conectado¹ añadiremos a la letra Y , la letra N . De esta manera la notación $YNyn$, indica que tanto los neutros de AT como el de BT están conectados a tierra, mientras que la notación YNy indica que el neutro de BT no ha sido conectado a tierra.

La unión de tres transformadores monofásicos para trasvasar energía entre dos sistemas trifásicos se denomina *banco de transformación* (figura 4.1). En cada uno de los transformadores, el fabricante saca a la tapa del transformador los extremos (los bornes) y los une a una borna. Los cuatro extremos de los arrollamientos (dos de AT y dos de BT) se denotan con letras idénticas (por ejemplo A); las letras serán mayúsculas para el arrollamiento de AT y minúsculas para el de BT. Además, dos de las letras llevan una prima², indicando que las dos letras con prima son de igual polaridad entre sí y las dos letras sin prima son de igual polaridad entre sí³.

¹ Frecuentemente la conexión del neutro es a tierra, ya sea directamente (la mayor parte de las veces) o a través de una impedancia limitadora de la corriente de defecto (por ejemplo, una bobina Petersen que compense la capacidad de las líneas de alimentación al transformador).

² O bien subíndices 1 y 2

³ De esta forma, corrientes entrando por las letras con prima crean flujos de idéntico sentido. Por la misma razón, en un determinado instante de tiempo, las dos letras con prima son ambas positivas (o negativas ambas) respecto de las letras sin prima.

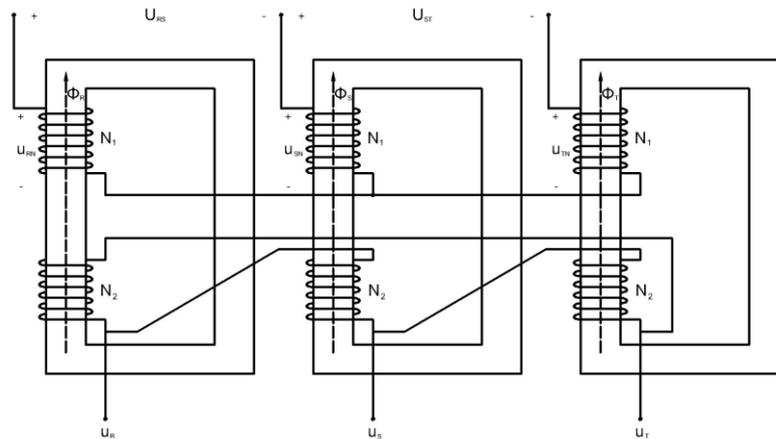


Figura 4.1: Banco de transformación Yd

A la hora de unir entre sí los primarios de los transformadores para formar una estrella no se ha de tener ninguna precaución especial⁴; sin embargo, a la hora de unir los secundarios sí que ha de tenerse en cuenta la polaridad relativa de las bobinas, ya que si se unieran entre sí dos principios de bobina y un final de bobina para formar un neutro, las tensiones que proporcionaría el transformador ya no formarían un sistema trifásico equilibrado.

Para formar un triángulo se han de unir entre sí un principio de bobina y un final de bobina de cada transformador. En la figura 4.2a se muestra la formación correcta de un triángulo; la suma de las tensiones inducidas en las tres fases es nula, de modo que en ausencia de carga la corriente que circula por dentro del triángulo es nula. Por el contrario, en la figura 4.2c se muestra un triángulo incorrectamente formado; se observa que la suma de las tres tensiones inducidas en las tres fases no es nula, por lo que la corriente por dentro del triángulo es muy elevada incluso en ausencia de carga.

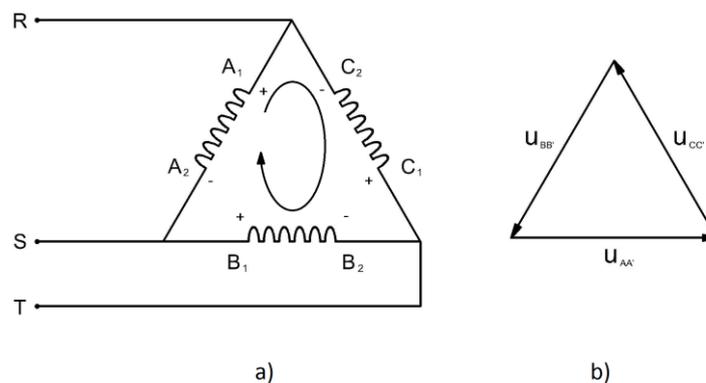


Figura 4.2: Configuración en triángulo a) Triángulo correctamente formado b) Diagrama fasorial de este caso

⁴ En el caso de bancos de transformación formados por tres unidades monofásicas esto es cierto. En el caso de transformadores de tres columnas esto no es tan cierto, ya que si por equivocación se permutaran los principios y finales de las fases el flujo en la columna de la fase invertida llevaría sentido opuesto al que debiera, y al llegar al punto común del circuito magnético los flujos no sumarían cero y habría un flujo que cerraría su camino por el aire, con lo que la corriente que debe tomar el transformador para crear el flujo sería muy elevada.

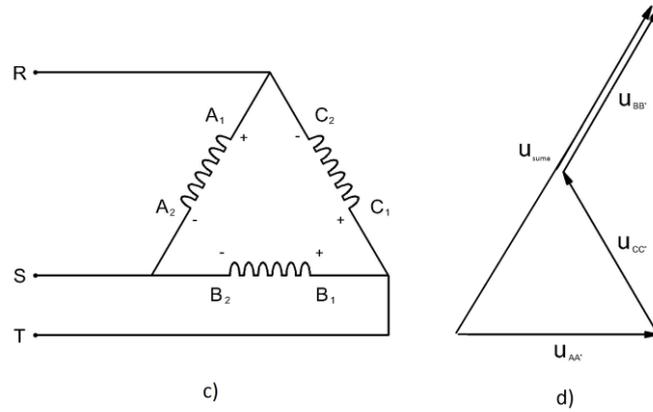


Figura 4.2: Configuración en triángulo c) Triángulo incorrectamente formado d) diagrama fasorial de este caso

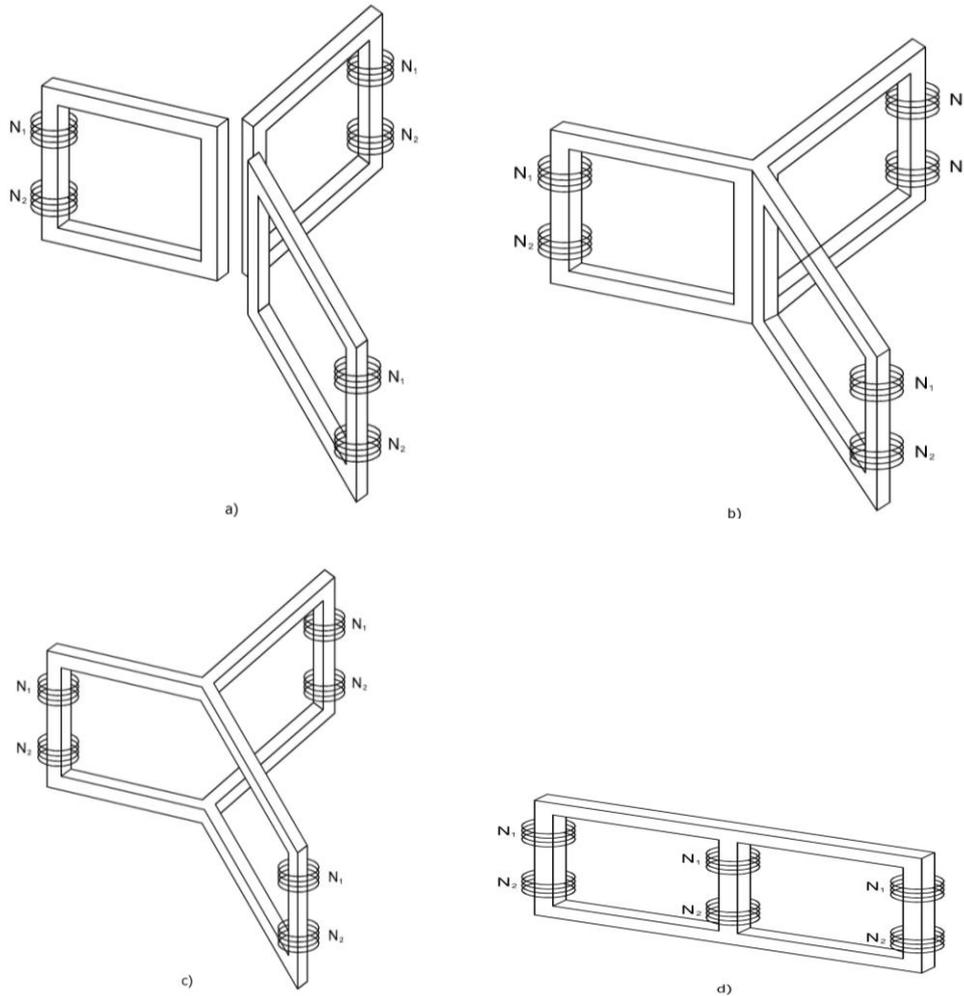


Figura 4.3: Proceso conceptual para obtener un transformador de núcleo trifásico

Hasta aquí la primera alternativa para realizar la transformación de energía entre sistemas trifásicos. Para comprender la segunda posibilidad, imaginemos que tenemos tres transformadores trifásicos en los que sólo una columna está bobinada (figura 4.3a) y refundimos la columna libre de los tres transformadores formando una sola columna (figura

4.3b) ¿cuánto flujo circulará por esa columna? En las columnas bobinadas de los tres transformadores circulan tres flujos sinusoidales, idénticos y decalados 120° ; la tercera ley de Maxwell nos dice que no hay fuentes ni sumideros de inducción, de forma que en toda región del espacio el flujo entrante debe ser idéntico al flujo saliente⁵. Por tanto, el flujo en la cuarta columna se obtiene sumando las flujos de las tres columnas que confluyen con ella y cambiando de signo la suma; pero dado que la suma de tres sinusoides idénticas y decaladas 120° es cero en todo instante de tiempo, el flujo en la cuarta columna es cero en todo instante de tiempo. Evidentemente la misión del circuito magnético es que por él circule el flujo, y si por una parte del mismo no circula flujo alguno, esa parte se puede suprimir. De esta forma se llega al transformador de la figura 4.3c que en adelante se denominará transformador de núcleo trifásico. Aunque en el pasado hubo diseños en los cuales existía una total simetría entre las fases del transformador, lo más habitual es que la fase central carezca de culatas, con lo que resulta una máquina asimétrica (figura 4.3d); teniendo en cuenta la pequeñísima influencia de la corriente de vacío en el funcionamiento de un transformador, esta pequeña asimetría es prácticamente imperceptible en el funcionamiento en carga del transformador.

Es todavía pronto para hacer una comparación del funcionamiento de un banco de transformación compuesto por tres unidades monofásicas con un transformador de núcleo trifásico, pero sí que se puede hacer una comparación económica. Como se aprecia en la figura 4.1, tres transformadores monofásicos requieren seis columnas y seis culatas, mientras que un transformador trifásico (figura 4.3d) requiere sólo tres columnas y cuatro culatas, por tanto un transformador trifásico es más económico que un banco de transformación, pues tiene menos hierro. La inducción de diseño de un transformador prácticamente no depende de su tipo o potencia; y dado que las pérdidas en el hierro por unidad de volumen sólo dependen de la inducción y de la frecuencia, se desprende que si un transformador de núcleo trifásico tiene menos hierro también tendrá menos pérdidas en el hierro y mejor rendimiento.

Cada uno de los transformadores de un banco monofásico está metido en su cuba, por tanto, en un transformador trifásico también hay un ahorro en aceite, en bornas⁶ y en accesorios (por ejemplo relé Buchholz, termómetro, relé de protección de cuba, etc).

Sin embargo, los bancos de transformación también tienen sus ventajas. Es sabido que un objeto pequeño presenta una mayor superficie en relación a su volumen, lo cual redundará en una mejor refrigeración; por tanto en un banco de transformación la refrigeración es más sencilla. Como se indicó en su momento, en los transformadores de grandes potencias la refrigeración es más complicada, por lo que esta ventaja es más significativa en transformadores grandes. Por otra parte, un transformador muy grande tiene dificultades de transporte, pues frecuentemente exceden los gálibos (en anchura o longitud) que se admiten para transporte por carretera, y en ocasiones hay que planificar caminos especiales para el convoy evitando puentes de autopista con limitación de altura. En este sentido, los bancos de

⁵ Este concepto es totalmente semejante al que expresa la primera ley de Kirchhoff de un circuito eléctrico.

⁶ Pues en cada transformador monofásico se precisan cuatro bornas, mientras que en un transformador de núcleo trifásico se precisan sólo de 6 (transformadores sin neutro) a 8 (transformadores con neutro accesible en AT y en BT) bornas.

transformación presentan ventajas, ya que una unidad monofásica es más fácil de transportar que una unidad trifásica.

Otra ventaja de los bancos de transformación frente a las unidades trifásicas es que si se desea tener una unidad de repuesto para cubrir la eventualidad de una avería en un transformador, en el caso de bancos de transformación bastaría con disponer de una unidad monofásica de reserva⁷, mientras que en los transformadores de núcleo trifásico habría que tener un transformador de idéntica potencia al transformador que se desea sustituir.

Por todo lo anterior, los bancos de transformación se utilizan en instalaciones de muy grandes potencias (superiores a los 300 MVA), y en potencias menores se utilizan siempre transformadores de núcleo trifásico.

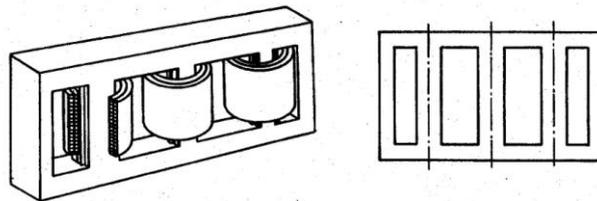


Figura 4.4a: Transformador de cinco columnas

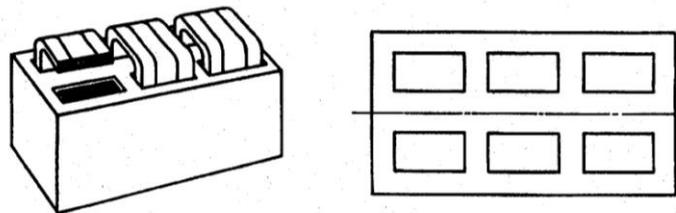


Figura 4.4b: Transformador acorazado

Con el fin de disminuir el tamaño de los transformadores trifásicos, existen alternativas constructivas tales como los transformadores de cinco columnas (figura 4.4 a) y los transformadores acorazados (figura 4.4 b). Los transformadores acorazados suelen ser transformadores de grandes potencias de las redes de transporte. La principal ventaja de los transformadores acorazados es su robustez ante cortocircuitos.

Los transformadores acorazados y los transformadores de cinco columnas presentan ciertas columnas en las que no hay un bobinado, por lo que constituyen un camino para que los flujos puedan cerrar su trayecto de forma libre. Esto hace que en ciertas circunstancias⁸ tengan un comportamiento semejante a un banco de transformación; por eso estos tres tipos de transformadores se suelen denominar *de flujos libres*. Cuando sea preciso resaltar la diferencia

⁷ Hoy en día en los transformadores de la red de transporte se realiza un seguimiento periódico de su estado a través de técnicas de mantenimiento predictivo, de modo que la hipótesis de que dos transformadores se averíen de forma simultánea tiene una probabilidad muy reducida.

⁸ En concreto, en caso de que existan flujos homopolares

con los transformadores de núcleo trifásico de tres columnas, se dice que a éste último es de *flujos ligados*, ya que en el punto de intersección de las tres columnas del circuito magnético la suma de los tres flujos debe ser cero.

4.2. ÍNDICES HORARIOS

Cuando dos arrollamientos son recorridos por un mismo flujo, las f.e.m. que en ellos se engendran están en fase. En una carga en estrella existe un desfase de 30° entre las tensiones fase neutro y las tensiones de línea. Por el contrario, en una carga en triángulo las tensiones de línea están en fase con las tensiones de fase. Por la misma razón, en los transformadores trifásicos puede existir un desfase entre las tensiones de línea primarias y secundarias. En cualquier caso este desfase debe ser múltiplo de 30° . Como en un reloj el ángulo que forman dos horas consecutivas es también 30° , es costumbre indicar el desfase entre las tensiones de línea en horas de reloj en lugar de en grados. A este desfase se le suele denominar desfase horario o índice horario, y se indica a continuación de la letra indicativa de la forma de conexión de los arrollamientos, por ejemplo Yd5, YNyn0, etc.

Los transformadores con grupo de conexión Yy pueden tener ángulo horario 0 ó 6, según cuáles sean los extremos de bobina que se han extraído a las bornas (0 si se han extraído extremos de igual polaridad y 6 en caso contrario) como se muestra en la figura 4.5. Los transformadores con grupo de conexión Yd o Dy pueden tener ángulos horarios 1, 5, 7 u 11. Los transformadores con grupo de conexión Dd pueden tener ángulos horarios 0, 2, 4, 6, 8 o 10.

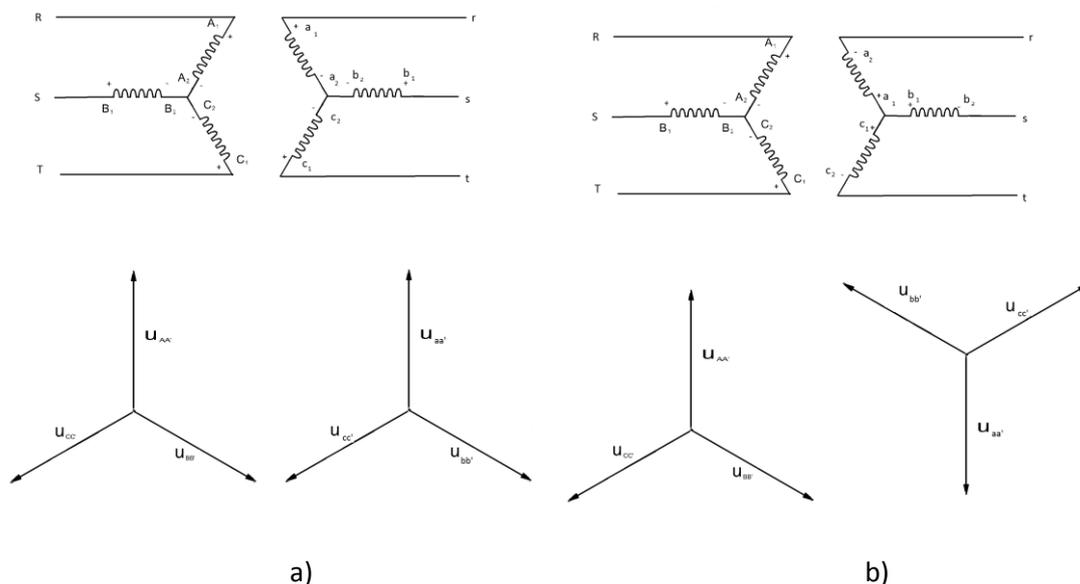


Figura 4.5: Transformador Yy0 (a) y transformador Yy6 (b)

Como es sabido, en Teoría de Circuitos se utilizan fasores (vectores complejos) como forma de representar sinusoides. Un fasor contiene la información fundamental de una senoide: su amplitud y su desfase respecto de un origen de tiempos. Carece de sustento físico el situar letras en los extremos de un fasor complejo. No obstante, el colocar letras en los extremos de

un fasor es un procedimiento que facilita la labor de obtención de ángulos horarios en un transformador.

Por tanto, para determinar el desfase horario de un transformador se partirá de la estrella de tensiones aplicada al primario del transformador (caso de que el transformador esté en estrella) o del triángulo de tensiones aplicado (caso de que el arrollamiento esté conectado en triángulo) y se pondrán letras en cada uno de los extremos de los fasores que representan las tensiones aplicadas al arrollamiento como se indica en la figura 4.6 (debe tenerse en cuenta que puntos del circuito unidos entre sí tienen idéntico potencial, por lo que vienen dados por el mismo extremo del fasor). Para obtener las tensiones engendradas en el secundario se trazan paralelas a esos fasores y se ponen letras en los extremos de los mismos. Se debe respetar el orden de las letras (A y A' deben estar en el mismo orden que a y a') para que los terminales de igual polaridad. Ha de tenerse en cuenta que los bornes de dos devanados unidos entre sí tienen idéntico potencial y por tanto estarán representadas por el mismo punto en el plano complejo. Una vez obtenido el sistema de tensiones secundarias se obtendrá el desfase entre las tensiones primarias y secundarias utilizando para ello las tensiones fase-neutro o las tensiones de línea⁹.

Como ejemplo de lo dicho, en las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 se muestran los ángulos horarios de tres transformadores con diferente grupo de conexión.

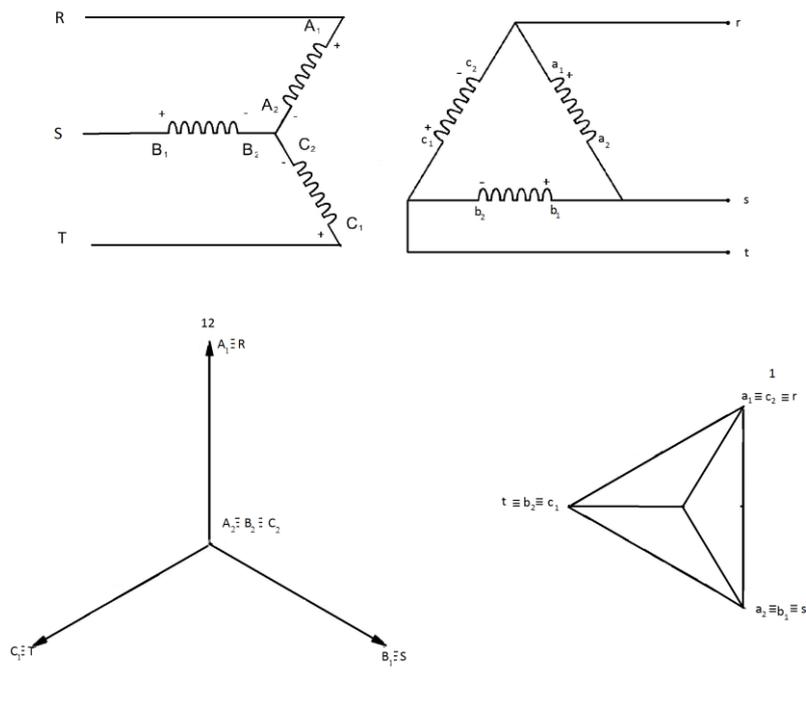


Figura 4.6: Transformador Yd1

⁹ Las tensiones de línea siempre existen, mientras que las tensiones fase-neutro sólo existen en el caso de arrollamientos conectados en estrella, no obstante, en ocasiones es útil para hallar el ángulo horario utilizar una tensión fase-neutro virtual obtenida uniendo el baricentro de las tensiones de línea con el extremo correspondiente del triángulo.

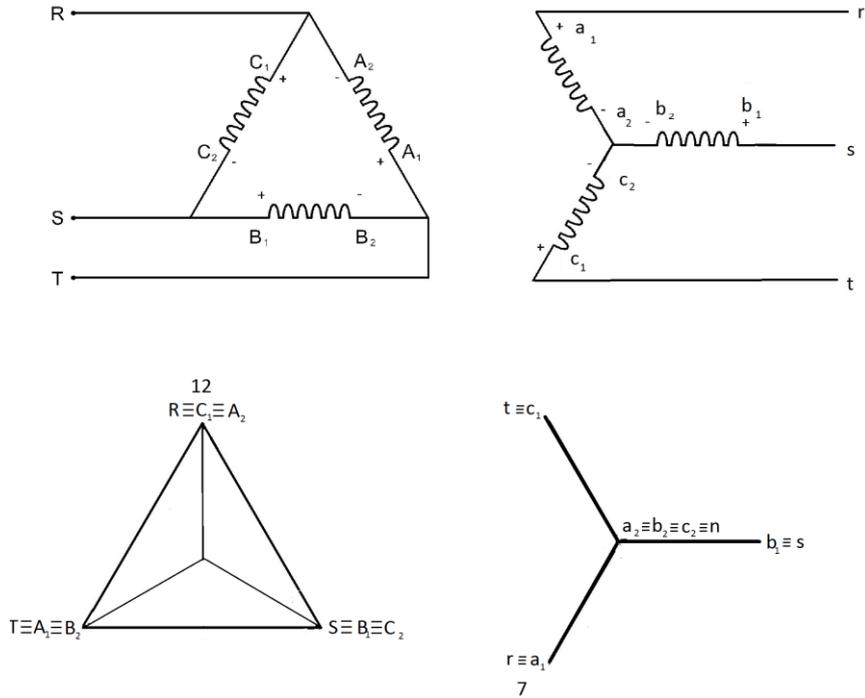


Figura 4.7: Transformador Dy7

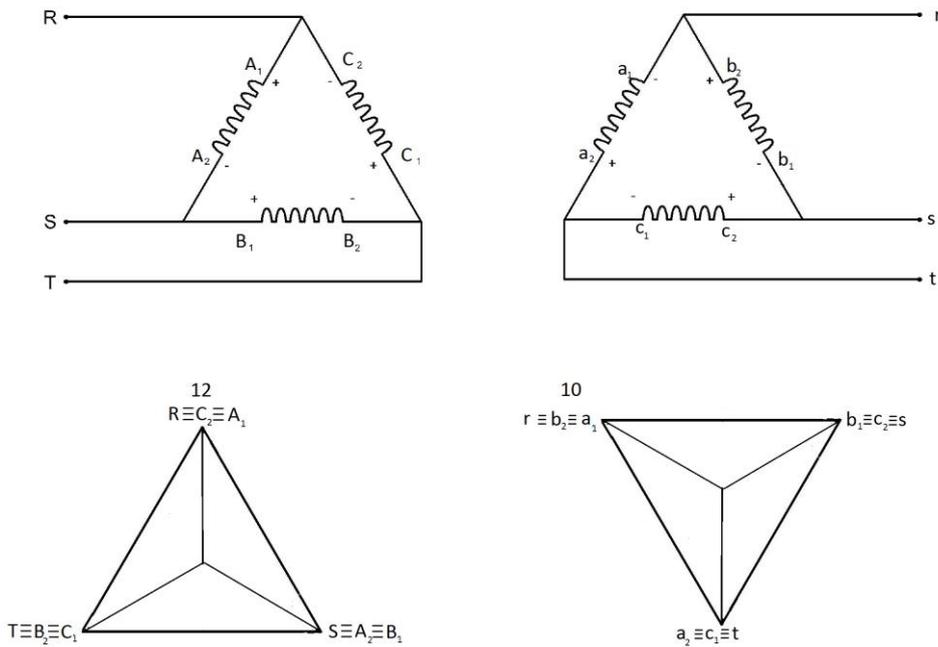


Figura 4.8: Transformador Dd10

El signo del ángulo de desfase entre las tensiones de línea depende de la secuencia de fases aplicada. Así, si en la figura 4.8 el orden de sucesión de las fases fuera R-T-S el ángulo de desfase cambiaría de 300° a 60° (figura 4.9).

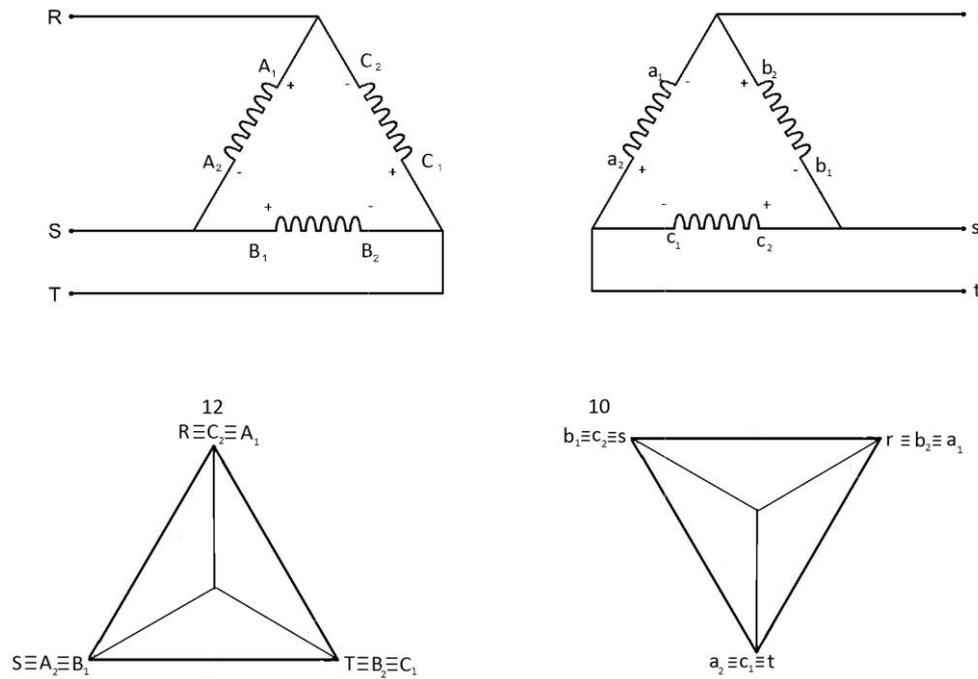


Figura 4.9: Desfase entre las tensiones primarias y secundarias de un transformador Dd10 al cambiar la secuencia de las tensiones de alimentación

Por eso, para definir unívocamente el concepto de ángulo horario, es indispensable indicar la secuencia. Así, se define *Ángulo horario* el desfase entre las tensiones de línea primarias y secundarias cuando se aplica al primario del transformador un sistema de tensiones trifásico equilibrado de secuencia directa.

4.3. TRABAJO EN PARALELO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Antes de entrar en el estudio de los transformadores trifásicos, merece la pena hablar brevemente de la posibilidad de que dos transformadores trifásicos trabajen en paralelo.

Como se estudió en el tema 3, para que dos transformadores monofásicos trabajen satisfactoriamente en paralelo se precisa que tengan las mismas tensiones nominales primarias y secundarias y que tengan la misma tensión de cortocircuito porcentual. Además se recomienda que las potencias no difieran en una relación mayor de 2:1. Para el caso de transformadores trifásicos se ha de añadir una condición más: los desfases entre el sistema de tensiones aplicado al primario y el obtenido en el secundario deben ser idénticos. La forma más simple de que esto se verifique es conectando en paralelo transformadores de igual ángulo horario¹⁰.

¹⁰ Si bien no es la única posibilidad, pues dado que en un sistema trifásico las tres tensiones están decaladas 120° (4 horas de reloj), un transformador siempre será acoplable en paralelo con otro cuyo ángulo horario difiera 4 u 8 horas; para ello deben conectarse entre sí no ya los terminales de igual nombre (a con a, b con b y c con c) sino los que tengan tensiones que se encuentren en fase.

4.4. FUNCIONAMIENTO EN VACÍO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Un transformador debe tomar de la red una corriente de magnetización para crear el flujo. El estudio del funcionamiento en vacío de un transformador monofásico se realizó en el tema 3. El estudio en vacío de los transformadores trifásicos depende de su tipo de núcleo (de flujos libres o de flujos ligados), de la forma de conexión de los arrollamientos (estrella o triángulo) y de si la alimentación al transformador es a cuatro hilos (tres fases más neutro) o a tres hilos (tres fases del transformador conectadas a la red y el neutro no conectado a la red). Como se puede deducir de lo dicho, el estudio del transformador en vacío es bastante largo. Sin embargo, como se vio en el tema 3, la corriente de vacío de un transformador es inferior al 0,5% de la corriente nominal. Por ello, no merece la pena dedicar mucho tiempo a este estudio, si bien, en lo que sigue, se presentarán algunos aspectos conceptualmente importantes que intervienen en el fenómeno.

- La relación que liga al flujo con la corriente que se precisa para crearlo es una relación no lineal, por tanto es imposible que ambas magnitudes (flujo y corriente de magnetización) sean simultáneamente sinusoidales.
- En aquellos casos en los que la tensión aplicada al arrollamiento esté impuesta por la red (por ejemplo, si el primario está en triángulo o si el primario está en estrella y se han llevado a la red cuatro hilos) el flujo es sinusoidal. Por el contrario, si la tensión aplicada al arrollamiento no está determinada por la red (sería el caso de un transformador con el primario en estrella en el que se han llevado a la red los tres hilos de fase pero no el hilo de neutro) no se puede presuponer a priori que éstas tensiones sean sinusoidales o que los flujos lo sean.
- Dada la simetría entre las tensiones aplicadas a las tres fases, los flujos y las corrientes son ondas idénticas en las tres fases y desfasadas 120° (tanto si son ondas sinusoidales como si son ondas distorsionadas).
- Si se descomponen en serie de Fourier tres ondas distorsionadas idénticas y desfasadas 120° , los terceros armónicos (y demás múltiplos de 3) pulsan en fase. A estas sinusoides en fase se les denomina homopolares, ya que al pulsar en fase es equivalente a que las tres fases del sistema eléctrico fueran un único polo de una fuente (de ahí su nombre).
- En el caso de transformadores alimentados a tres hilos (ya sean transformadores en triángulo, ya sean transformadores conectados en estrella con el neutro no conectado a la red) las corrientes homopolares carecen de camino de retorno, por lo que no pueden existir.
- El campo magnético creado en un punto suficientemente alejado por una línea por la que circula un sistema equilibrado de corrientes de secuencia directa (o de secuencia inversa) es nulo. Por el contrario, si las corrientes tienen componente homopolar, el campo magnético creado no es nulo¹¹ (figura 4.10).

¹¹ Aunque esta afirmación es cierta, conviene relativizar su importancia en el contexto del funcionamiento de transformadores en vacío que estamos estudiando. Como se ha indicado la corriente de vacío en los transformadores actuales es menor al 0,5%, por lo que incluso en transformadores de muy grandes potencias, la corriente de vacío no supera unos cuantos amperios. Es sabido que la inducción creada por un hilo indefinidamente largo en el vacío vale

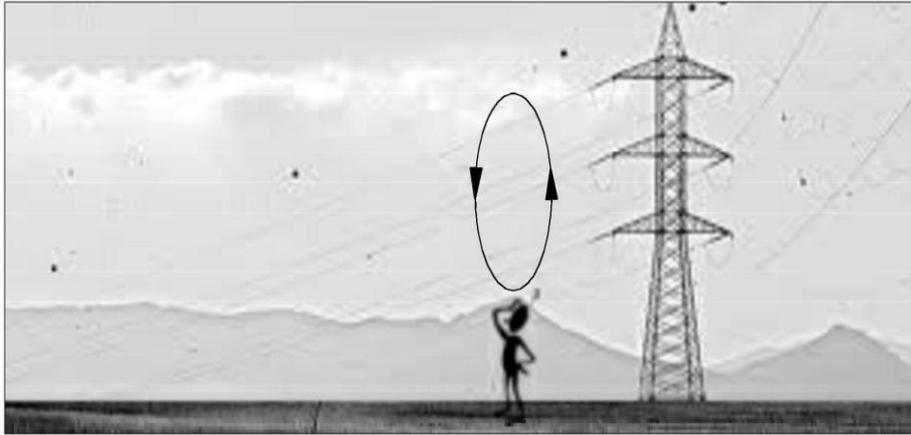


Figura 4.10: Campo magnético creado por una línea aérea en un punto suficientemente alejado

Con estas pautas se podrían analizar los diferentes casos en estudio, y se podrían extraer conclusiones. Algunas de estas conclusiones son:

- En transformadores YNy con el neutro del primario conectado a la red (idem en transformadores YNyn) los flujos son sinusoidales y las corrientes son distorsionadas. Las corrientes presentan armónicos de orden 3, que son homopolares.
- En transformadores Yy con neutro aislado, las corrientes no presentan armónicos homopolares, pero a cambio el flujo, y por tanto las tensiones inducidas en ambos arrollamientos, contiene armónicos de orden 3 homopolares.
- En transformadores Dy o Dd las corrientes de línea carecen de armónicos homopolares (aunque sí de otros armónicos). Los flujos son prácticamente sinusoidales, carentes de armónicos por tanto.

4.5. FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGA EQUILIBRADA. CIRCUITO EQUIVALENTE

En un sistema trifásico equilibrado los fenómenos que suceden en cada una de las fases son idénticos y decalados 120° . Por tanto, para estudiar una carga equilibrada es suficiente analizar lo que ocurre en una de las fases a través de un circuito monofásico. El estudio del comportamiento de una fase del transformador es idéntico al estudio del transformador monofásico realizado en el tema 3, y se realiza a través del circuito equivalente del transformador.

En principio, para transformadores con su arrollamiento primario en estrella (ya sean Yy o Yd) cabría utilizar un circuito equivalente fase-neutro mientras que para transformadores con su primario en triángulo un circuito equivalente fase-fase; no obstante, si eso se hiciera así sería muy difícil analizar problemas sencillos tales como el caso de un transformador Dy alimentado

$$B = \frac{I}{2\pi d} \mu_0$$

Y dado el reducido valor de μ_0 ($4\pi 10^{-7}$), la inducción a unos cuantos metros de distancia no supera el microtesla. En este sentido debe tenerse en cuenta que la normativa española (Real Decreto 1066/2001) establece que el límite de exposición máximo para el público en general es 100 microteslas para campos electromagnéticos de frecuencia de 50 Hz.

a través de una línea real (con impedancia) o el caso de un transformador Dy trabajando en paralelo con otro transformador Yd . Por tanto, lo más cómodo y eficaz es utilizar un circuito equivalente fase-neutro independientemente de si el primario del transformador está conectado en estrella o en triángulo. Evidentemente, en el caso de transformadores con su primario en triángulo el neutro del circuito equivalente es el de la estrella que equivale al triángulo en virtud de la transformación estrella-triángulo estudiada en Teoría de Circuitos.

Conceptualmente, para obtener el circuito equivalente fase-neutro del transformador, aquel (o aquellos) arrollamientos conectados en triángulo se deben transformar a su estrella equivalente (dividiendo su impedancia por 3). Como relación de transformación se tomará el cociente de tensiones entre líneas (que de este modo no coincidirá con el cociente del número de espiras). De esta manera, la resistencia de cortocircuito del transformador será

$$R_{cc} = R_{1Y} + R_{2Y}r_t^2 \quad (4.1)$$

Donde r_t vale

$$r_t = \frac{U_{1L}}{U_{2L}} \quad (4.2)$$

La impedancia de carga que se conectará en el secundario de este circuito equivalente es la impedancia fase-neutro de la carga conectada en bornas del transformador. En el caso de que la carga esté conectada en triángulo se debe realizar previamente la transformación estrella-triángulo a la impedancia de ésta.

Al igual que ocurría en transformadores monofásicos, es frecuente proporcionar las impedancias del circuito equivalente expresadas en porcentaje respecto de la base de impedancias. Como base de impedancias se tomará

$$Z_{BY} = \frac{U_{FN,N}}{I_N} \quad (4.3)$$

De esta manera la resistencia de cortocircuito porcentual es

$$\varepsilon_{Rcc} = \frac{R_{ccY}}{Z_{BY}} 100 = \frac{R_{ccY}I_N}{U_{FN,N}} 100 \quad (4.4)$$

Que coincide con las pérdidas en el cobre a plena carga expresadas como porcentaje de la potencia nominal

$$\varepsilon_{Rcc} = \frac{3R_{ccY}I_N^2}{3I_N U_{FN,N}} 100 = \frac{P_{cc}}{S_N} 100 \quad (4.5)$$

De igual forma la impedancia de cortocircuito porcentual es

$$\varepsilon_{cc} = \frac{Z_{ccY}}{Z_{BY}} 100 = \frac{Z_{ccY}S_N}{U_{LN}^2} 100 \quad (4.6)$$

Además de las ventajas señaladas en el tema anterior, el expresar la impedancia de cortocircuito en porcentaje tiene la ventaja de que expresadas en porcentaje las impedancias

de cortocircuito para el circuito equivalente fase-fase y para el circuito equivalente fase-neutro son idénticas.

4.6. FUNCIONAMIENTO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS CON CARGA DESEQUILIBRADA.

Cuando un transformador alimenta una carga desequilibrada las intensidades por las tres líneas del secundario son tres sinusoides de diferente valor eficaz que no están decaladas 120° . Este desequilibrio de carga en el secundario se transmite al primario. En algunos casos, además, aparecen sobretensiones en alguna de las fases, como se verá posteriormente.

El comportamiento de un transformador ante carga desequilibrada depende de la forma de conexión de sus arrollamientos (estrella o triángulo), del tipo de núcleo magnético (de flujos libres o de flujos ligados), de si la alimentación al transformador es a cuatro hilos o a tres hilos (caso de que el arrollamiento primario esté conectado en estrella) y del tipo de desequilibrio de carga (desequilibrios fase-fase o desequilibrios fase-neutro). En el apartado 4.6.1 y siguientes se analizan de forma breve los casos más importantes.

En la figura 4.11 a se muestra el diagrama fasorial de un sistema desequilibrado de corrientes. Para estudiar el comportamiento del transformador ante carga desequilibrada se recurre a expresar las tres intensidades de línea secundarias como suma de tres sistemas equilibrados: uno de secuencia directa, otro de secuencia inversa y un tercero de secuencia homopolar (figura 4.11 b). El sistema desequilibrado de corrientes original coincide con la suma del de secuencia directa, más el de secuencia inversa más el de secuencia homopolar (figura 4.11 c).

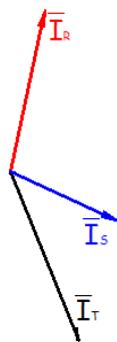


Figura 4.11 a): Magnitudes originales desequilibradas (tres sinusoides de diferente valor eficaz y desfasadas ángulos diferentes a 120°)

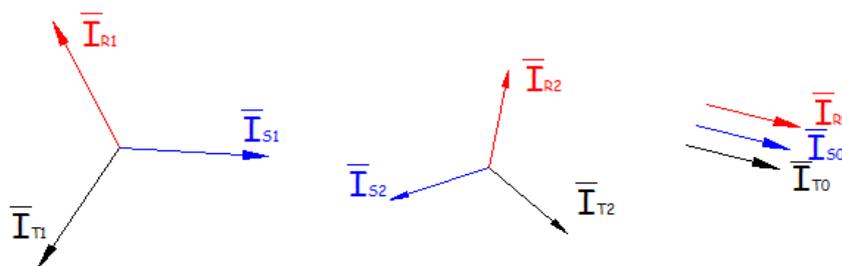


Figura 4.11 b): Componentes de secuencia directa (subíndice 1), inversa (subíndice 2) y homopolar (subíndice 0) de las magnitudes de la figura 4.11 a)

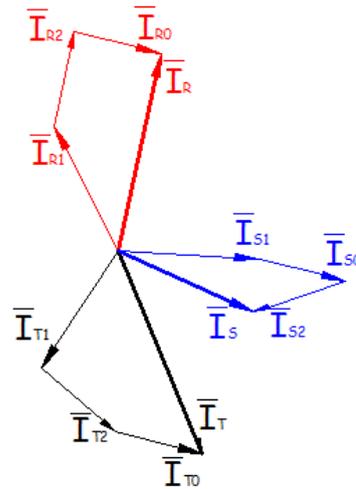


Figura 4.11 c) Las magnitudes originales se obtienen sumando las componentes de secuencia

A continuación se estudia el transformador ante cada uno de los tres sistemas equilibrados¹². La respuesta del transformador ante el sistema desequilibrado de corrientes se puede expresar como combinación de las respuestas ante cada uno de los sistemas equilibrados.

Para que puedan existir las componentes de secuencia directa o inversa de la intensidad no es necesario que exista hilo de neutro de retorno, la razón es la siguiente: Los sistemas de secuencia directa o inversa son tres sinusoides decaladas entre sí 120° (en avance para el sistema de secuencia inversa, en retraso para el sistema de secuencia directa), por lo que la suma de las tres intensidades de secuencia directa o de secuencia inversa es nula en todo instante de tiempo, y se cancela al llegar al neutro.

Sin embargo, para que pueda existir componente homopolar de intensidad es imprescindible que exista hilo de neutro de retorno, la razón es la siguiente: La suma de las tres intensidades de secuencia homopolar no puede ser cero, ya que se trata de tres sinusoides iguales y en fase. Por tanto, se precisa un hilo de neutro para que retorne esa componente homopolar.

4.6.1. CARGAS DESEQUILIBRADAS FASE-NEUTRO EN TRANSFORMADORES Yyn DE NÚCLEO TRIFÁSICO

Uno de los casos más problemáticos de cargas desequilibradas es el desequilibrio de carga entre fase y neutro en transformadores Yyn sin neutro de retorno en el lado de alimentación, pues, como se verá, este tipo de desequilibrios crea sobretensiones en algunas de las fases del transformador que padecen las cargas conectadas al mismo.

Para que se produzca este tipo de sobretensiones es preciso que el sistema de corrientes del secundario posea una componente homopolar.

Antes de continuar la exposición¹³, es preciso justificar que en un transformador Yyn, despreciando la resistencia y reactancia de dispersión del arrollamiento primario, sólo pueden existir flujos de secuencia directa y flujos de

¹² El estudio del transformador ante el sistema de secuencia homopolar requiere disponer de un circuito que muestre el comportamiento del transformador ante este tipo de secuencia (circuito equivalente ante secuencia homopolar). Por restricciones de tiempo, este circuito no se estudiará en esta asignatura sino en asignaturas posteriores.

secuencia homopolar. Para justificarlo imaginemos por un instante que en el transformador existen flujos desequilibrados que se pueden expresar como suma de un sistema de secuencia directa, de secuencia inversa y de secuencia homopolar (figura 4.12).

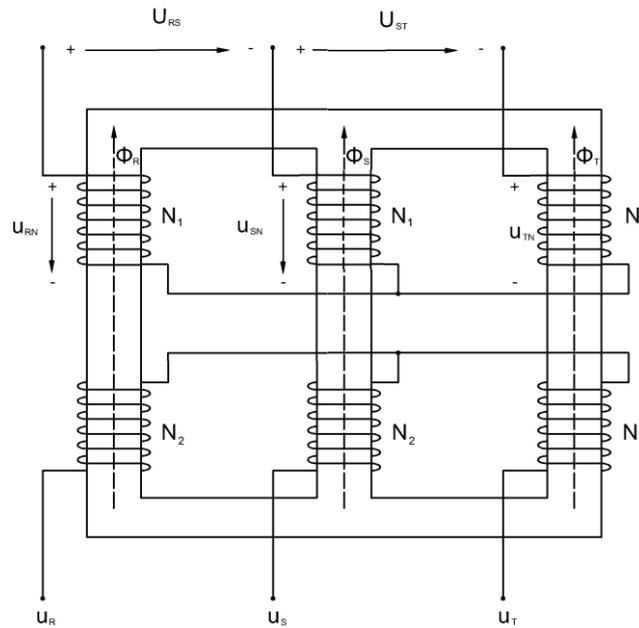


Figura 4.12: Transformador Yy con flujos desequilibrados

$$\Phi_R = \Phi_{Rd} + \Phi_{Ri} + \Phi_{R0} \quad (4.7 a)$$

$$\Phi_S = \Phi_{Sd} + \Phi_{Si} + \Phi_{S0} \quad (4.7 b)$$

$$\Phi_T = \Phi_{Td} + \Phi_{Ti} + \Phi_{T0} \quad (4.7 c)$$

Estos flujos engendrarán tensiones en cada uno de los arrollamientos primarios y secundarios. Las tensiones engendradas en las fases primarias serán

$$U_{RN} = j\omega N_1 \Phi_R = j\omega N_1 (\Phi_{Rd} + \Phi_{Ri} + \Phi_{R0}) \quad (4.8 a)$$

$$U_{SN} = j\omega N_1 \Phi_S = j\omega N_1 (\Phi_{Sd} + \Phi_{Si} + \Phi_{S0}) \quad (4.8 b)$$

La tensión de línea se obtiene como diferencia entre dos tensiones fase neutro

$$U_{RS} = U_{RN} - U_{SN} \quad (4.9)$$

Al efectuar la resta, las componentes de secuencia homopolar de la tensión se cancelan entre sí, puesto que son fasores de idéntico módulo y en fase, pero no ocurre lo mismo con las componentes de secuencia directa o inversa

$$U_{RS} = U_{RN} - U_{SN} = j\omega N_1 (\Phi_{Rd} - \Phi_{Sd}) + j\omega N_1 (\Phi_{Ri} - \Phi_{Si}) \quad (4.10)$$

Y dado que la tensión aplicada al primario viene impuesta por la red de alimentación y carece de componente de secuencia inversa, se deduce que el flujo de secuencia inversa debe valer cero.

¹³ Esta parte con un tipo de letra más pequeño que el resto del texto es un inciso

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

Para comprender el funcionamiento del transformador Yyn de núcleo trifásico en este caso, descompondremos el sistema de corrientes en sus tres componentes: el de secuencia directa, el de secuencia inversa y el de secuencia homopolar¹⁴ y obtendremos la corriente que circula por el primario del transformador aplicando superposición (figura 4.13).

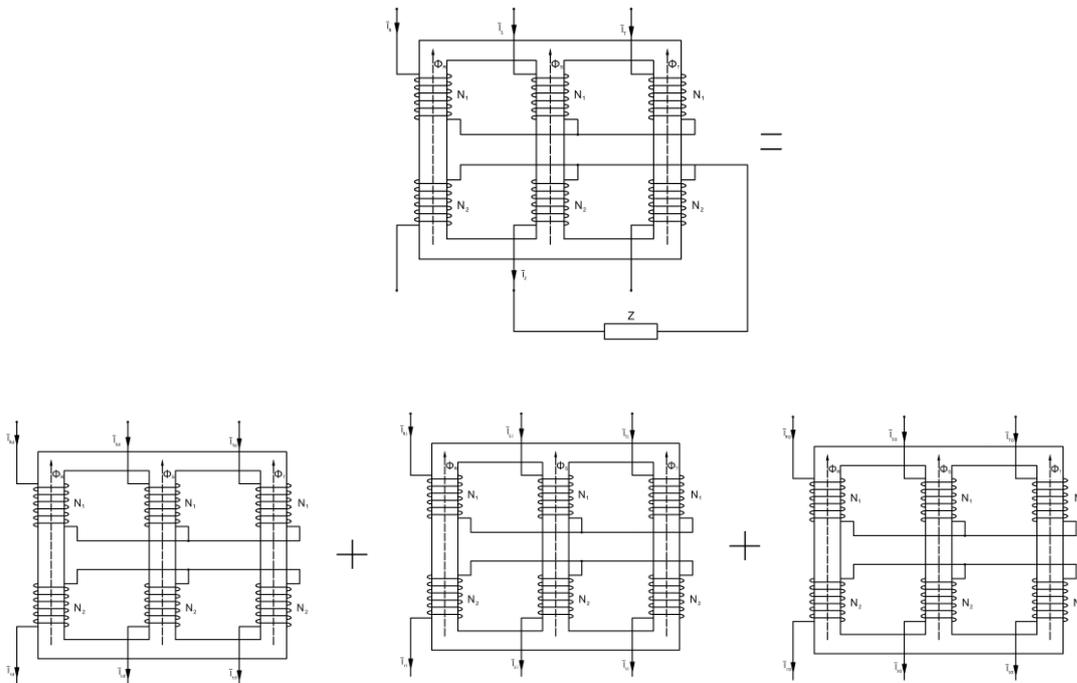


Figura 4.13: Descomposición de una carga desequilibrada en tres sistemas equilibrados de secuencias directa, inversa y homopolar. Para mayor claridad se ha supuesto que sólo una fase del transformador está cargada mientras las otras dos permanecen a circuito abierto.

El sistema de secuencia directa del secundario hará que el transformador tome de la red una corriente para compensar los amperios-vuelta aportados por la corriente secundaria.

$$\bar{I}_{Rd} = \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_{rd} + \bar{I}_0 \tag{4.11}$$

De la misma forma, el transformador tomará un sistema de corrientes de secuencia inversa para contrarrestar los amperios-vuelta del secundario¹⁵.

¹⁴ Esta descomposición se refiere a la componente de la intensidad que es debida a la carga. Además de estas componentes se debe tener en cuenta la corriente de vacío precisa para crear el flujo de secuencia directa que corresponde a las tensiones de línea aplicadas al primario del transformador

¹⁵ A diferencia de la ecuación (4.11), en la ecuación (4.12) no aparece la corriente de vacío. Ello es debido a que se requiere cierta corriente para crear el flujo de secuencia directa, mientras que, como es sabido, no existe corriente de secuencia inversa, lo que requiere que los amperios vuelta de primario y secundario estén exactamente compensados, como muestra la ecuación (4.12)

$$\bar{I}_{Ri} = \frac{N_2}{N_1} \bar{I}_{ri} \quad (4.12)$$

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

En estas circunstancias, esta corriente homopolar secundaria que no ha sido compensada por el arrollamiento primario se convierte en una corriente de excitación¹⁶ que crea un flujo idéntico en las tres fases del transformador (una componente homopolar de flujo) que se suma a la componente de secuencia directa.

Los flujos homopolares son tres sinusoides idénticas que circulan por cada columna del transformador, pero dado que la tercera ley de Maxwell indica que las líneas de inducción deben ser cerradas, al confluir los tres flujos en la culata del transformador, los flujos saltan por el aire y cierran su camino por la cuba del transformador (figura 4.14). Esto provoca un aumento de las pérdidas en la cuba, ya que ésta no está fabricada de chapa magnética al silicio ni tiene un espesor tal que permita minimizar las pérdidas por corrientes de Foucault. Estas pérdidas en la cuba reducen el rendimiento del transformador y pueden dañar la pintura de la cuba exponiéndola a la corrosión o provocar la aparición de puntos calientes que descompongan el aceite del transformador generando gases. Si esto ocurre, el ingeniero de mantenimiento pierde una poderosa herramienta para conocer el estado del transformador como es el análisis de gases disueltos en el aceite.

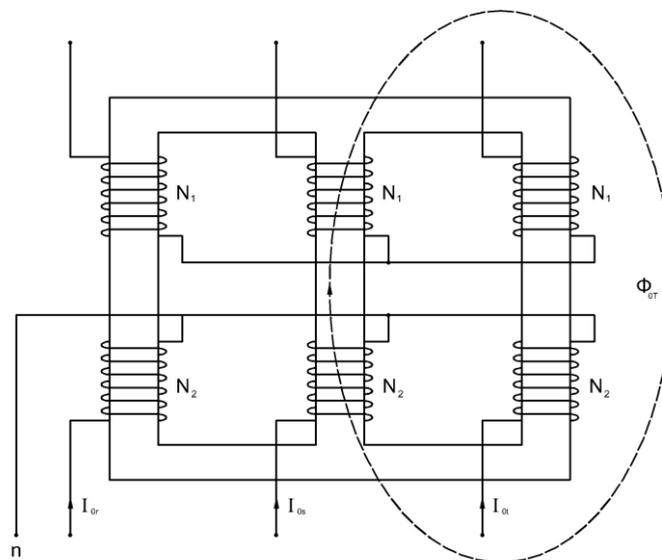


Figura 4.14: Flujos homopolares provocados por la existencia en uno de los arrollamientos de componentes homopolares de corriente no compensadas

¹⁶ La ley de Ampere indica que toda corriente crea un campo magnético. Eventualmente si la corriente secundaria está compensada por una corriente primaria, el campo magnético resultante puede ser nulo, como pasa con las componentes de secuencia inversa. No ocurre así con las componentes de secuencia homopolar.

Para evitar el calentamiento de la cuba debido a estos flujos homopolares¹⁷, en transformadores de potencias medias y elevadas se suelda un pequeño paquete de chapas magnéticas en la cara interna de la cuba del transformador. Estos paquetes de chapas son llamados shunts magnéticos.

Como se ha visto en este apartado, las cargas desequilibradas en transformadores Yyn crean un flujo homopolar que no existía con el transformador funcionando en vacío o con carga desequilibrada. Este flujo homopolar desequilibra las tensiones simples (fase-neutro) haciendo que algunas de ellas adquieran valores superiores al que se tenía en vacío mientras que otras tensiones resultan de valor inferior (figura 4.15).

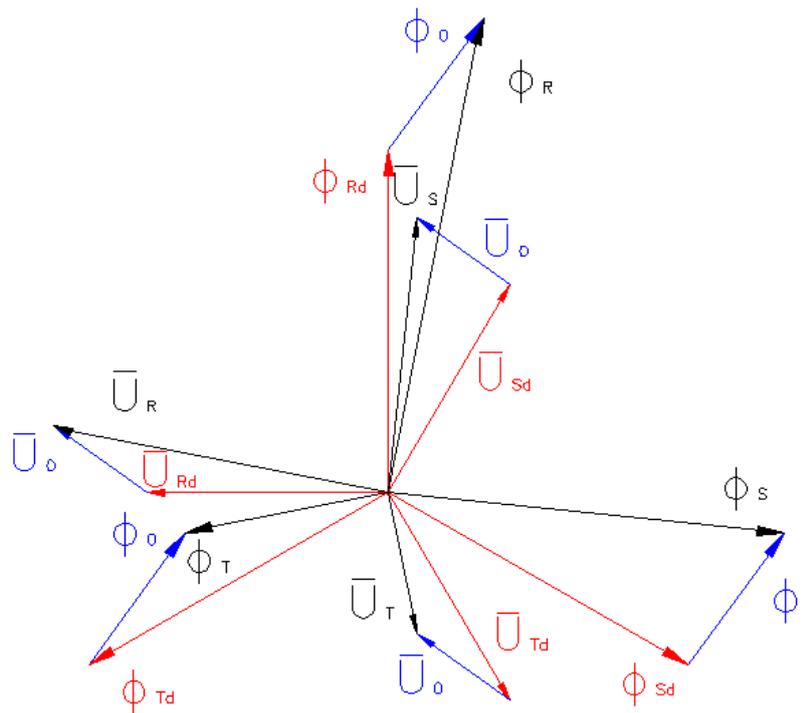


Figura 4.15: Tensiones fase-neutro en un transformador Yyn de núcleo trifásico con carga desequilibrada fase-neutro

Como se demostró anteriormente (ecuación 4.10) los flujos homopolares no se manifiestan en las tensiones compuestas, que resultan ser idénticas a las que se tienen en vacío.

En la exposición se ha supuesto por simplicidad que el transformador alimenta una sola carga entre fase y neutro, pero si en las tres fases hay cargas fase-neutro desequilibradas las sobretensiones o tensiones inferiores a la nominal quedarían aplicadas a las cargas con consecuencias potencialmente perjudiciales para las cargas¹⁸.

Por lo visto en este apartado, se recomienda no utilizar transformadores Yy en aquellos casos en los que no sea posible alimentar el transformador a cuatro hilos y se prevean cargas

¹⁷ Y a los flujos de dispersión del arrollamiento de AT que tienden a retornar por la cuba.

¹⁸ Por poner un ejemplo, si a un motor de inducción se le aplica una tensión inferior a la nominal, el motor debe tomar más corriente para poder desarrollar el par que precisa la carga pudiéndose calentar de forma perjudicial.

desequilibradas fase-neutro de un valor superior al 10% de la potencia nominal del transformador.

En el caso de redes con neutro puesto a tierra un cortocircuito fase-neutro y otras faltas asimétricas (por ejemplo la apertura de una sola fase) provoca corrientes homopolares, y dado que alguno de estos eventos (la apertura de una fase) se puede mantener durante algún tiempo, provocando un calentamiento de la cuba, los transformadores Yy no se usan en ese tipo de redes.

4.6.2. CARGAS DESEQUILIBRADAS FASE-NEUTRO EN BANCOS DE TRANSFORMACIÓN YNyn

Para mayor simplicidad supongamos que sólo una unidad del banco de transformación tiene una carga conectada en su secundario mientras que las otras dos unidades se encuentran a circuito abierto (figura 4.16).

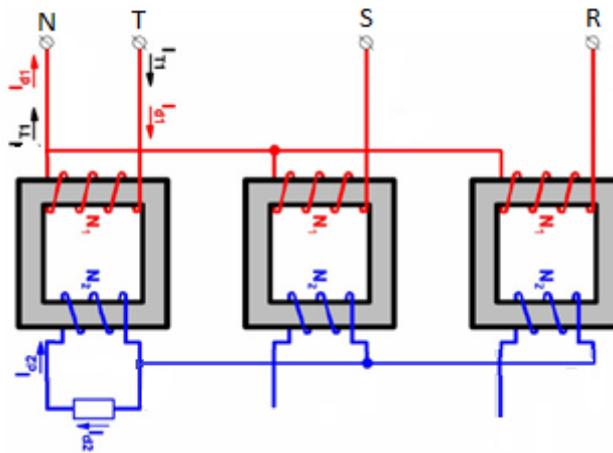


Figura 4.16: Banco YNyn con carga desequilibrada fase-neutro

Si se conecta el primario del banco en estrella con neutro de retorno, tanto las tensiones de línea como las tensiones fase-neutro vienen impuestas por la red. Al ser las tensiones fase-neutro en cada una de las fases idénticas y decaladas 120° , si despreciamos la caída de tensión en la resistencia y en la reactancia de dispersión del primario, los flujos en las tres unidades trifásicas serán exactamente iguales a los de vacío.

¿Cómo serán las corrientes que circulan por el primario de las dos unidades no cargadas? Pues como los flujos son exactamente iguales a los de vacío, las corrientes en esas dos unidades serán las corrientes de vacío precisas para crear los flujos anteriormente mencionados. Recuérdese que las corrientes de vacío son prácticamente insignificantes.

¿Y cómo será la corriente primaria en la unidad que sí que tiene carga en su secundario? Pues si el flujo en esa unidad es el mismo que se tenía con el transformador en vacío, la sumatoria de amperios-vuelta de primario más secundario es la misma que se tenía en vacío, esto es, la corriente por el primario es la suma de la precisa para crear el flujo más la precisa para cancelar los amperios-vuelta del secundario.

$$I_{R1} = 0 \quad (4.13 \text{ a})$$

$$I_{S1} = 0 \quad (4.13 \text{ b})$$

$$I_{T1} = I_0 + I_{d2} \frac{N_2}{N_1} \quad (4.13 \text{ c})$$

La existencia de hilo de neutro de retorno hace posible que la corriente en dos fases sea nula mientras que la corriente en la tercera no lo sea.

Como conclusión de lo dicho se puede afirmar:

- En un banco de transformación Yyn con carga desequilibrada fase-neutro, los desequilibrios de carga secundarios se traducen en desequilibrios de carga en el primario.
- Sin embargo, despreciando las pequeñas caídas de tensión en el arrollamiento primario, el flujo en cada uno de los núcleos es idéntico al de vacío. Eso significa que en este caso no van a existir sobretensiones en las tensiones fase-neutro ni en las tensiones fase-fase. En último término, esto es debido a que por el arrollamiento primario pueden circular corrientes homopolares que cancelen los amperios-vuelta producidos por la componente homopolar de la corriente de carga.

Por tanto, las cargas desequilibradas fase-neutro no suponen un problema especialmente importante en los bancos YNyn.

4.6.3. CARGAS DESEQUILIBRADAS FASE-NEUTRO EN TRANSFORMADORES YNyn DE NÚCLEO TRIFÁSICO

Lo dicho en el apartado precedente es aplicable también al caso de transformadores YNyn de núcleo trifásico. Por tanto en este tipo de transformadores los flujos ante carga desequilibrada son idénticos a los de vacío¹⁹ y por tanto no se tienen sobretensiones ni en las tensiones fase-fase ni en las tensiones fase-neutro.

4.6.4. CARGAS DESEQUILIBRADAS FASE-NEUTRO EN BANCOS DE TRANSFORMACIÓN Yyn

Para mayor simplicidad supongamos que sólo una unidad del banco de transformación tiene una carga conectada en su secundario mientras que las otras dos unidades se encuentran a circuito abierto (figura 4.17).

¹⁹ En realidad, si se tienen en cuenta las caídas de tensión en la resistencia y en la reactancia de dispersión de primario no son exactamente iguales.

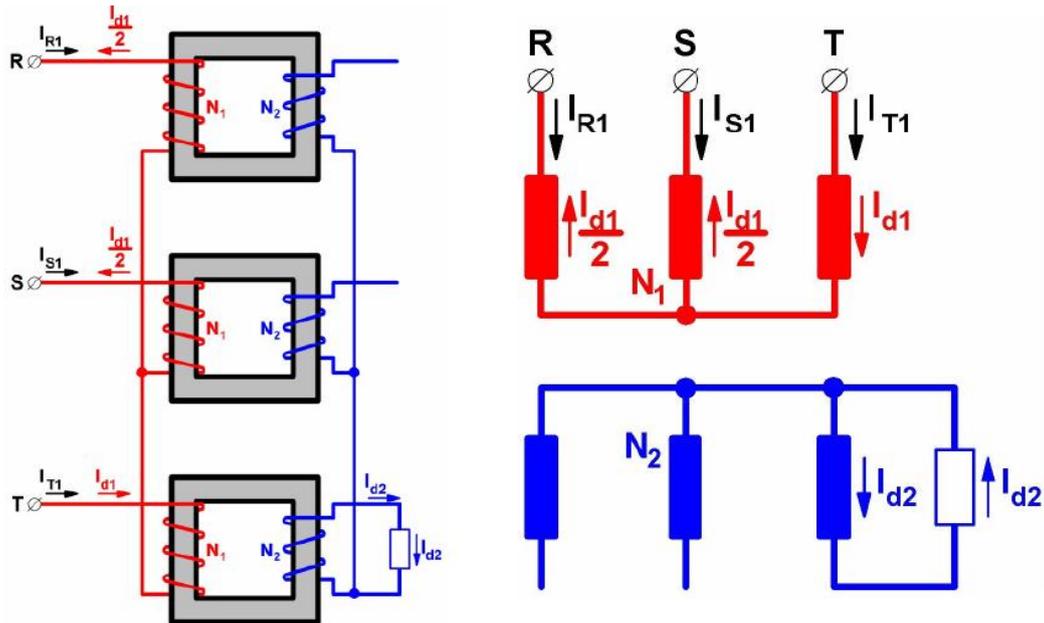


Figura 4.17: Carga desequilibrada fase-neutro en transformadores Yyn

Dado que en este caso no se ha llevado el neutro de retorno a la red, ésta sólo garantiza las tensiones fase-fase, pero no las tensiones fase-neutro.

La unidad del banco cuyo secundario está cargado demanda corriente por su primario. Dado que en este caso no existe hilo neutro de retorno en el primario, la corriente primaria de la fase cargada no puede retornar por el neutro y debe hacerlo por las otras dos fases. Sin embargo las otras dos fases tienen su secundario abierto, por lo que el secundario no puede circular intensidad alguna. Eso significa que las corrientes primarias no compensadas se convierten en corrientes de magnetización.

En una unidad monofásica, la corriente precisa para crear el flujo nominal es muy pequeña, porque la reluctancia del circuito magnético es muy reducida. Sin embargo, en el caso que nos ocupa por las dos fases no cargadas circulan intensidades muy elevadas. Por eso el flujo en dichas unidades es mucho mayor al que se tiene en vacío. Al ser muy elevado el flujo en dos de las unidades las tensiones que engendran dichos flujos (las tensiones fase-neutro de las dos unidades no cargadas) son muy elevadas. Afortunadamente, la saturación del núcleo hace que el flujo (y con él las sobretensiones) no sea tan elevado como lo sería si la permeabilidad del circuito magnético fuera constante.

Como se ha visto, las cargas desequilibradas fase-neutro en bancos de transformación Yyn son muy perjudiciales, ya que crean sobretensiones fase-neutro muy elevadas. Por eso se recomienda no extraer neutro en el secundario de un banco de transformación estrella-estrella si es que el primario no dispone de neutro de retorno.

4.6.5. CARGAS DESEQUILIBRADAS FASE NEUTRO EN TRANSFORMADORES Dyn

En este caso la red impone el valor de las tensiones de línea aplicadas al transformador, y dado que las tensiones de línea son las que quedan aplicadas a los arrollamientos del transformador, y que las tensiones aplicadas a los arrollamientos imponen el valor del flujo, se deduce que en este caso no va a haber sobretensiones en el secundario del transformador.

4.6.6. OTROS DESEQUILIBRIOS

Hasta aquí, la atención se ha centrado en los desequilibrios de carga fase-neutro. Se podría repetir el estudio para los desequilibrios fase-fase. No obstante, para no hacer el estudio más farragoso, únicamente se mencionarán las conclusiones:

- Las corrientes primarias de los transformadores cuyo secundario está cargado con una carga desequilibrada forman un sistema de corrientes desequilibrado
- No obstante, en ninguno de los casos aparecen flujos de una magnitud inusualmente elevada y por tanto tampoco se producen sobretensiones en las tensiones simples o compuestas del transformador
- Los desequilibrios de carga fase-fase no dan lugar a intensidades de secuencia homopolar

4.7. ALTERNATIVAS A LOS TRANSFORMADORES Yy

Como se ha visto en apartados precedentes, los transformadores Yy tienen un comportamiento no muy adecuado tanto en vacío como con carga desequilibrada²⁰. Además de lo anterior, los transformadores YNyn presentan una impedancia relativamente elevada al paso de las componentes homopolares de intensidad, lo cual repercute negativamente en la actuación de las protecciones²¹. Sin embargo, la configuración estrella es una configuración que, como se verá, es muy deseable en ciertas aplicaciones. Por tanto es conveniente disponer de un transformador que teniendo las ventajas de los transformadores Yy no tenga sus inconvenientes.

En las redes de muy altas tensiones el factor determinante es la necesidad de que el transformador presente una baja impedancia homopolar para conseguir una correcta actuación de las protecciones. Por el contrario, en redes de media tensión (20 kV, 15 kV) esto no es tan importante (ya que las protecciones empleadas son diferentes), si bien pudiera existir cierto desequilibrio de cargas en algunos transformadores conectados a dichas redes. Por eso, la alternativa a los transformadores Yy es diferente para los grandes transformadores de red que para los transformadores de distribución²².

²⁰ En realidad, el comportamiento del transformador depende mucho de la conexión del neutro del transformador

²¹ También esta afirmación depende mucho la conexión del neutro del transformador

²² Transformadores de distribución son los utilizados para entregar energía a los abonados

4.7.1. TRANSFORMADORES Yyd

Los problemas de los transformadores Yy funcionando en vacío y ante carga desequilibrada son debidos a la existencia de flujo homopolar.

Un transformador Yd tiene un comportamiento satisfactorio tanto en vacío como ante cargas desequilibradas. Lo mismo se puede decir de un transformador Dy y de uno Dd. Por tanto, se puede pensar que si un transformador tiene un arrollamiento en triángulo su comportamiento es satisfactorio. Siguiendo con esta línea de razonamiento se puede pensar que si a un transformador Yy se le añade un tercer arrollamiento en triángulo el transformador se comportará bien tanto en vacío como ante cargas desequilibradas.

La alternativa que se presenta en este apartado puede aplicarse tanto a transformadores de núcleo trifásico como a bancos de transformación compuestos por tres unidades monofásicas.

Para comprobar este aspecto imaginemos que se tiene un transformador con tres arrollamientos, dos de ellos en estrella y el tercero en triángulo (figura 4.17). Inicialmente supongamos que el triángulo está abierto (figura 4.19), e imaginemos que en este transformador (por la razón que sea) se tiene un flujo que es suma de una componente de secuencia directa más una componente de secuencia homopolar.

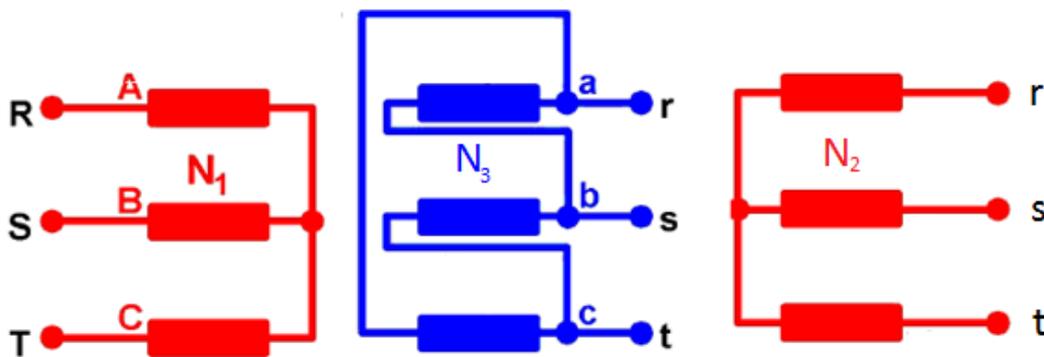


Figura 4.18: Transformador Yyd

En las fases del terciario en triángulo se engendrará una f.e.m.

$$e_{R3} = N_3 \frac{d\phi_{Rd}}{dt} + N_3 \frac{d\phi_{R0}}{dt} \quad (4.14 \text{ a})$$

$$e_{S3} = N_3 \frac{d\phi_{Sd}}{dt} + N_3 \frac{d\phi_{S0}}{dt} \quad (4.14 \text{ b})$$

$$e_{T3} = N_3 \frac{d\phi_{Td}}{dt} + N_3 \frac{d\phi_{T0}}{dt} \quad (4.14 \text{ c})$$

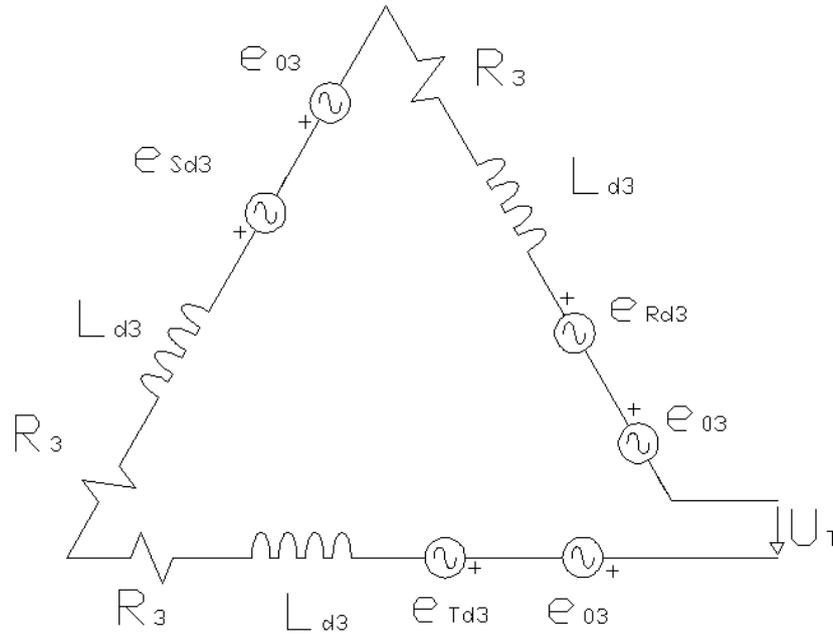


Figura 4.19: Fuerzas electromotrices engendradas en el terciario

Aplicando la segunda ley de Kirchoff a la malla formada por los tres arrollamientos en triángulo obtenemos la tensión en bornas:

$$U_T = e_{Rd3} + e_{03} + e_{Sd3} + e_{03} + e_{Td3} + e_{03} \quad (4.15)$$

Pero como las f.e.m. e_{Rd3} , e_{Sd3} y e_{Td3} son tres sinusoides iguales y decaladas 120° , su suma es igual a cero, y resulta

$$U_T = e_{03} + e_{03} + e_{03} = 3e_{03} \quad (4.16)$$

Esto es, en bornas del triángulo abierto sólo queda la componente homopolar.

¿Qué pasaría si ahora cerramos el triángulo? Pues que circula una corriente por el interior del mismo, de forma que

$$\sum \text{fuentes} = \sum \text{caídas de tensión}$$

$$e_R + e_S + e_T = 3N_3 \frac{d\phi_0}{dt} = 3 \left(R_3 i_{30} + L_{3d} \frac{di_{30}}{dt} \right) \quad (4.17)$$

Esta corriente tiene carácter inductivo, y como es sabido, una corriente de tipo inductivo se opone a la causa que la produjo, con lo que esta corriente tiende a borrar el flujo que la creó (el flujo homopolar). Evidentemente no lo podrá borrar del todo ya que esta corriente ha aparecido por la causa de que hay flujo homopolar y desaparecería si éste no existiese, pero se llega a un compromiso donde la corriente reduce el flujo homopolar hasta límites

inapreciables. Por esta razón, el transformador Yyd se comporta satisfactoriamente en vacío y ante carga desequilibrada.

Los transformadores Yyd son más caros que un transformador Yy, ya que el volumen de cobre es mayor al tener un tercer arrollamiento. También el volumen de hierro se incrementa, ya que la ventana del transformador debe ser más grande para que quepan los tres arrollamientos. Para que el precio del transformador no se eleve tanto es costumbre que el arrollamiento en triángulo no esté dimensionado para igual potencia que el primario o secundario.

Los transformadores Yyd son más débiles ante cortocircuito, ya que ante un cortocircuito fase-tierra en el secundario ocurre que el sistema de corrientes secundario contiene una componente importante de secuencia homopolar que hace que circulen corrientes por dentro del triángulo. En estas circunstancias existen unas fuerzas de repulsión entre el arrollamiento terciario y el arrollamiento más próximo a éste (frecuentemente el arrollamiento de BT).

Los arrollamientos terciarios tampoco soportan bien un cortocircuito trifásico en bornas del mismo si, como es costumbre, tanto el primario como el secundario están conectados a redes trifásicas que pueden aportar energía al cortocircuito (esto es, redes en la haya generación). Por eso es frecuente tapar las bornas del terciario con unos capuchones para evitar que un pájaro, la caída de un cable, una rama, etc, produzcan por accidente un cortocircuito trifásico.

En principio, el arrollamiento terciario puede ser utilizado para alimentar una carga (por ejemplo el transformador de servicios auxiliares de la subestación o por ejemplo reactancias de compensación del efecto Ferranti o condensadores de compensación de potencia reactiva) sin embargo esta solución (que en tiempos era relativamente frecuente) hoy en día casi no se utilizan. La razón de ello es que la protección del transformador se complica. Además de lo anterior, como se indicó, si se sacan conductores del terciario para alimentar una carga aumenta el riesgo de producirse un cortocircuito trifásico.

En los transformadores Yyd el flujo homopolar es prácticamente nulo y con él las f.e.m. homopolares en los tres arrollamientos del transformador. Dado que estas f.e.m. se oponen a la circulación de la corriente, la impedancia²³ que se ofrece a las corrientes de secuencia homopolar es reducida, lo cual es una ventaja para garantizar una efectiva puesta a tierra del transformador.

4.7.2. TRANSFORMADORES Yz

Un transformador Yz tiene su arrollamiento secundario dividido en dos mitades (figura 4.20). Uniendo los principios de bobina (o bien los finales de bobina) de las tres fases de una de las mitades se forma un neutro. El extremo no utilizado para formar el neutro se une con otro

²³ La impedancia es la oposición al paso de corriente, cociente entre la fem homopolar y la corriente homopolar

extremo de bobina de igual polaridad de otra de las fases. La figura 4.20 muestra la forma de conectar los semiarrollamientos y la figura 4.21 el ángulo horario del transformador.

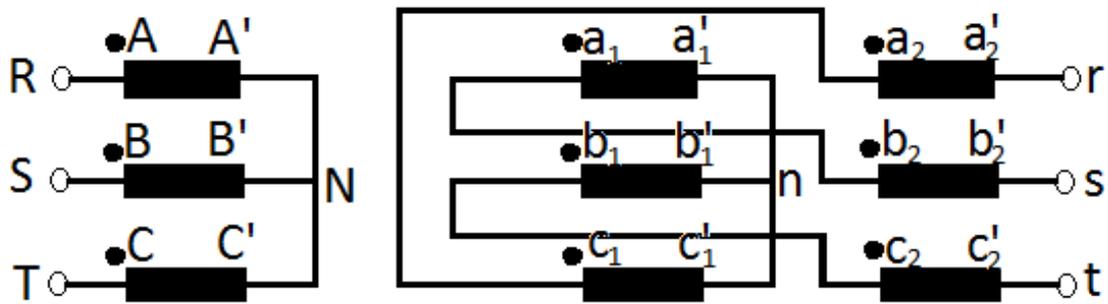


Figura 4.20: Transformador Yz. Los terminales A-a₁-a₂ son terminales de igual polaridad (idem para las fases B y C)

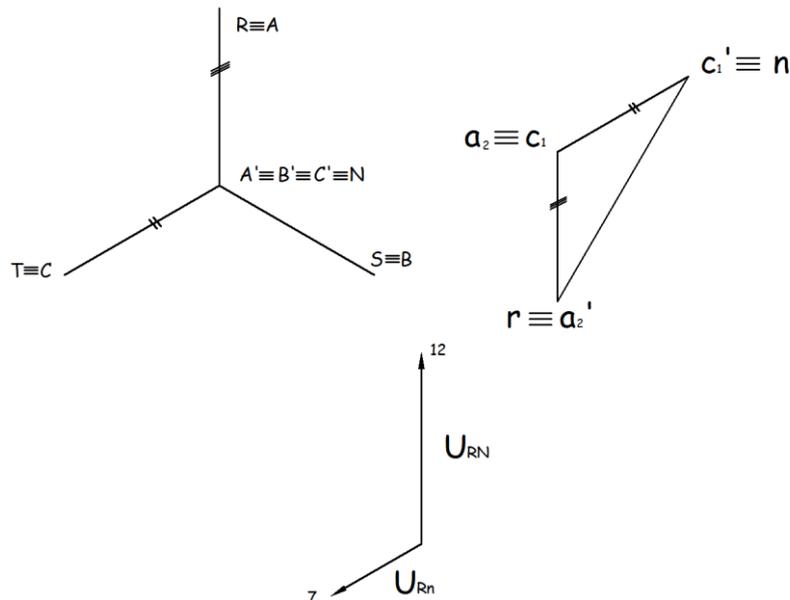


Figura 4.21: Ángulo horario del transformador de la figura 4.20

La ventaja de la configuración en zig-zag es que aunque en el transformador existan flujos homopolares no se generan sobretensiones fase-neutro. Para demostrarlo, supongamos que en el transformador se tiene un flujo que contiene una componente homopolar.

$$\Phi_R = \Phi_{Rd} + \Phi_{R0} \quad (4.18 \text{ a})$$

$$\Phi_S = \Phi_{Sd} + \Phi_{S0} \quad (4.18 \text{ b})$$

$$\Phi_T = \Phi_{Td} + \Phi_{T0} \quad (4.18 \text{ c})$$

La tensión fase-neutro del secundario será

$$u_{rn} = u_{a'2a_2} + u_{c_1c'1} = -u_{a_2a'2} + u_{c_1c'1} \quad (4.19)$$

Donde

$$u_{a_2 a'2} = \frac{N_2}{2} \frac{d\Phi_{Rd}}{dt} + \frac{N_2}{2} \frac{d\Phi_{R0}}{dt} \quad (4.20 a)$$

$$u_{c_2 c'2} = \frac{N_2}{2} \frac{d\Phi_{Td}}{dt} + \frac{N_2}{2} \frac{d\Phi_{T0}}{dt} \quad (4.20 b)$$

Con lo que la tensión fase-neutro queda

$$u_{rn} = -\frac{N_2}{2} \frac{d\Phi_{Rd}}{dt} - \frac{N_2}{2} \frac{d\Phi_{R0}}{dt} + \frac{N_2}{2} \frac{d\Phi_{Sd}}{dt} - \frac{N_2}{2} \frac{d\Phi_{S0}}{dt} \quad (4.21)$$

Pero al ser los flujos homopolares sinusoides idénticas y en fase queda

$$u_{rn} = -\frac{N_2}{2} \frac{d\Phi_{Rd}}{dt} + \frac{N_2}{2} \frac{d\Phi_{Sd}}{dt} \quad (4.22)$$

Como se desprende de la ecuación (4.22) el efecto de los flujos homopolares se cancela, por lo que no aparecen sobretensiones fase-neutro.

Obtengamos ahora la relación de transformación del transformador en función del número de espiras de los arrollamientos:

$$r_t = \frac{U_{1L}}{U_{2L}} = \frac{\sqrt{3}U_{1FN}}{\sqrt{3}U_{2FN}} \quad (4.23)$$

La relación entre la tensión fase-neutro del secundario y la tensión inducida en cada semidevanado es (figura 4.22)

$$U_{2FN} = 2U_d \cos 30 = U_d \sqrt{3} \quad (4.24)$$

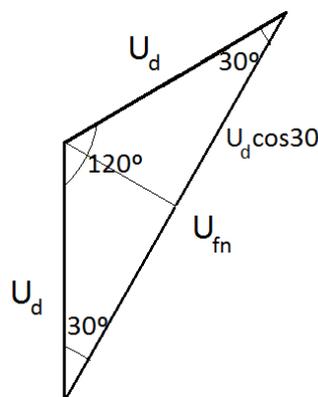


Figura 4.22: Relación entre la tensión en los semidevanados y la tensión fase-neutro

Con lo que la relación de transformación queda

$$r_t = \frac{U_{1FN}}{U_{2FN}} = \frac{4,44fN_1\Phi}{\sqrt{3}4,44f\frac{N_2}{2}\Phi} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_1}{N_2} \quad (4.25)$$

De la ecuación (4.25) se deduce que los transformadores Yz necesitan un mayor volumen de cobre que los transformadores Yy para conseguir una determinada relación de transformación. En efecto, supongamos que queremos transvasar energía de una red de una tensión U_{1L} a otra red con tensión U_{2L} y nos planteamos si utilizar un transformador Yy o uno Yz. Supongamos que el número de espiras del arrollamiento primario (N_{1Y}) es idéntico en ambos casos. El número de espiras del secundario en cada uno de los transformadores (N_{2Y} y N_{2z} , respectivamente) debe cumplir:

$$r_t = \frac{N_{1Y}}{N_{2Y}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{N_{1Y}}{N_{2z}} \quad (4.26)$$

Con lo que la relación entre los números de espiras del secundario de los dos transformadores debe ser

$$N_{2z} = \frac{2}{\sqrt{3}} N_{2Y} = 1,15 N_{2Y} \quad (4.27)$$

Esto es, el secundario del transformador en zig-zag debe tener un 15% más de cobre. En último término esto es debido a que las tensiones en los semi-devanados del secundario no se suman modularmente.

Por lo demás, se podría demostrar que el comportamiento del transformador Yz ante cargas desequilibradas (ya sean fase-neutro o fase-fase) es satisfactorio, y no da lugar a flujos homopolares.

Hasta aquí se ha hablado de los transformadores Yz, sin embargo, en algunos países se utilizan reactancias en zig-zag para la puesta a tierra de las redes. La razón de ello es que la inductancia homopolar de una reactancia en zig-zag es nula, ya que en las tensiones fase-neutro no aparece componente homopolar (ecuación 4.22) ni siquiera en el caso de que circule una corriente homopolar por dicha reactancia, con lo que la impedancia homopolar (cociente entre la tensión homopolar en bornas de la reactancia y la corriente homopolar) se reduce a la resistencia del arrollamiento. Este reducido valor de la impedancia homopolar garantiza una efectiva puesta a tierra de la red.

4.8. TRANSFORMADORES DE TRES ARROLLAMIENTOS

En ocasiones se precisa alimentar dos o más usuarios a partir de una misma fuente de alimentación y se desea que los usuarios estén galvánicamente aislados entre sí, en esas ocasiones cabe emplear transformadores con un primario y varios secundarios (figura 4.23). Los transformadores de tres (o más) arrollamientos pueden ser monofásicos (como en la figura

4.23) o trifásicos; los transformadores Yyd estudiados en el apartado 4.7.1 son un ejemplo de éstos últimos. En este apartado estudiaremos con mayor detenimiento los transformadores de tres arrollamientos y se hará una breve mención de los transformadores de cuatro o más arrollamientos.

Para designar un transformador de tres arrollamientos se debe dar la potencia asignada de cada uno de los arrollamientos, así como la tensión asignada de cada uno de ellos. Si el transformador es trifásico además se dará la forma de conexión de los arrollamientos y el índice horario respectivo, por ejemplo

Transformador 60/60/20 MVA, 132/45/10 kV, YNyn0d11

Aunque en todo instante de tiempo las potencias activa y reactiva que toma el primario de la red deben ser iguales a la suma de las potencias activa y reactiva que entregan el secundario y el terciario a sus cargas respectivas (más las pérdidas de potencia activa en el transformador, para el caso del balance de potencias activas, o la suma de las potencias reactivas precisas para establecer los flujos común y disperso, en el caso del balance de potencias reactivas), la potencia asignada del primario no tiene por qué ser igual a la suma de las potencias asignadas de secundario y de terciario, debido a la posible no simultaneidad de cargas.

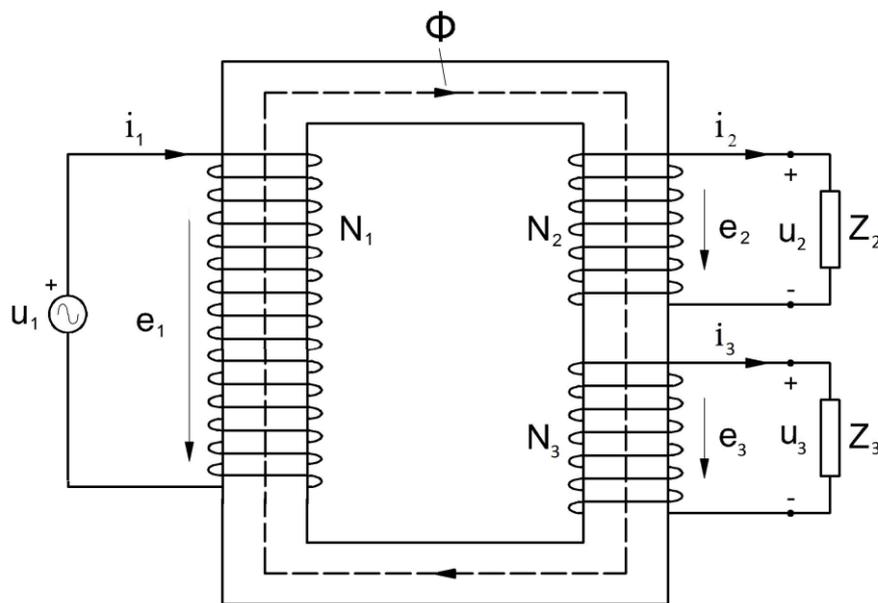


Figura 4.23: Transformador monofásico de tres arrollamientos

Dado que las caídas de tensión de la ecuación debidas a la resistencia de los arrollamientos son reducidas, y admitiendo que el flujo de dispersión es mucho menor al común, se puede afirmar, de forma aproximada, 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.

$$N_1 \cdot \bar{I}_1 - N_2 \cdot \bar{I}_2 - N_3 \cdot \bar{I}_3 = N_1 \cdot \bar{I}_0 \tag{4.28}$$

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.

El circuito equivalente de un transformador de tres arrollamientos es un tanto complejo, y se muestra en la figura 4.24 a. Ante secuencia directa las impedancias del circuito equivalente son casi inductivas puras, y por simplicidad así se han representado en la figura 4.24a.

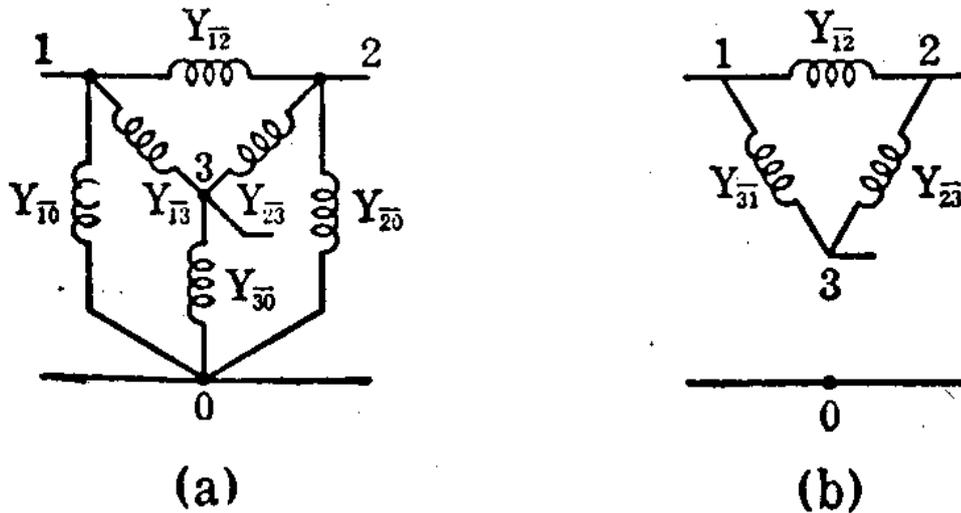


Figura 4.24: Circuito equivalente del transformador de tres arrollamientos (a) circuito equivalente exacto (b) circuito equivalente despreciando las impedancias magnetizantes.

Si, como ocurre habitualmente, las impedancias magnetizantes son mucho mayores que las de dispersión, se pueden despreciar, con lo que se llega al circuito de la figura 4.24 (b). Aplicando la transformación triángulo-estrella (también conocida como teorema de Kennelly o teorema de Rosen), la figura 4.24 (b) se puede convertir en la 4.25. Sin embargo, dado que las impedancias de la figura 4.25 han sido obtenidas mediante transformaciones matemáticas, ya no es posible afirmar que las reactancias X_{1d} , X_{2d} , X_{3d} representen los flujos de dispersión ligados a cada uno de los arrollamientos, y pudiera ocurrir, incluso, que alguna de las impedancias tuviera signo negativo, lo cual carece de sentido físico. Eso es lo que ocurre frecuentemente con la reactancia ligada al arrollamiento que ocupa la posición intermedia.

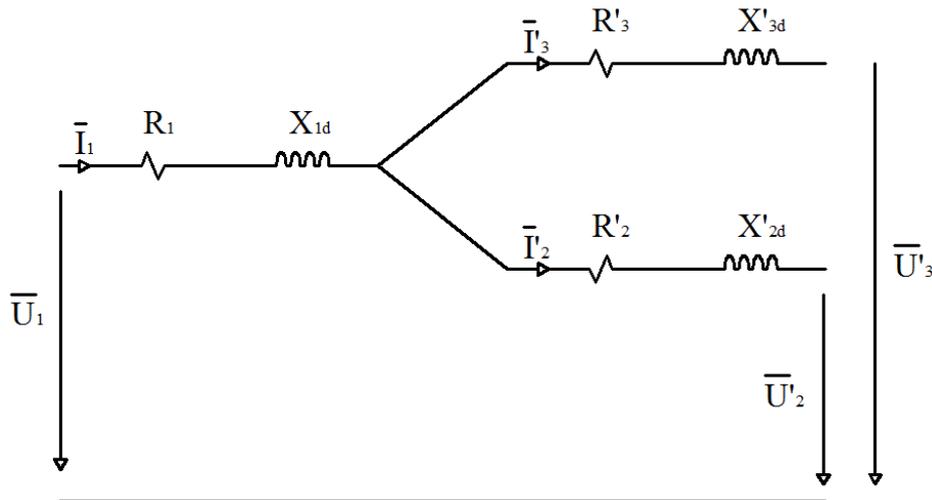


Figura 4.25. Circuito equivalente de un transformador con tres arrollamientos

En el circuito de la figura 4.25 la relación de transformación precisa para referir las magnitudes del secundario al primario es diferente que la que se precisa para referir las magnitudes de terciario al primario, por ejemplo

$$\bar{U}'_2 = r_{t12} \bar{U}_2 \tag{4.29}$$

$$\bar{U}'_3 = r_{t13} \bar{U}_3 \tag{4.30}$$

Las impedancias del circuito de la figura 4.25 se pueden expresar en porcentaje sobre una impedancia base que suele ser el cociente entre la tensión nominal y la intensidad nominal.

$$\varepsilon_{Zi} = \frac{Z_i I_{iN}}{U_{iN(FN)}} 100 = \frac{Z_i S_{Ni}}{U_{iNL}^2} \tag{4.31}$$

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

Para obtener los parámetros del circuito de la figura 4.25 se precisan tres ensayos de cortocircuito (ya que se han de determinar tres parámetros del circuito equivalente) el primero de ellos energizando el primario, con el secundario cortocircuitado, el segundo energizando el primario, con el terciario cortocircuitado y el tercero energizando el secundario con el terciario cortocircuitado.

Las ventajas del transformador de tres arrollamientos frente a la utilización de dos transformadores de dos arrollamientos son económicas (menor coste de adquisición y mayor rendimiento), por el contrario la construcción del transformador se complica mucho (fundamentalmente en lo que se refiere a garantizar la aptitud para soportar esfuerzos de cortocircuito) y desde el punto de vista de la operación las caídas de tensión en uno de los arrollamientos depende de la carga en el otro.

Gran parte de lo indicado para los transformadores de tres arrollamientos es aplicable a los arrollamientos de cuatro o más arrollamientos. Sin embargo, el circuito equivalente de la figura 4.25 no puede ser generalizado para cuatro o más arrollamientos. Y hay que utilizar un

circuito como es de la figura 4.26 o bien prescindir de circuitos equivalentes y plantear el problema en términos de impedancias propias y mutuas como se muestra en la ecuación 4.32.

$$\begin{bmatrix} \bar{U}_1 \\ \bar{U}_2 \\ \bar{U}_3 \\ \bar{U}_4 \end{bmatrix} = j\omega \begin{bmatrix} L_1 & M_{12} & M_{13} & M_{14} \\ M_{21} & L_2 & M_{23} & M_{24} \\ M_{31} & M_{32} & L_3 & M_{34} \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & L_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

En la ecuación (4.32) se ha despreciado la parte resistiva de la impedancia, pero si se desea puede tenerse en cuenta cambiando las inductancias propias y mutuas por impedancias propias y mutuas.

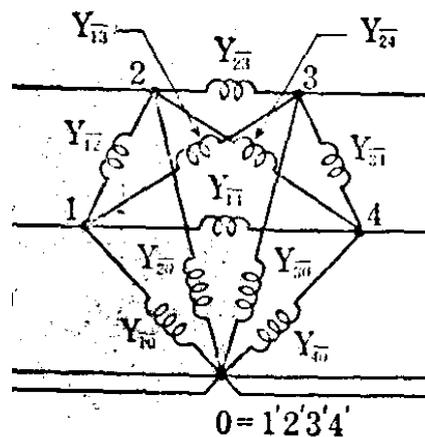


Figura 4.26. Circuito equivalente de un transformador de cuatro arrollamientos

4.9. REGULACIÓN DE TENSIÓN EN TRANSFORMADORES

En una línea eléctrica la tensión en un determinado punto depende de las caídas de tensión en la línea, y dado que el grado de carga de una línea es variable a lo largo del día, la tensión también será variable.

Si se desea que la tensión en bornas del secundario de un transformador sea constante a pesar de que la tensión primaria varía, se debe modificar la relación de transformación. La relación de transformación es proporcional al cociente del número de espiras²⁴

$$r_t = \frac{U_{1L}}{U_{2L}} \propto \frac{N_1}{N_2} \quad (4.37)$$

Para modificar la relación de transformación se practican en uno de los arrollamientos del transformador unas derivaciones o tomas.

²⁴ En particular, si la configuración del transformador es Yy o Dd, la relación de transformación coincide con el número de espiras.

La regulación de tensión en transformadores puede ser de dos tipos.

- Regulación de tensión en vacío
- Regulación de tensión en carga

Cuando un transformador tiene regulación de tensión en vacío, para cambiar de toma es preciso retirar tensión al transformador. En este caso, el dispositivo de cambio de toma es manual y se encuentra ubicado en la tapa del transformador. Frecuentemente el cambio de tomas se realiza muy pocas veces (o ninguna) en la vida del transformador. Este tipo de regulación se suele emplear en transformadores de distribución y en centrales de generación de energía. En transformadores de distribución el motivo de las tomas en vacío (frecuentemente cinco tomas, la central, $\pm 2,5\%$ y $\pm 5\%$) es paliar las caídas de tensión en la línea de alimentación al transformador, que será más corta o más larga dependiendo de la distancia entre la subestación precedente y el centro de transformación en el que está ubicado el transformador. La razón de utilizar transformadores con tomas en vacío en generación es que la regulación de tensión se realiza actuando sobre la corriente de excitación del generador, por lo que no es preciso encarecer el transformador con un cambiador de tomas en carga.

La regulación de tensión mediante un cambiador de tomas en carga se lleva a cabo en los transformadores de la red de transporte y de distribución, en este caso, el cambio de tomas es muy frecuente (varias veces en un día). Cuando se cambia de una toma a otra en un transformador que tiene una tensión aplicada, si durante el cambio de una toma a la siguiente existiera un instante en el cual ninguna toma quedara conectada a la borna de salida (figura 4.27 a), la línea de salida quedaría sin tensión, lo cual no es deseable, pues produciría un hueco de tensión. Si por el contrario el cambiador de tomas en carga tocara dos tomas simultáneamente, se produciría un cortocircuito en un cierto número de espiras (figura 4.27b), originando una corriente de circulación importante que llegaría a dañar el arrollamiento.

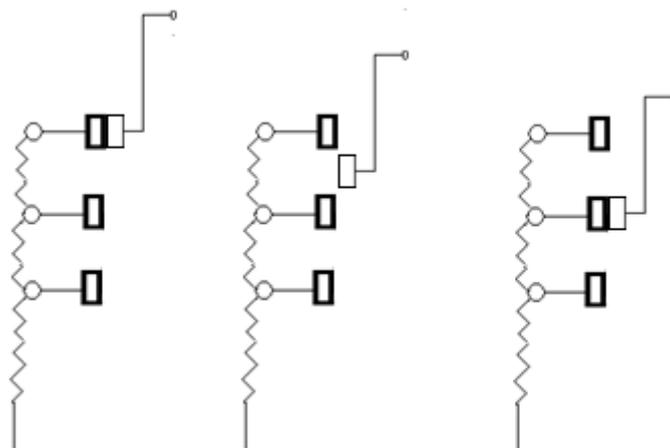


Figura 4.27: Situaciones no deseables en un cambiador de tomas en carga a) Durante el cambio de tomas existe un momento en el que el terminal de salida queda sin tensión.

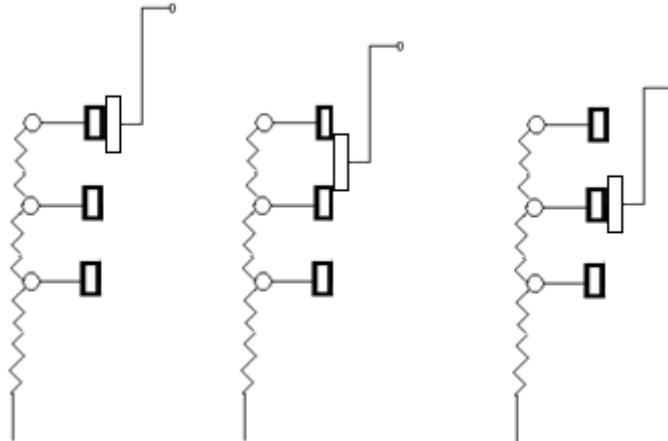


Figura 4.27: Situaciones no deseables en un cambiador de tomas en carga b) Durante el cambio de tomas existe un momento en el que dos tomas son cortocircuitadas

Para reducir esta corriente de circulación, la solución es conectar una impedancia (frecuentemente una resistencia) entre los tomas que están siendo cortocircuitadas para limitar la corriente de cortocircuito.

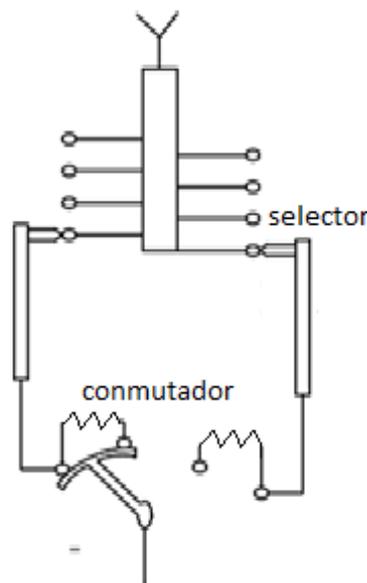


Figura 4.28: Resistencia de conmutación en un cambiador de tomas en carga

La resistencia que se intercala entre las tomas que están siendo cortocircuitadas está sometida a esfuerzos térmicos importantes, por ello es preciso que el cambio de una toma a otra se produzca en un tiempo muy breve (de 40 a 80 ms).

Con el fin de reducir el tiempo de cambio de toma, se separan las misiones de selección de la toma siguiente (que se lleva a cabo en el selector) y de conmutación de una toma a la siguiente (que se lleva a cabo en el conmutador), tal como se muestra en la figura 4.28. El selector trabaja sin interrumpir corriente, por eso puede estar introducido en la cuba principal bañada

con el mismo aceite que el arrollamiento. El conmutador, por el contrario establece e interrumpe corrientes, y por tanto en él se producen arcos eléctricos que descomponen el aceite, por eso se encierra el conmutador en una pequeña cuba estanca con un aceite independiente del aceite principal del transformador. Recientemente han aparecido en el mercado conmutadores herméticos en cuyo interior se ha hecho el vacío; de esta manera el vacío cumple la misión que en los conmutadores clásicos cumple el aceite como medio aislante.

El conmutador es extraíble (figura 4.29), de forma que se pueda realizar mantenimiento de los contactos o reparaciones en caso de avería. El selector, sin embargo, no es extraíble, ya que el número de averías en el mismo es muy inferior al del conmutador. Habitualmente se dispone de una boca de hombre en la cuba a la altura del selector para inspección en el caso de una avería en el mismo (figura 4.30).

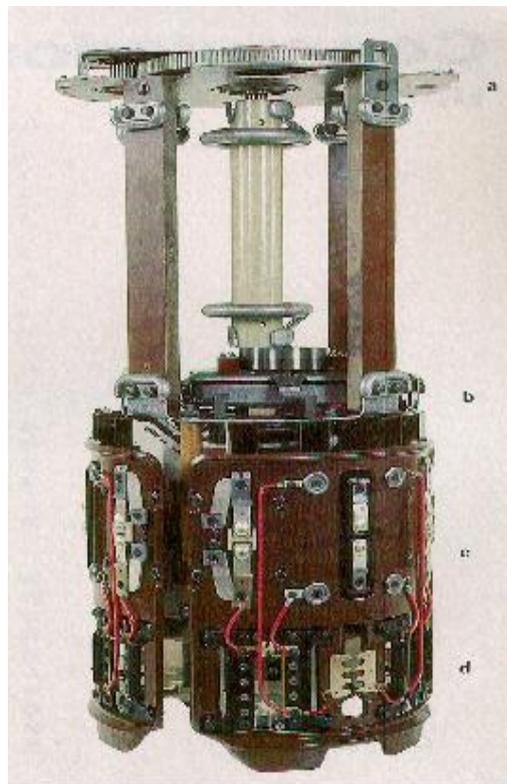


Figura 4.29: Conmutador



Figura 4.30: Boca de hombre para la inspección del selector en cambiadores de tomas internos. En la figura se observa, además, parte del árbol de transmisión mecánica entre la caja de mando del regulador (situada por debajo de la fotografía, a la izquierda) y la tapa del regulador.

Para conseguir que el número de tomas sea menor al número de posiciones de regulación se pueden adoptar dos soluciones:

- **INVERSOR:** En este caso se divide el arrollamiento en dos partes. La parte principal carece de tomas. Las tomas se sitúan en el bobinado de regulación. Las tensiones en el devanado de regulación se suman o se restan a las engendradas en el arrollamiento principal. Así, en la figura 4.31a la tensión en bornas del transformador es la suma de las tensiones en los arrollamientos, mientras que en la figura 4.31b la tensión sería la resta:

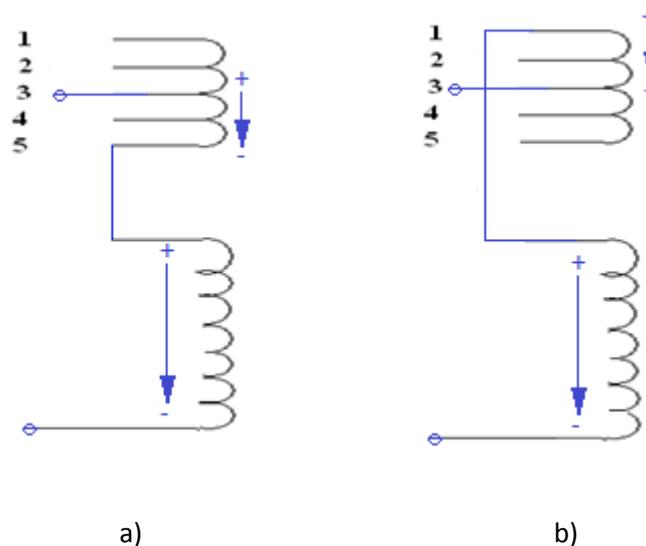


Figura 4.31: Cambiador de tomas en carga con inversor a) Posición aditiva b) Posición sustractiva

- **GRAN ESCALÓN:** En este caso se divide el bobinado en tres partes, la parte principal, la regulación gruesa y la regulación fina. En las posiciones de regulación de tensión

inferior a la central el arrollamiento de regulación gruesa queda fuera de servicio, como se muestra en la figura 4.32a. En las posiciones de regulación de tensión superior a la central quedan en servicio los tres arrollamientos (el principal, el de regulación gruesa y el de regulación fina). La ventaja de esta alternativa es que se tienen menos pérdidas por efecto Joule, ya que en las posiciones de regulación de tensión inferior a la central no circula corriente por una parte del arrollamiento. A pesar de ello esta solución se utiliza bastante menos que la anterior.

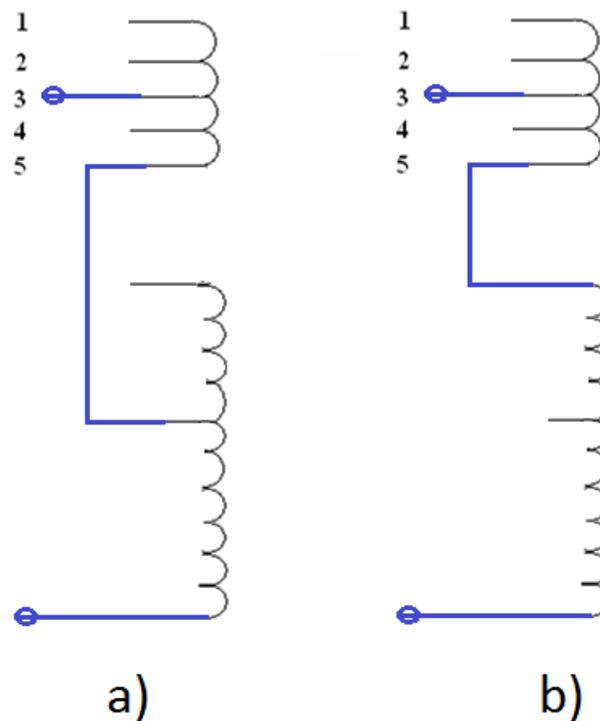


Figura 4.32: Cambiador de tomas en carga con gran escalón a) Posiciones de regulación inferiores a la central b) Posiciones de regulación de tensión superior a la de la posición central

4.9.1. UBICACIÓN DE LAS TOMAS.

Aunque en algún transformador se disponen tomas tanto en el arrollamiento de AT como en el arrollamiento de BT²⁵, esto no es lo habitual, y lo más normal es que se dispongan tomas sólo en uno de los dos arrollamientos.

En ausencia de otras exigencias para la colocación de las tomas se siguen los siguientes criterios:

- Las tomas se colocan en el arrollamiento de alta tensión, donde las corrientes en las tomas son menores, de esta forma se reduce la sección de los contactos y con ello también se reduce el coste de éstos.

²⁵ Cuando así se hace, sólo en uno de los dos arrollamientos la regulación de tensión es en carga, mientras que en el otro la regulación de tensión es en vacío.

- Una vez decidido en qué arrollamiento ubicar las tomas queda por decidir en qué lugar de ese arrollamiento. En los arrollamientos en estrella con cambio de tomas en carga es preferible colocar las tomas cerca del extremo de neutro (figura 4.33). Con ello se tienen menores diferencias de potencial entre las tomas y tierra. Ello permite ahorrar costes en aislamiento. Téngase en cuenta que el conmutador es un cilindro de dimensiones reducidas al que se llevan las tomas de las tres fases del transformador.
- En los arrollamientos en triángulo las tomas se disponen en el punto medio (figura 4.33).

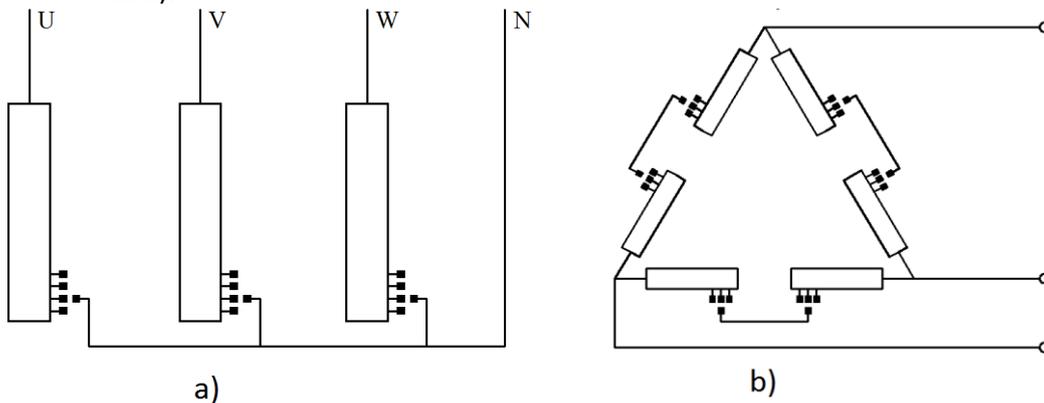


Figura 4.33: Ubicación de las tomas en un arrollamiento en estrella (a) y en un arrollamiento en triángulo (b)

- Cuando se eliminan de servicio espiras en un transformador, se ha de procurar que los amperios-vuelta de los arrollamientos conserven la simetría axial. La razón de ello es que cuando se tienen arrollamientos con simetría la componente axial de la fuerza entre arrollamientos se compensa (figura 4.34a), mientras que si los arrollamientos están axialmente descompensados (figura 4.34b), la resultante de las fuerzas puede ser suficientemente elevada como para comprimir los arrollamientos con las vigas de apriete hasta deformarlos.

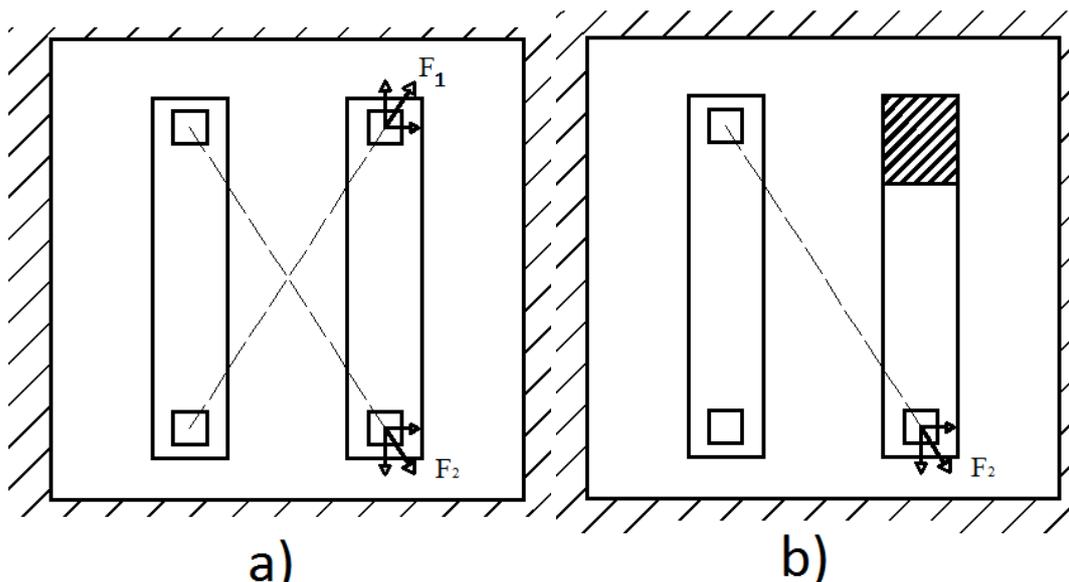


Figura 4.34:a) Compensación de la componente axial de las fuerzas de repulsión entre arrollamientos en transformadores con arrollamientos simétricos (b) Si no circula corriente por una parte del arrollamiento la componente axial no está compensada

- Cuando el transformador dispone de pocas tomas, (generalmente transformadores con regulación en vacío) es frecuente situar las tomas en el centro del arrollamiento (figura 4.35a) para evitar esfuerzos axiales no compensados entre arrollamientos. En otras ocasiones se sitúan como se muestra en la figura 4.35 b.

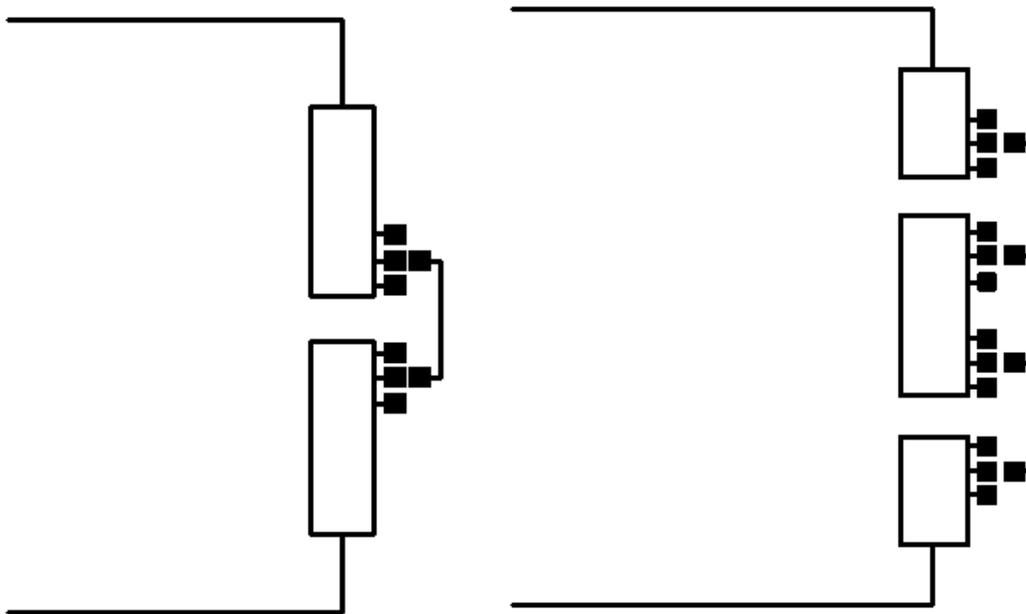


Figura 4.35: Ubicación de las tomas en transformadores con regulación de tensión en vacío.
a) Tomas en el centro del arrollamiento b) Tomas simétricamente dispuestas. Nótese que las diferentes partes en las que está dividido el arrollamiento (dos en la figura *a* tres en la *b*) deben estar aisladas galvánicamente para que no queden espiras en cortocircuito a través de los latiguillos de selección de las tomas.

- Sin embargo, cuando el transformador dispone de un gran número de tomas (cosa habitual si se tiene un cambiador de tomas en carga) lo normal es que las tomas se dispongan en un arrollamiento de regulación separado de la parte del arrollamiento de AT que no tiene tomas. El arrollamiento de regulación suele ser el más externo; la razón de ello es que hay que sacar muchas tomas al conmutador del transformador y el sacar esas tomas afuera es más fácil si el cilindro de regulación es externo. De esta forma, la disposición más habitual²⁶ de los arrollamientos es: Tercario-Baja-Alta-Regulación (figura 4.36).

²⁶ La más habitual, pero no la única, especialmente en caso de grandes potencias.

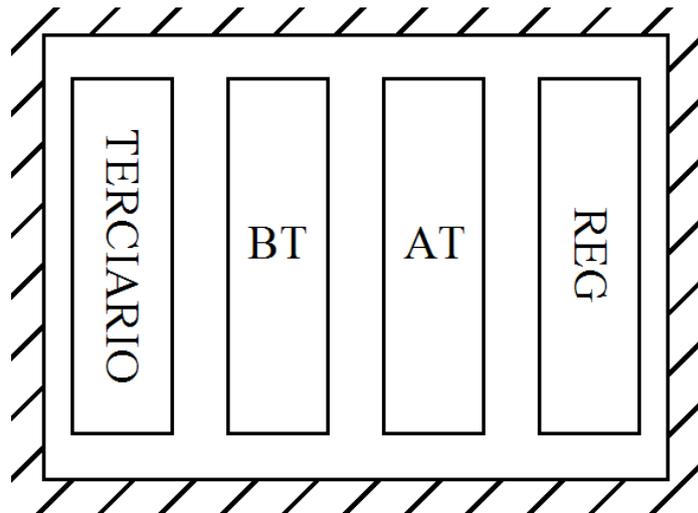


Figura 4.36: Disposición más habitual de los arrollamientos en la ventana de un transformador Yyd

4.10. CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS DIFERENTES TIPOS DE TRANSFORMADORES

4.10.1. CRITERIOS GENERALES DE APLICACIÓN DE ARROLLAMIENTOS EN ESTRELLA Y DE ARROLLAMIENTOS EN TRIÁNGULO

Volumen de cobre requerido

Antes de analizar los criterios generales de aplicación de arrollamientos en estrella y de arrollamientos en triángulo, es preciso indicar que para una tensión y una intensidad dada, el volumen de cobre que se precisa es el mismo tanto si el arrollamiento está en estrella como si el arrollamiento está en triángulo. Para demostrar esta afirmación es preciso analizar la longitud de cobre necesaria y la sección de cobre necesaria.

Si en ambos casos el núcleo magnético es el mismo (misma sección de hierro y misma inducción, y por tanto mismo flujo), el número de espiras que se precisa es mayor si el arrollamiento está en triángulo que si el arrollamiento está en estrella: La razón de ello es que el bobinado en triángulo está sometido a la tensión de línea, con lo que se cumple.

$$U_L = 4,44 f N_D \phi \quad (4.38)$$

Mientras que el bobinado en estrella tiene aplicada la tensión fase-neutro, de modo que:

$$\frac{U_L}{\sqrt{3}} = 4,44 f B S_{Fe} N_Y \quad (4.39)$$

Si el flujo es igual en ambos casos el arrollamiento en triángulo tiene que tener un número de espiras mayor.

$$N_D = \sqrt{3} N_Y \quad (4.40)$$

Para comparar la sección de cobre hay que tener en cuenta que si el arrollamiento está en estrella, la intensidad que recorre el arrollamiento es la intensidad de línea (I_L), Mientras que si el arrollamiento está en triángulo, la intensidad que atraviesa el bobinado es menor ($\frac{I_L}{\sqrt{3}}$).

Si admitimos que la densidad de corriente es la misma en ambos casos²⁷:

$$\delta = \frac{I_L}{S_{Cu\lambda}} \quad (4.41a)$$

$$\delta = \frac{\frac{I_L}{\sqrt{3}}}{S_{Cu\Delta}} \quad (4.41 b)$$

Igualando las densidades de corriente en cada caso

$$\frac{I_L}{S_{Cu\lambda}} = \frac{\frac{I_L}{\sqrt{3}}}{S_{Cu\Delta}} \Rightarrow \frac{S_{Cu\lambda}}{\sqrt{3}} = S_{Cu\Delta} \quad (4.42)$$

Por tanto, en el caso del triángulo el hilo es más fino y más largo, mientras que en el caso de estrella es más grueso y más corto, pero el volumen es el mismo.

$$l_{Cu\Delta} \cdot S_{Cu\Delta} = l_{Cu\lambda} \cdot S_{Cu\lambda} \quad (4.43)$$

Ventajas de los arrollamientos en triángulo

En corriente continua, la intensidad que circula por un conductor se reparte por igual por todo él, de modo que cada mm^2 tiene la misma corriente. Sin embargo, en corriente alterna hay un efecto, llamado efecto pelicular que hace que la densidad de corriente en la periferia del conductor sea superior a la densidad de corriente en el centro del mismo. Para evitar infrutilizar el cobre, en caso de corrientes elevadas en lugar de utilizar un conductor grueso

²⁷ Esto en realidad no es del todo cierto: En la determinación de la sección de un conductor, un parámetro de gran importancia es la densidad de corriente pues la densidad de corriente determina las pérdidas por unidad de volumen del hilo.

$$\frac{P_{Cu}}{Vol_{Cu}} = \rho \delta^2$$

En realidad la densidad de corriente de diseño no es la misma en un hilo grueso que en un hilo fino, ya que en un cuerpo pequeño se evacua mejor el calor que en uno grande. Por eso, cuanto más grueso es un conductor menor será la densidad de corriente de diseño. A pesar de lo anterior, en la demostración que sigue nosotros consideraremos que la densidad de corriente es idéntica, ya que en caso contrario la comparación sería muy engorrosa.

los conductores se dividen en varios conductores en paralelo. Los conductores en paralelo se han de trasponer para que no circule más corriente por uno de los caminos en paralelo que por los otros.

Si en un transformador la potencia es muy elevada en relación a su tensión, la corriente es muy elevada.

$$\uparrow I = \frac{S \uparrow}{\sqrt{3}U \downarrow} \quad (4.44)$$

En estos casos, la configuración en triángulo presenta cierta ventaja frente a la configuración estrella, ya que por los conductores de un triángulo circula 1,73 veces menos corriente, con lo cual el número de veces que hay que dividir el conductor es menor y la fabricación del arrollamiento se simplifica un poco (menos trasposiciones).

Ventajas de los arrollamientos en estrella

Los arrollamientos en estrella presentan varias ventajas:

En primer lugar, una estrella permite extraer neutro, lo cual puede ser de utilidad para alimentar usuarios monofásicos entre fase y neutro (caso de transformadores de distribución).

Los transformadores en estrella son especialmente indicados para altas tensiones, pues en altas tensiones el aislamiento se encarece y los transformadores en estrella son más fáciles de aislar en el caso de neutro puesto a tierra.

En tercer lugar, como se vio en el apartado anterior, si el cambiador de tomas en carga se pone en el extremo de neutro en lugar de ponerlo en el extremo de línea el aislamiento del cambiador de tomas es más simple y el cambiador es más económico.

Por todas las razones anteriores, la configuración estrella es sin lugar a dudas la configuración preferida en las redes de altas y muy altas tensiones.

Además de lo anterior, el transformador en estrella está especialmente indicado si el transformador es de potencia reducida en relación a su tensión (esto es, si la corriente es reducida)

$$\downarrow I = \frac{S \downarrow}{\sqrt{3} \cdot U \uparrow} \quad (4.45)$$

Ya que si en este caso el arrollamiento del transformador se conectara en triángulo la sección del conductor debería ser una sección excesivamente pequeña, y los conductores pequeños no soportan bien las sollicitaciones mecánicas de cortocircuito.

4.10.2. PUESTA A TIERRA DE LAS REDES ELÉCTRICAS

La política de puesta a tierra de la red es un aspecto que determina en gran medida el tipo de transformador que se utiliza, ya que habitualmente la puesta a tierra de una red se lleva a cabo en los transformadores de la misma²⁸. Por eso, antes de entrar a analizar el campo de aplicación de los diferentes transformadores estudiados es preciso analizar de forma breve qué tipo de redes se explotan puestas a tierra y cuáles aisladas.

Como se estudiará en otras asignaturas, las redes de Alta Tensión (132 kV, 66 kV, 45 kV) y Muy Alta Tensión (400 kV, 220 kV) son redes con el neutro puesto a tierra. La razón de ello es que en redes puestas a tierra se tienen menores sobretensiones de maniobra y de frecuencia industrial (por ejemplo, las que se tienen en caso de una falta fase-neutro), con lo que el hecho de poner a tierra la red permite que los diferentes elementos de la misma (disyuntores, seccionadores, pararrayos, transformadores de intensidad, etc) sea más baratos, pues se han de diseñar con un menor nivel de aislamiento.

Así como hay unanimidad al respecto de las redes de Alta y Muy alta Tensión, la política de puesta a tierra de las redes de media tensión (20 kV, 15 kV) depende de la compañía eléctrica, y es diferente para cada compañía. El trabajar con el neutro aislado de tierra permite que las corrientes en el caso de falta entre una fase y tierra (la falta más frecuente) sean muy reducidas, con lo que los equipos sufren menos en este tipo de eventualidades.

Por último, en las instalaciones de baja tensión se precisa una distribución a cuatro hilos (tres fases más neutro) ya que los clientes domésticos se alimentan entre fase y neutro (lo mismo cabe decir de determinados equipos de los clientes industriales, tales como la iluminación). Además, en este tipo de instalaciones se pone a tierra el neutro del transformador por seguridad para las personas.

4.10.3. CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES Yy.

Los transformadores Yyn (sin neutro en el lado de alimentación) se comportan mal en vacío y en caso de cargas desequilibradas fase-neutro, ya que aparecen flujos homopolares que crean sobretensiones en las tensiones fase-neutro. Este comportamiento es muy malo en el caso de bancos de transformación y menos malo en el caso de transformadores de núcleo trifásico. Hoy en día los dos inconvenientes señalados no tienen gran importancia en las redes de alta tensión actuales, ya que la corriente de vacío de los transformadores actuales es muy reducida (del orden del 0,5%) y en las redes de alta tensión y muy alta tensión no existen desequilibrios de carga apreciables. No obstante, debe tenerse en cuenta que hay situaciones en las que pueden aparecer componentes homopolares de corriente, como son las faltas a tierra y las faltas serie (una fase abierta). En cualquier caso para que pueda aparecer componente homopolar de corriente es imprescindible que pueda existir retorno de corriente por el neutro.

²⁸ No siempre la puesta a tierra se realiza en el neutro de los transformadores, en ocasiones se utilizan reactancias para la puesta a tierra de las redes. En ese caso el tipo de reactancia más adecuado es la reactancia en zig-zag.

Si el transformador Yy tiene neutro en el lado de alimentación el comportamiento del transformador no es insatisfactorio ni en vacío ni ante desequilibrios (de carga o de otro tipo). A pesar de ello, por las razones que se comentarán en el siguiente apartado, los transformadores Yy se utilizan poco en la red eléctrica (en concreto, no se utilizan nunca si se trata de un banco de transformación).

Se puede utilizar para enlazar dos redes con neutro aislado. También se pueden emplear en el caso de transformadores de potencias pequeñas (especialmente si la tensión de alimentación es elevada y se precisa neutro en BT) cuando el desequilibrio de carga no supere el 10% de la potencia nominal.

4.10.4. CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES Yyd.

Los transformadores Yyd presentan las siguientes ventajas:

- Permite la puesta a tierra del neutro de AT y BT.
- Comportamiento satisfactorio en vacío
- Comportamiento satisfactorio ante cargas desequilibradas fase-neutro.

El gran inconveniente de estos transformadores es que son más voluminosos al disponer de un terciario, por lo tanto se utiliza más cobre para los bobinados de este y se necesitaría un núcleo más grande para alojar los arrollamientos, más aceite en la cuba, por lo que, en resumen, son más caros que los Yy.

Además, el arrollamiento terciario es frágil ante esfuerzos de cortocircuito, ya que frecuentemente se diseña para una potencia 1/3 de la potencia del transformador.

El transformador Yyd se utiliza como sustituto de los transformadores Yy, no tanto por los problemas mencionados del comportamiento en vacío y ante cargas desequilibradas de los transformadores Yy, sino por presentar una impedancia homopolar muy reducida.

Cuando en una red se produce una falta monofásica fase-tierra, las fases sanas sufren unas sobretensiones. La cuantía de estas sobretensiones viene determinada por el cociente entre la impedancia de secuencia homopolar y la impedancia de secuencia directa. Se dice que el sistema está efectivamente puesto a tierra cuando el cociente Z_0/Z_1 es menor a 3. En sistemas efectivamente puestos a tierra las sobretensiones que se tienen en caso de una falta monofásica fase-tierra son muy reducidas, lo que permite reducir el aislamiento de todos los elementos de la red. Además, una reducida impedancia homopolar contribuye a que las protecciones sean más sensibles a la hora de distinguir una falta en su zona de protección.

Los transformadores Yyd son los transformadores por excelencia para la red de transporte (400 kV y 230 kV), así como para enlazar éstas con las redes de reparto (132 kV, 66 kV)²⁹.

Hoy en día es poco frecuente que el terciario de estos transformadores se utilice para alimentar

²⁹ En otras palabras, para enlazar dos redes que estén puestas a tierra ambas.

algún tipo de consumos (como por ejemplo consumos de servicios auxiliares de una subestación) o para alimentar reactancias de compensación de potencia reactiva de las líneas.

4.10.5. CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES dY.

Los transformadores dY son los transformadores de generación por excelencia. Los generadores eléctricos habitualmente generan a tensiones no muy elevadas 30, con lo que las corrientes son muy elevadas. En estas circunstancias, como es sabido, es ideal que el arrollamiento unido al generador sea un arrollamiento en triángulo. Por lo demás, el devanado del generador se suele conectar en estrella, con lo que la puesta a tierra se realiza en el neutro del generador. El secundario de un transformador de generación está unido a la red de muy alta tensión (400 kV o 220 kV), por lo que lo ideal es que este arrollamiento esté en estrella con el neutro puesto a tierra.

Los transformadores dY también se usan para conectar parques eólicos (u otro tipo de autoprodutores) a la red de la compañía, ya que la O.M. 2225 de 1985 obliga a que este tipo de autoprodutores se debe conectar a la red a través de un transformador que tenga uno de sus arrollamientos en triángulo. La misión del triángulo es impedir la existencia de componentes homopolares de corriente (ya se trate de armónicos de corriente o de desequilibrios).

4.10.6. CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES Yd.

Se utilizan para alimentar una red con el neutro aislado a partir de una red con el neutro puesto a tierra, como es el caso de la transformación entre una red de alta tensión y una de media tensión (por ejemplo 132/15 kV).

4.10.7. CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES Dy

Los transformadores Dy son los transformador de distribución por excelencia ya que permiten extraer el neutro en el secundario (configuración en estrella) para entregar a los usuarios monofásicos (abonados domésticos o redes de alumbrado de abonados industriales) fase y neutro. Soporta correctamente todo tipo de cargas desequilibradas, y es más barato que el Yz.

Sin embargo, el bobinado conectado en triángulo no es adecuado cuando la potencia es pequeña y la tensión elevadas ya que las corrientes resultantes serian pequeñas:

$$\downarrow I = \frac{S \downarrow}{\sqrt{3} \cdot U \uparrow} \quad (4.46)$$

Lo cual, como se indicó anteriormente, no es muy adecuado.

³⁰ La tensión nominal de un generador es mayor cuanto mayor es su potencia nominal, pero las mayores tensiones de generación suelen rondar los 25 kV

Por eso el transformador Dy no suele utilizarse cuando se tienen bajas potencias y elevadas tensiones ya que no es recomendable la configuración en triángulo para estos casos.

4.10.8 CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS TRANSFORMADORES Yz

El gran inconveniente de estos transformadores es que necesita un mayor número de espiras, aproximadamente un 15% más de cobre en el secundario que un Yy. Es un transformador más caro que los transformadores clásicos estrella-estrella, estrella-triángulo.

Permiten extraer el neutro tanto en A.T. como en B.T. Se pueden alimentar usuarios entre fase y neutro y se comporta bien aunque las cargas sean desequilibradas.

Por todo ello este transformador es muy indicado como transformador de distribución. Se utiliza para potencias reducidas y tensiones elevadas (en concreto para potencias menores o iguales a 160 kVA con tensiones primarias de 15 kV o 20 kV). En caso contrario se prefiere el uso del transformador Dy ya que es más barato que el Yz.

4.11. AUTOTRANSFORMADORES

Aunque existen autotransformadores monofásicos y autotransformadores trifásicos, lo que sigue se comprenderá mejor si lo referimos a un autotransformador monofásico.

Si en un transformador (figura 4.37 a) unimos el final de bobina de uno de los arrollamientos con el principio del otro, aplicamos una fuente de tensión entre los dos terminales no unidos y ponemos una carga en el secundario del transformador original tendremos un autotransformador (figura 4.37 b).

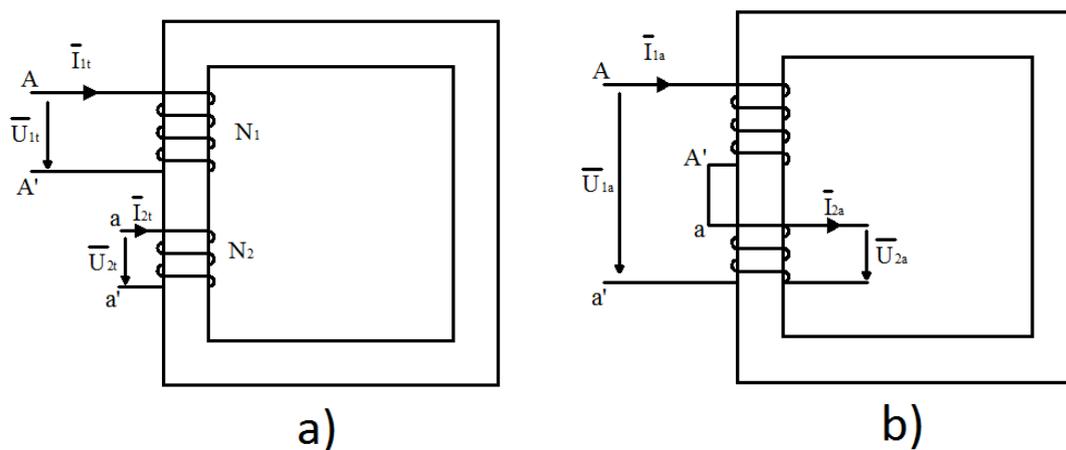


Figura 4.37: a) Transformador b) Autotransformador

La máquina así formada es reversible, esto es, se puede alimentar por el lado de BT para obtener una tensión más elevada en el otro arrollamiento o se puede alimentar por AT para obtener una tensión más reducida en el otro arrollamiento.

Hasta aquí se ha hablado de autotransformadores monofásicos. También existen autotransformadores trifásicos. En estos autotransformadores la conexión de los arrollamientos siempre es Yy (en la mayoría de los casos con un terciario en triángulo, por las razones ya comentadas).

4.11.1 COMPARACIÓN ENTRE TRANSFORMADORES Y AUTOTRANSFORMADORES A IGUALDAD DE TENSIONES NOMINALES Y POTENCIAS NOMINALES.

Imaginémonos que se desea trasvasar una cierta potencia S_N entre dos redes monofásicas de tensiones U_{1N} y U_{2N} y se plantea ¿qué es mejor, emplear un transformador o un autotransformador?

Para responder a esa pregunta compararemos los volúmenes de cobre y de hierro requeridos en ambos casos. Para comparar los volúmenes de cobre y hierro compararemos el área de cobre y la longitud de cobre y el área de hierro y la longitud de hierro. Para fijar ideas supongamos que estamos hablando de un autotransformador reductor (figura 4.37).

Sección de hierro: Empecemos por comparar el área de hierro. Es el transformador y en el autotransformador se cumple

$$U_{1N} = 4,44 f N_{1T} B S_{FeT} \quad (4.47)$$

$$U_{1N} = 4,44 f N_{1Aut} B S_{FeAut} \quad (4.48)$$

Los transformadores se diseñan partiendo de una inducción de diseño determinada, de modo que si elegimos el mismo número de espiras en el transformador y en el autotransformador, la sección de hierro ha de ser la misma en ambos casos. Por este lado no hay ahorro.

Longitud de cobre: Ahora comparemos la longitud de cobre.

En un transformador tenemos $N_{1T} + N_{2T}$ espiras. Para conseguir la misma relación de transformación el autotransformador debe tener el mismo número de espiras, pero ocurre que parte de las espiras son comunes a primario y a secundario, de modo que en un autotransformador se debe tener un *devanado serie*³¹ con $N_{1T} - N_{2T}$ espiras y un *devanado común* con N_{2T} espiras. Por tanto el autotransformador precisa menos volumen de cobre, ya que se ahorran N_{2T} espiras.

³¹ En autotransformadores se suele hablar de arrollamiento serie y arrollamiento común en lugar de primario y secundario

Sección de cobre: Para comparar la sección de cobre admitiremos que la densidad de corriente δ es la misma en todos los arrollamientos³².

En el transformador se tienen

$$N_{1T} \text{ espiras de sección } s_{cu1} = \frac{I_{1N}}{\delta} \quad (4.49)$$

$$N_{2T} \text{ espiras de sección } s_{cu2} = \frac{I_{2N}}{\delta} \quad (4.50)$$

Por las N_{1T} - N_{2T} espiras del arrollamiento serie del autotransformador circula la intensidad I_{1N} , pero por las N_{2T} espiras del arrollamiento común circula una corriente I_{1N} - I_{2N} como fácilmente se puede comprobar haciendo el balance de amperios-vuelta en el núcleo³³. Por tanto, en el autotransformador se tienen

$$N_{1T} - N_{2T} \text{ espiras de sección } s_{cu1} = \frac{I_{1N}}{\delta} \quad (4.51)$$

$$N_{2T} \text{ espiras de sección } s_{cu_comun} = \frac{I_{1N} - I_{2N}}{\delta} \quad (4.52)$$

En otras palabras, que la sección de las espiras del arrollamiento común es menor que la sección del secundario del transformador. Por tanto la sección de cobre es menor.

Longitud de hierro: Para ahorrar hierro, la ventana de un transformador debe tener las menores dimensiones posibles pero que garanticen que dentro de la ventana caben los arrollamientos y que la distancia entre las diferentes partes en tensión sea adecuada como para que se garantice el aislamiento. Hemos visto que en un autotransformador hay que alojar menos conductores y parte de ellos tienen una sección menor. Por ello, las dimensiones de la ventana en un autotransformador son menores que en un transformador.

4.11.2. VENTAJAS DE LOS AUTOTRANSFORMADORES

Resumiendo lo anterior, las ventajas del empleo de autotransformadores son las siguientes:

³² En realidad esto no es cierto, pues por problemas de refrigeración un conductor grueso se diseña con menos densidad de corriente que uno fino

³³ Supongamos que por el arrollamiento serie del autotransformador circula I_{1N} y por el arrollamiento común I_c , despreciando la corriente de magnetización el balance de f.m.m. da

$$(N_{1T} - N_{2T})I_{1N} = N_{2T}I_c$$

La relación entre I_{1N} e I_{2N} debe ser idéntica para el transformador y para el autotransformador

$$N_{1T}I_{1N} = N_{2T}I_{2N}$$

Con lo que se llega a

$$I_c = I_{2N} - I_{1N}$$

- Necesitan una menor cantidad de cobre que los transformadores ya que solo tienen N_1 vueltas de hilo mientras que en los transformadores el número de vueltas es de $N_1 + N_2$. Además al circular una corriente menor ($I_2 - I_1$) por el arrollamiento común los arrollamientos de cobre serán más finos para una densidad de corriente similar.
- Las pérdidas en el cobre disminuirán al haber menos cantidad de éste³⁴.
- Ahorro de hierro debido a que al tener una menor cantidad de cobre será necesario menos espacio para alojar el bobinado (dimensiones de la ventana).
- Menos pérdidas en el hierro ya que éstas son directamente proporcionales al volumen de hierro³⁵ y al reducir éste las pérdidas también se reducirán.
- Aumento del rendimiento al reducir las pérdidas en el hierro y en el cobre.
- Mejora de la refrigeración al reducirse las pérdidas.
- Más fácil transporte al tener menor volumen.
- Disminución de la corriente de vacío³⁶, aunque no es una ventaja tan significativa como las anteriores.
- El flujo disperso es menor, ya que el flujo disperso es aquel que concatena a un arrollamiento pero no concatena a otro; en este caso el flujo de dispersión del secundario concatena (aunque sea parcialmente) al primario. Al ser menor el flujo de dispersión se reducen las caídas de tensión en carga

4.11.3. INCONVENIENTES DE LOS AUTOTRANSFORMADORES

Un primer problema es dónde situar las tomas, ya que hay varias soluciones y todas malas:

- Situar las tomas en el lado de BT requiere que las tomas estén dimensionadas para más corriente
- Situar las tomas en el extremo de línea del arrollamiento de AT (en realidad deberíamos decir del arrollamiento serie) requiere aislar el conmutador del cambiador de tomas para la plena tensión de línea.

³⁴ Las pérdidas en el cobre valen

$$P_{cu} = RI^2 = \rho \delta^2 V_{ol_cu}$$

³⁵ Las pérdidas en el hierro valen

$$P_{Fe} = (k_H f B^2 + k_{Fo} f^2 B^2) V_{ol_Fe}$$

³⁶ Disminuye tanto la componente magnetizante

$$NI_\mu = Hl_{Fe}$$

Como la componente de pérdidas

$$I_{Fe} = \frac{P_{Fe}}{U_{1N}}$$

- Situar las tomas en el extremo de neutro supone que si variamos las tomas estamos variando simultáneamente el número de espiras de primario y de secundario

De hecho, en algunas ocasiones se opta por no poner cambiador de tomas en los autotransformadores.

Otra desventaja es que debido a su reducido flujo disperso es muy complicado para el fabricante conseguir una determinada impedancia de circuito especificada por el cliente.

Un tercer problema es que no sirve para interconectar redes con diferente tratamiento del neutro (por ejemplo, para enlazar una red de 132 kV con neutro puesto a tierra con una red de 15 kV con neutro aislado), ya que las protecciones requeridas en ambas redes son distintas.

Tampoco sirven para alimentar usuarios en baja tensión a partir de una red de media tensión, ya que este tipo de aplicaciones la seguridad es un requisito fundamental, y el autotransformador no garantiza aislamiento galvánico, y ante determinados accidentes podrían aparecer en la red de baja tensión tensiones no seguras para clientes domésticos.

4.11.4. COMPARACIÓN A IGUALDAD DE MATERIAL (COBRE Y HIERRO)

Vamos ahora a hacer una comparación de cuánta más potencia me puede dar un autotransformador que un autotransformador suponiendo que el volumen de cobre y el volumen de hierro son idénticos.

Para el transformador de la figura 4.37a los datos del transformador son

Tensión primaria nominal U_{1N}

Tensión secundaria nominal U_{2N}

Intensidad primaria nominal I_{1N}

Intensidad secundaria nominal I_{2N}

Si en el autotransformador de la figura 4.37b el volumen de cobre y de hierro es el mismo, los datos del transformador serán

Tensión primaria nominal $U_{1Naut}=U_{1N}+ U_{2N}$

Tensión secundaria nominal $U_{2Naut}=U_{2N}$

Intensidad primaria nominal $I_{1Naut}=I_{1N}$

Intensidad secundaria nominal $I_{2Naut}=I_{1N}+I_{2N}$

Vamos a comparar las potencias del autotransformador y del transformador

$$\frac{S_{NAut}}{S_{NT}} = \frac{U_{1NAut} I_{1NAut}}{U_{1NT} I_{1NT}} = \frac{U_{1N} + U_{2N}}{U_{1N}} = \frac{U_{1NAut}}{U_{1NAut} - U_{2NAut}} \quad (4.53)$$

Es decir, un autotransformador es rentable especialmente cuando las tensiones primaria y secundaria son muy próximas entre sí. Por eso sólo se emplean si la relación de transformación es menor que 3.

4.11.5. CAMPO DE APLICACIÓN DE LOS AUTOTRANSFORMADORES

Teniendo en cuenta las ventajas e inconvenientes mencionados, los autotransformadores se pueden encontrar en tres tipos de aplicaciones:

- Para enlazar redes de muy alta tensión con neutro puesto a tierra (típicamente una red de 400 kV con una red de 220 kV)
- Para enlazar redes de media tensión con neutro aislado (ambas), por ejemplo una red de 20 kV de una compañía eléctrica con una red de 15 kV de la misma compañía.
- Como pequeños transformadores domésticos 220/127 V
- Para arranque de motores asíncronos.